

## Dual Converter에 의한 DC MOTOR의 새로운 전류제어

지준근\*, 설승기  
 서울대학교 전기 공학과

### A New Current Control of DC Motor using Dual Converter

Jun-keun Ji, Seung-ki Sul  
 Dept. of Electrical Eng., Seoul Nat'l Univ.

**Abstract**

In this paper a predictive current control strategy is adopted in the D.C motor drive using dual converter. It is a kind of feedforward control working without overshoot within very short settling time. The difference to the well-known PI current control lies in considering the computer's ability of pre-calcurating the converter's behavior. By simulation it is shown that the predictive current control solve the problems of optimal PI current control, such as overshoot and settling time.

**1. 서론**

Mill drive와 같은 대용량의 DC drive에는 dual converter 가 많이 사용되어지고 있고, 전류제어부는 통상적으로 정상상태 특성이 양호한 PI 제어기로 이루어져 있다. PI 제어와 같은 feedback 제어는 선형제어 이론에 근거하고 있어서 제어 loop 내에 있는 모든 요소들의 선형 특성을 가정하고 있다.

그러나 converter control 과 같은 예들은 매우 비선형적이며, 단속적인 요소들을 포함하고 있어서 과도상태 특성은 만족스럽지 못하다. 특히 기준 신호의 변화와 같은 과도 상태에서는 PI 제어를 사용한 경우 overshoot 와 settling time 의 문제가 있어서 optimal gain 의 설정이 중요한데 이러한 gain 의 설정도 연속 전류 mode 와 불연속 전류 mode에 따라서 달라져야 하며 근본적으로 overshoot 와 settling time 의 문제는 남게 된다. [1, 2, 3]

따라서 전류 제어에 있어서도 이러한 문제점들을 해결하기 위한 많은 시도들이 행해졌다. [5, 6] 특별히 새로운 전류 제어로서 매우 짧은 settling time 을 가지면서 overshoot가 없이 동작하는 predictive 제어이론이 제시되어 왔는데 이것은 일종의 feedforward 제어의 일종으로서 converter의 동작을 미리 계산해 내는 computer의 능력을 요구하고 있다. [2, 3]

현재에는 DSP(Digital Signal Processor) 와 같은 막강한 계산능력을 갖는 microprocessor들이 개발되어져 있어 predictive 제어기의 구현이 쉬워졌고 이를 dual converter의 전류제어에 적용한 결과 종래의 optimal PI 제어에 의한 전류 제어 응답특성에서의 문제점들을 해결한 최적의 특성을 얻을

수 있음을 보일 수 있다.

본 논문에서는 predictive 전류제어 이론에 대한 소개와 dual converter 에 의한 DC drive 에 적용한 결과를 종래의 optimal PI 제어의 경우와 비교하여 그 우수성을 보이고자 한다.

**II. 전류제어 이론**

**1. 종래의 PI 제어**

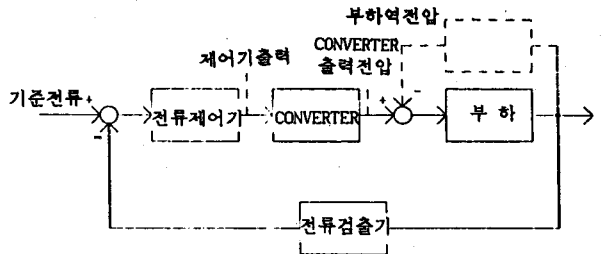


그림 1. 종래의 feedback 전류제어부

그림 1은 종래에 사용되어 오던 feedback 전류제어부로서 전류 제어기는 정상 상태 오차가 없고 빠른 응답 특성을 만족하는 PI 제어기로 구성되어 있다. 여기서 만족스러운 특성을 얻기 위해서는 optimal PI gain 의 선정이 중요하므로 Symmetric optimum 방법 [1, 5]에 의해 PI 제어기의 gain  $K_p$  와 시정수  $T_c$  를 구할 수 있다.

**1) PI 전류 제어기의 설계**

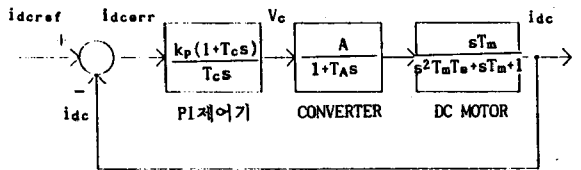


그림 2. 전류 제어부

gain crossover 주파수  $\omega_c$  가  $1/\sqrt{T_m T_o}$  보다 클 때, loop gain 함수는 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$GH(s) = \frac{K_p A}{T_c} \cdot \frac{1+T_c s}{(1+T_m s)^2 T_o} \quad (1)$$

이 때 제어기의 gain  $K_p$  와 시정수  $T_c$  는, phase margin이 최대가 되며 damping ratio 가 0.707 이 되도록 하는 symmetric optimum 방법에 의해 설계되어지면

$$\left. \begin{aligned} T_c &= (\sqrt{2}+1)^2 T_A \\ K_p &= \frac{1}{(\sqrt{2}+1)} \cdot \frac{T_o}{A} \cdot \frac{1}{T_A} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

단,  $T_o$  : 전동기의 전기적 시정수 (=  $L_a/R_a$ )

$T_m$  : 전동기의 기계적 시정수 (=  $J/B$ )

$T_A$  : converter의 time delay

(= 16.7[ms]/12)

A : converter의 gain (=  $V_{dcmax}/V_{cmax}$ )

### 2) PI 전류제어기의 문제점

첫째, 이 방법에 의해 선정된 optimal gain 은 응답은 빠르나 underdamping 에 의한 overshoot 가 있어서 기준 전류값과 점호각  $\alpha$ 에 따라 초기 과도특성이 문제가 된다.

둘째, 이 방법의 optimal gain 은  $i_{dc}$ 가 연속일 때에 만족하도록 설계된 것이므로  $i_{dc}$  가 불연속일 때에는 특성이 optimal하지 못하게 된다.

이상의 문제점을 개선하기 위한 방법으로 adaptive 전류제어기의 설계에 관한 연구가 되어져 왔고, 한 예로서  $i_{dc}$ 가 연속적일 때에는 optimal PI제어기를 사용하고,  $i_{dc}$ 가 불연속일 때에는 integral제어기를 사용하는 adaptive한 방법도 있다. [5,6]

그러나 이러한 adaptive 전류제어기를 구성하여도 적분 제어기의 초기조건 설정이 중요하다. 초기 조건이 적절하지 않으면 초기 상태에 큰 값의 전류 overshoot가 발생하게 될 수도 있어서 기준전류와 역기전력의 조정에 의해 초기 조건이 미리 적절하게 설정되어야 한다.

### 2. Predictive 전류제어

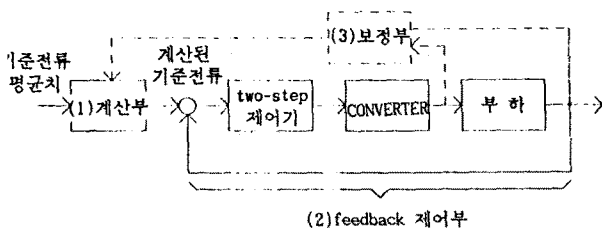


그림 3. Predictive 전류 제어부

그림3은 predictive 전류제어부의 구성도로서 overshoot 없이 매우 짧은 settling time 을 갖는 deadbeat 특성을 만족하는 일종의 feedforward 제어기이다.

predictive 전류제어기는 converter 의 출력 전류와 기준 전류 사이의 수학적인 관계식을 알아야 하고, 다음 제어구간에서의 converter 의 출력전류를 미리 계산해 내기 위한 computer의 막강한 능력을 필요로 한다.

직류 전동기를 부하로 갖는 自然 轉流(natural commutation)방식 dual converter 시스템의 전류 제어에 이를 적용하여 보고, 등가회로 해석에 기초한 수학적 관계식을 유도해 보면 다음과 같다.

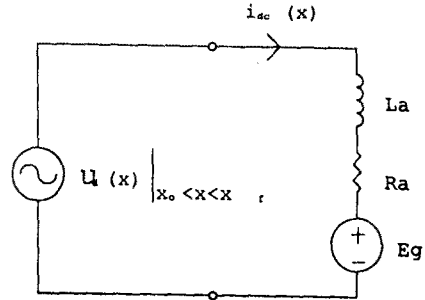


그림 4. 정상상태 도통기간의 DC drive 등가회로

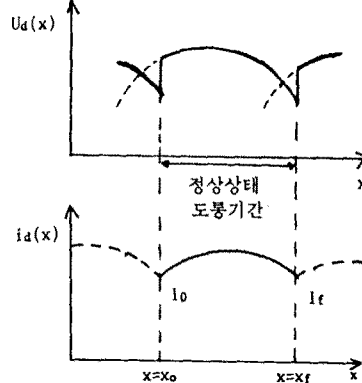


그림 5. DC drive의 converter 전압과 부하 전류

그림 4의 등가 회로에서,

$$\omega L_a \frac{di_d(x)}{dx} + R_a i_d(x) + E_g = u_d(x) \quad (3)$$

$$x = \omega t$$

$$i_d(x=x_0) = I_0$$

$$i_d(x=x_f) = I_f$$

$$i_d(x) = \frac{I_1 \cos(x-\pi/6+\alpha) + I_2 \exp(-\rho x) + I_3}{I} \quad (4)$$

I : 전원 전압에 의한 전류 성분

II : 과도 상태 전류 성분

III : 부하 역전압에 의한 전류 성분

$R_a, L_a, E_g$  : 부하 parameter

I : 기준 전류 평균

$u_d$  : 전원 전압의 amplitude

$\alpha$  : 점호각

$\beta$  : 소호각

단,  $u_d(x) = u_a \cos(x - \pi/6 + \alpha)$

$\rho = R_a / (\omega L_a)$

$\phi = \tan^{-1}(\omega L_a / R_a)$

$Z = [R_a^2 + (\omega L_a)^2]^{1/2}$

$I_1 = u_d / Z$

$I_2 = \frac{[1 - I_3 - \frac{3}{\pi} I_1 \cos(x - \frac{\pi}{6} + \alpha - \phi)] \cdot \frac{\pi}{3} \rho}{\sinh(\pi/6\rho)}$  : 전류 연속 mode

단,  $\alpha = \cos^{-1}(\frac{R I + E_g}{u_d} \cdot \frac{\pi}{3})$

$[-I_3 - I_1 \cos(\alpha - \frac{\pi}{3} - \phi)] \cdot \exp[\rho(\alpha - \frac{\pi}{6})]$

$= [-I_3 - I_1 \cos(\beta - \phi)] \cdot \exp(\rho\beta)$  : 전류 불연속 mode

단,  $\alpha(I, E_g, \beta)$ ,  $\beta(I, E_g, \alpha)$ 는 비선형 방정식을 수치해석 방법으로 계산

$I_3 = -\frac{E_g}{R_a}$

여기서,  $E_g$ 는 각 구간에서 거의 일정하다고 볼 수 있다.

Predictive 전류제어기에서는 microprocessor가 실제전류  $i_{ac}$ 와 계산한 기준 전류  $i_{pre}$ 를 비교하여 그 값들이 같을 때 converter의 각 switching 소자의 점호 및 소호에 의해 동작 구간을 전환하는 two-step 제어기를 사용한다.

Predictive 전류 제어기는 다음과 같이 기능별로 크게 3개의 부분으로 나눌 수 있다. 그림 3에서 ① converter 출력 전류를 미리 계산하는 계산부, ② two-step 제어기와 converter, 부하등으로 구성되는 feedback 제어부, ③  $R_a, L_a$  등 식(4)에서의 parameter 값을 보정해주는 보정부 이다.

Predictive 전류제어기의 장점은 첫째, 어떠한 형태의 converter 에도 실제적으로 결합이 가능하다. 둘째, Converter 의 동작 mode (전류 연속 또는 불연속 mode)에 상관없다. 이 점에서 optimal PI 제어기 보다 뛰어나며 adaptive PI 제어기보다 성능면에서 양호하다.

III. Simulation 결과

이상에서 언급한 optimal PI 전류제어기와 predictive 전류 제어기를 simulation 을 통해 구현하여 보고 그 장단점을 비교 검토하여 보았다.

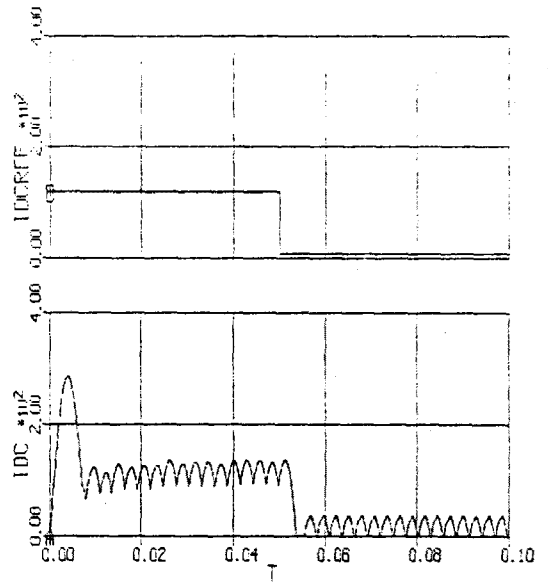
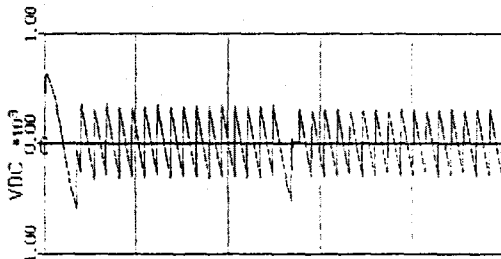


그림6 optimal PI 제어기

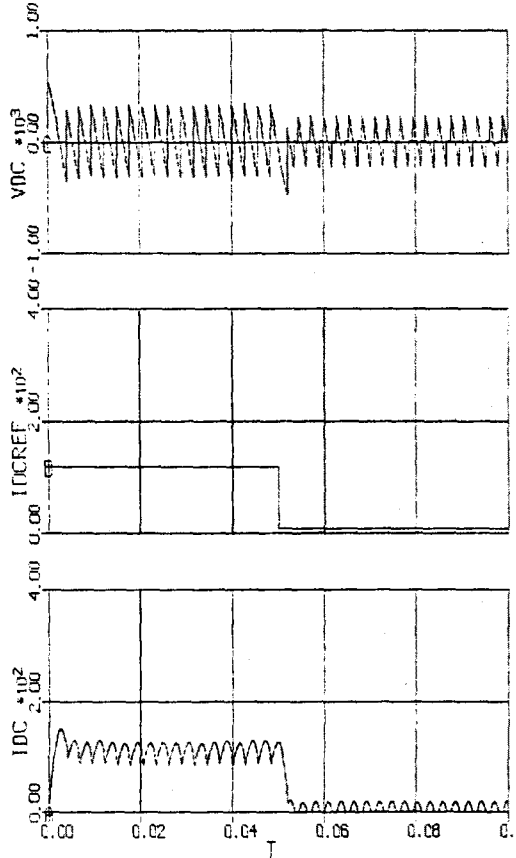


그림7 Predictive 제어기

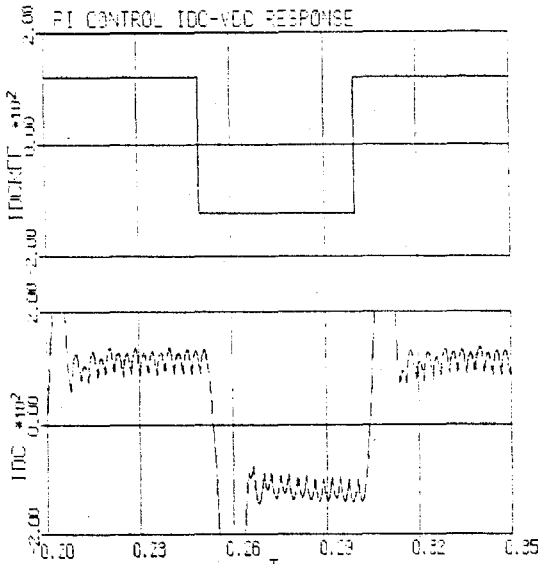


그림8 optimal PI 제어기

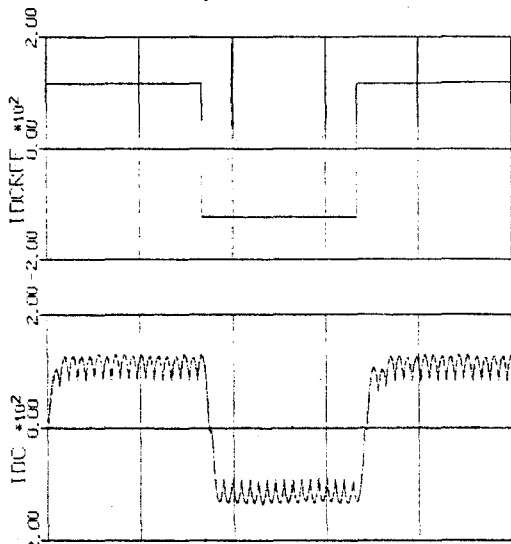


그림9 Predictive 제어기

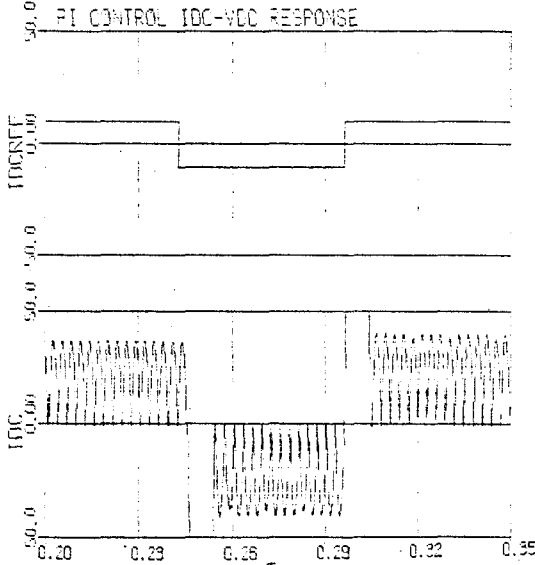


그림10 optimal PI 제어기

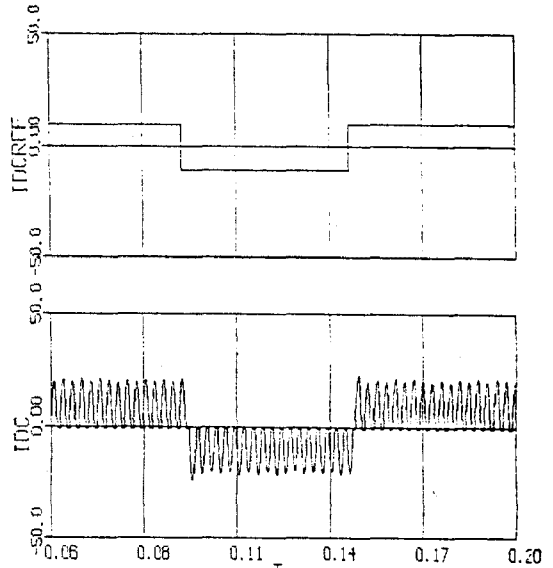


그림11 Predictive 제어기

IV. 결론

본 논문에서는 Dual Converter에 의한 D.C Motor의 전류 제어에 있어서 종래에 사용되어 오던 optimal PI 전류제어와 새로운 전류제어인 Predictive 전류제어 기법에 대하여 이론적으로 소개하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 각 제어기의 특성을 비교 검토하여 보았다. Predictive 제어기는 다음 제어 구간에서의 Converter의 출력전류를 미리 계산하여 실제 전류값과 비교하여 Converter의 스위칭 소자들을 ON/OFF한다. 이러한 방법에 의하면 Converter의 비선형적이고 시변하는 특성을 고려할 수 있다. 그리고 특성면에서도 optimal PI 제어기에서의 문제점인 overshoot나 settling time의 문제들을 해결한 deadbeat 특성을 얻을 수 있었다. 차후의 연구과제로는 보다 정확한 전류제어를 위해서 parameter 변동에 따른 보정부를 만들 필요가 있다.

V. 참고 문헌

- [1] T. Krishnan and B. Ramaswami, "Speed control of D.C Motor using Thyristor Dual Converter", IEEE Trans., on Ind. Elec. & Control Instrumentation, vol IECI-23, 1976, No. 4, pp 391~399.
- [2] R. Kennel and D. Schröder, "Predictive Control Strategy for Converters", IFAC Control in Power Electronics and Electrical Drives, 1983, pp 415~422.
- [3] D. Schröder and R. Kennel, "Model-Control PROMC-A New Control Strategy with Microcomputer for Drive Applications", IEEE-IAS, Annual Meeting Conf. Rec., 1984, pp 834~839.
- [4] B. R. Pelly, "Thyristor phase controlled converter and cycloconverter", New York John Wiley, 1971, chapters 2 and 5.
- [5] Werner Leonhard, "Control of Electrical Drives", Springer-Verlag, 1985, chapters 8 and 9.
- [6] A. Oumamar, J. P. Louis and A. El-Hefnawy, "Design of an optimal, autoadaptive Current loop for D.C. Motor. Realization with an Hybrid device including a Microprocessor", IFAC Control in Power Electronics and Electrical Drives, 1977, pp 593~601.