

온라인 파라미터 추정을 이용한 위상제어 정류기의 예측전류제어 특성 개선

정세종, 송승호

전북대학교 전자정보공학부

Improvement of Predictive Current Control Performance using Phase Controlled Rectifier in Online Parameter Estimation

Se-Jong Jeong, Seung-Ho Song

Division of Electronics and Information Engineering
Chonbuk National University

ABSTRACT

위상제어 정류기 시스템에서 예측전류제어는 전류 응답속도가 매우 빠르고 오버슈트가 없는 것으로 알려져 있다. 하지만 전원과 부하의 전압 전류 방정식에 의존하는 예측전류제어는 부하 파라미터 값이 틀릴 경우 전류지령값과 피드백 사이에 정상상태 오차를 보이게 된다. 본 논문에서는 디지털 순시치 샘플링과 최소자승법을 이용하여 온라인으로 부하의 파라미터를 추정하는 알고리즘을 제안하였고, 이를 이용하여 예측전류제어를 수행함으로써 빠르고 정밀한 전류제어응답을 보였다.

1. 서론

위상제어 싸이리스터 컨버터는 3상 교류전압의 위상을 제어하여 직류전류 및 전압을 얻는 장치로써 직류전동기 구동장치 또는 대용량 직류 전원장치에 주로 사용된다. 컨버터의 운전은 출력전류의 상태에 따라 연속 또는 불연속전류 운전모드로 나뉘며 불연속전류모드일 경우 제어하는 위상각과 출력전압이 비선형적인 관계에 놓임으로써 통상적인 비례적분제어기를 통해 원하는 전류제어 응답특성을 얻기 어렵다.^[1] 예측전류제어 알고리즘은 이와 같은 시스템에서 빠르고 오버슈트가 없는 전류 제어 응답특성을 갖는다.^[2] 이 알고리즘은 전원전압과 부하회로간의 방정식을 실시간으로 풀어서 부하에 흐르게 될 전류의 제적을 미리 예측한 값과 현재전류와 비교하여 전류제어를 수행하는 방식으로 정확한 계산을 위해서는 부하회로의 저항과 인덕턴스 값을 알아야 한다. 이러한 값들은 시운전시 수동으로 측정하는 방법이 있으나 측정오차가 많고 운전조건이 변화함에 따라 오차가 발생하는 경우가 많

다. 본 논문에서는 직류전동기 부하를 대상으로 운전중에 실시간으로 저항과 인덕턴스 값을 계속적으로 정밀하게 추정함으로써 예측전류제어에 있어서 파라미터 오차에 따른 정상상태 오차를 제거할 수 있는 알고리즘을 제시하였고 시뮬레이션과 실험을 통해 그 특성을 검증하였다.

2. 3상 위상제어 정류기 시스템의 특성

그림 1은 부하에 정방향 및 역방향 전류를 흘리기 위한 듀얼 컨버터의 일반적인 구조를 보이고 있다. 이러한 시스템에서는 싸이리스터 소자의 점호시점을 결정함으로써 부하에 공급하는 전압 및 전류량을 제어할 수 있다.

이러한 위상제어 정류기시스템의 특징으로 그림 2에서 보이는 것과 같이 전류가 0인구간이 존재하는 불연속 전류모드와 전류가 0인구간이 존재하지 않는 연속 전류모드로 나뉘어 점호각과 출력전압 또는 전류간에 관계식은 두 개가 존재하게 된다.

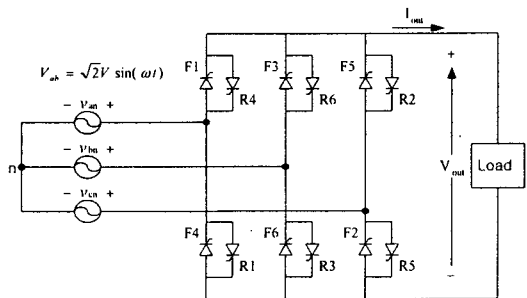


그림 1 3상 위상제어 정류기 시스템
Fig. 1 3-phase controlled rectifier system

일반적인 3상 위상제어 정류기시스템에서 점호각에 따른 평균 출력전압은 식 (1)과 같다.

$$V_o = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\beta+60} \sqrt{2} V \sin \omega t d(\omega t) \quad (1)$$

where, α : 점호각, β : 소호각

식 (1)에서 점호각이 일정할 때, 소호각은 부하의 R, L값 및 역기전력에 의해 결정되어 평균 출력전압은 단순히 점호각만의 함수가 아니게 된다. 전류가 연속으로 흐를 때 소호는 점호후 60° 후에 일어나게 된다. 식 (1)에서 소호각에 $\alpha+60^\circ$ 를 넣어 정리하면 연속모드의 출력전압 평균값은 식 (2)와 같다.

$$V_o = \frac{3\sqrt{2}V}{\pi} \cos \alpha \quad (2)$$

식 (2)에서는 전류가 불연속일 경우와 달리 평균 전압과 점호각사이의 관계는 명료하게 점호각만의 함수로써 나타남을 보여준다.

식 (1)과 식 (2)로부터 전압과 점호각 사이의 관계는 일정하지 않으므로, 비례적분 제어기를 사용하여 빠른 전류제어 특성을 얻기 위해서는 두 모드에 대한 각각의 제어기이득으로써 제어 해야한다.

3. 예측 전류 제어

3.1 기존 방식의 예측전류제어

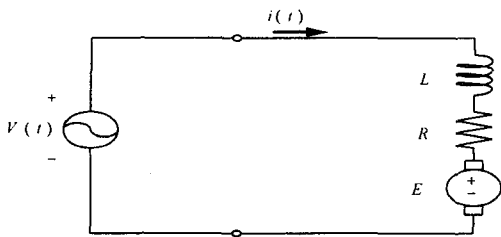


그림 2 두 점호신호 사이동안의 DC 등가회로
Fig. 2 equivalent circuit during conduction period

그림 2은 싸이리스터 도통구간에서 전원과 역기전력을 갖는 R-L회로를 등가적으로 나타내었다. 이 그림으로부터 회로 방정식은 식 (3)과 같다.

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + E \quad (3)$$

where, $v(t) = \sqrt{2} V \cos \omega t$

식 (3)으로부터 전류는 식 (4)와 같이 구해진다.

$$i(t) = I_1 \cos(\omega t - \phi) + I_2 e^{-\frac{R}{\omega L} \omega t} + I_3 \quad (4)$$

where, $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, $\phi = \tan^{-1}(\frac{\omega L}{R})$

$I_1 = \frac{\sqrt{2}V}{Z}$: 전원에 의한 항

$I_3 = -\frac{E}{R}$: 역기전력 항

I_2 : 과도항

식 (4)로부터 다음의 점호에 의해 부하에 흐르는 전류를 예측할 수 있다. 기존의 예측전류제어기는 전류기준값으로부터 계산한 I_1, I_2, I_3 값을 식 (4)에 대입하여 예측전류를 구한다. 매 샘플링마다 한번씩 구한 예측전류는 현재 샘플링된 순시 전류값과 비교하여 예측전류가 커지는 시점에서 점호를 하게 된다.^[2]

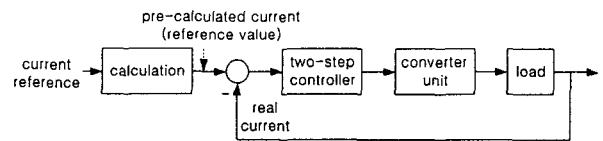


그림 3 예측전류제어의 블록도

Fig. 3 block diagram of predictive current control

그림 3는 예측전류제어기의 블록도를 나타내고 있다. 이러한 예측전류제어는 전류응답이 매우 빠르며 또한 오버슈트또한 없는 것이 장점이지만 매 전류샘플링마다 한번씩 비교를 해야 하므로 정밀도를 높이기 위해서는 샘플링주기를 짧게 해야하며 부하의 파라미터(R, L)값들이 틀릴 경우 정상상태 오차가 발생한다. 이러한 단점을 보완하는 방법^[3]으로 예측전류를 계산하는데 필요한 점호각을 타이머에 로딩하여 전류제어를 수행함으로써 점호시점의 정밀도를 높이고 비례적분제어기으로써 정상상태 오차를 제거하지만 전류기준값이 계속적으로 바뀔 경우는 제어기 동특성이 떨어진다고 할 수 있다.

3.2 온라인 파라미터 추정기

예측전류를 계산하는데 필요한 부하 파라미터는 전압, 전류, 역기전력으로부터 추정할 수 있다. 즉, 식 (3)으로부터 식 (5)과 같이 변형하여 샘플링되어진 전압, 전류값들로부터 최소자승법을 사용하여 파라미터를 추정할 수 있다.

$$V[n] = RI[n] + L \frac{I[n+1] - I[n-1]}{2T_s} + E \quad (5)$$

식 (5)에서 T_s 는 샘플링 시간이며, 식으로부터 R

과 $\frac{L}{2T_s}$ 값을 구하는 수식은 식 (6)과 같다.

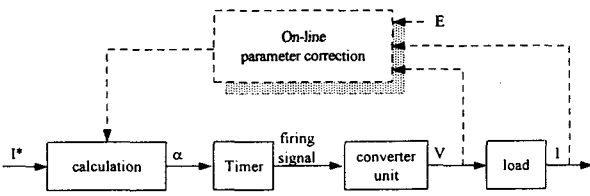


그림 4 제안된 온라인 파라미터 추정기를 포함한 예측전류제어기

Fig. 4 proposed predictive current controller with online parameter estimator

$$\begin{bmatrix} R \\ L \\ 2T_s \end{bmatrix} = [I^T I]^{-1} I^T V \quad (6)$$

where,

$$V = [V[2] - E \quad V[3] - E \quad \dots \quad V[N-1] - E]^T$$

$$I = \begin{bmatrix} I[2] & I[3] & \dots & I[N-1] \\ I[3] - I[1] & I[4] - I[2] & \dots & I[N] - I[N-2] \end{bmatrix}^T$$

식 (6)으로부터 구한 파라미터값은 점호각 계산 시 사용되며 그 구성도는 그림 4와 같다.

4. 시뮬레이션

그림 5는 알고리즘 검증을 위한 DC전동기 부하에서의 시뮬레이션 회로이며, DC전동기의 파라미터는 $R=1.0[\Omega]$, $L=10[mH]$ 이고 제어기에서의 초기 파라미터는 $R=1.5[\Omega]$, $L=15[mH]$ 로 참값의 150%로 하였다. 또한 본 시뮬레이션에서 사용된 샘플링 시간은 $T_s=92.592[usec]$ 로 전원 한주기동안 180번의 샘플링을 하며, 파라미터를 추정하기 위해 한번에 계산되는 샘플링 개수는 15개이다.

그림 6은 전류기준값이 5[A]일 때, 추정된 파라미터값과 그에 따른 전류 응답을 보여주고 있는데 250[msec]에서 파라미터 추정이 시작되어 추정된 파라미터로 인해 피드백 전류가 전류기준값을 따라가고 있음을 보이고 있다.

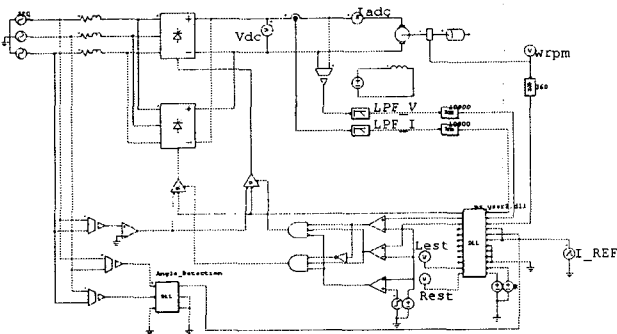


그림 5 DC전동기 구동장치 시뮬레이션 회로도
Fig. 5 simulation circuit using DC-motor load

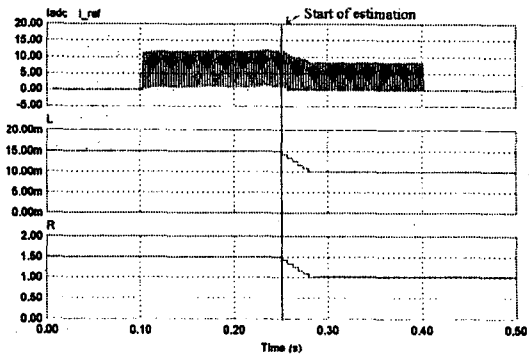


그림 6 전류제어기의 전동기 파라미터와 전류제어 응답성
Fig. 6 current control response and motor parameter estimation

5. 실험

5.1 실험 장비

그림 7은 본 연구를 위한 실험 시스템을 나타내고 있다. 시스템은 TMS320C31 컨트롤 보드와 컴퓨터 그리고 뒤쪽에 DC전동기로 구성되어 있다.

본 제어시스템의 샘플링 주파수는 10.8[kHz]이며, 파라미터 추정은 5.5[msec]마다 한번씩 수행된다.

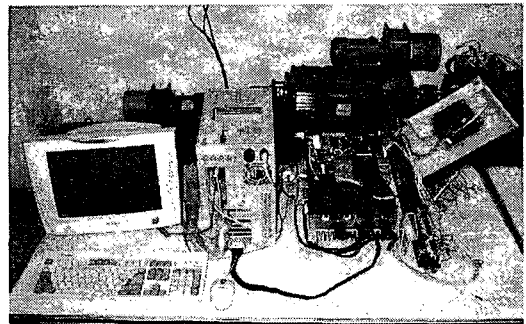


그림 7 실험 장치 사진
fig. 7 experimental setup

5.2 실험 결과

그림 8은 전류기준값이 5[A]일 때, 추정된 파라미터값과 그에 따른 전류 응답을 보여주고 있다. 전류 응답파형에서 초기 파라미터값에 의해 많은 오차를 보이고 있지만 파라미터가 추정됨에 따라 전류오차가 없어짐을 보이고 있다.

그림 9는 그림 8에서 파라미터가 추정되는 시점에서 샘플링된 전압, 전류와 샘플링 신호, 파라미터 계산신호를 보여주는 것으로 샘플링 신호는 싸이리스터 점호 후 파라미터 추정에 필요한 15개의 샘플을 확보하기 위한 신호로써 전압이 심하게 변하는 구간에서 샘플링을 피하기 위함이며, 파라미터 계산신호는 전압, 전류 샘플링 후 계산이 완료될 때까지 1로 유지되어 다음 샘플링과 중복되지 않도록 해준다.

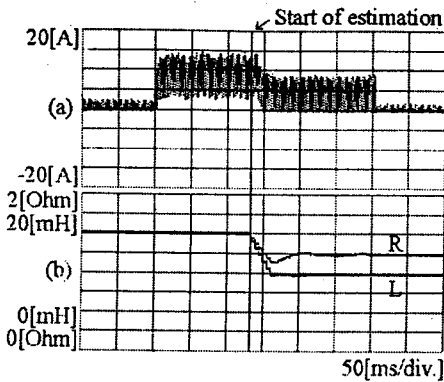


그림 8 (a)제어기 파라미터에 따른 전류응답
(b)추정된 전동기 파라미터

Fig. 8 (a)current response by controller parameter
(b) estimated motor parameter

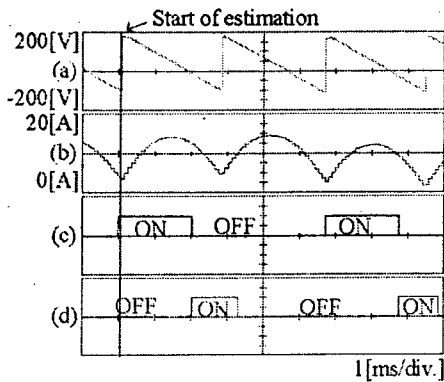


그림 9 샘플링된 (a)전압 (b)전류, (c)샘플링 신호
(d)파라미터 계산신호

Fig. 9 sampled (a)voltage and (b)current,
(c)sampling signal, (d)parameter calculating signal

6. 결 론

본 연구에서는 위상제어 정류기시스템에서 예측 전류제어시에 파라미터 오차에 따른 전류응답특성을 개선하기 위해 온라인 파라미터를 추정기를 제안하였고, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 전류제어 도중에 추정된 파라미터를 사용함으로써 이를 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] Shashikant Vhasure, Prakasha, Dr.T.Krishnan, "Fast Response Digital Speed and Current Regulators for Thyristor Fed Reversible Regenerative DC Motor Drives," Power Electronics, Drives and Energy systems for industrial Growth, International Conference, Vol. 2 pp. 764~769, 1996.

[2] R. Kennel, D. Schroder, "PREDICTIVE CONTROL STRATEGY FOR CONVERTERS," IFAC Control in Power Electronics and Electrical Drives, pp 415~422, 1983.
[3] Timothy D. Collings, William J.Wilson, "A Fast-Response Current Controller for Microprocessor-Based SCR-dc Motor Drives," IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 27, No. 5, pp. 921~927, 1991.