

제어전압제한을 이용한 지연시간보상 전류제어기

이진우, 강병희, 백상기, 민종진
 삼성종합기술원 System & Control Sector

Current controller using the modified delay compensator under the control input saturation

J. W. Lee, B. H. Kang, S. K. Baek, J. J. Min
 System & Control Sector, Samsung Advanced Institute of Technology

Abstract - This paper suggests the modified delay compensation scheme under the control input saturation in order to improve the control performance. This scheme uses the real estimated control input instead of the direct command control input. The simulation results show that this scheme can improve the current control performance under the delay time and the limited control input.

압과 d-q 상호간의 간섭항에 대한 전압을 보상하는 제어방식을 적용하여 식 (2)와 같은 단일변수 상태방정식을 구한다[5].

$$\begin{aligned} e_d &= \omega L \cdot i_q + v_{ds} - u_d \\ e_q &= -\omega L \cdot i_d + v_{qs} - u_q \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 e_d, e_q 는 컨버터 출력전압, v_{ds}, v_{qs} 는 전원전압, i_d, i_q 는 전류, u_d, u_q 는 제어전압, ω 는 전원의 각주파수, 그리고 L, R 은 전원측 리액터의 인덕턴스 및 저항이다.

1. 서 론

마이크로 프로세서의 발달에 따라서 3상 전류제어형 인버터와 컨버터에 사용되는 전류제어기의 디지털화가 보편화 되고 있으며, 특히 동기좌표계를 채택한 전류제어기로서 PI제어기[1], 단일변수 상태제어기[2], 다변수 상태제어기[3], D-Q 상호간섭을 이용한 PI제어기[4] 등이 연구되었다. 이와 같은 디지털 제어기의 구현시 수반되는 제어연산시간, 전류측정시간 등에 의한 지연시간은 제어기의 성능을 떨어뜨리며, 특히 빠른 전류제어 응답을 얻기 위하여 제어기의 이득을 크게 설계한 경우에 그 영향이 크게 나타난다. 이와 같은 지연시간에 따른 영향은 지연시간을 줄이거나 제어이득을 축소하여 그 영향을 줄일 수 있으며, 또한 스미스 예측기(Smith-Predictor)와 같은 지연시간 보상법을 이용하여 보상할 수 있다[5], [6].

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L}i_d + \frac{1}{L}u_d \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R}{L}i_q + \frac{1}{L}u_q \end{aligned} \quad (2)$$

한편 전류제어기는 산업체에서 널리 사용되고 있는 비례적분제어기를 적용하기로 하고, 식 (2)의 PWM 컨버터 모델 특성과 직류링크 전압에 의해 제한되는 제어전압을 고려하여 비례제어기와 적분제어기를 다음과 같이 설계한다. 식 (3)은 식 (2)의 단일변수 상태방정식에 PI제어기를 적용한 미분방정식이다.

$$\begin{aligned} L \frac{d^2 i_d}{dt^2} &= -R \frac{di_d}{dt} + K_p \frac{d}{dt}(i_{d_ref} - i_d) + K_i \cdot (i_{d_ref} - i_d) \\ L \frac{d^2 i_q}{dt^2} &= -R \frac{di_q}{dt} + K_p \frac{d}{dt}(i_{q_ref} - i_q) + K_i \cdot (i_{q_ref} - i_q) \end{aligned} \quad (3)$$

본 논문에서는 PWM 컨버터와 같이 제어전압 제한이 있는 경우의 지연시간 보상기로서 제어명령 대신에 실제 인가되는 제어입력을 보상기에 이용하는 방법을 제안하고, PWM 컨버터의 전류제어기에 대한 시뮬레이션을 통하여 제안한 지연시간 보상기의 제어성능을 확인하고자 한다.

여기서 K_p, K_i 는 각각 비례제어기 및 적분제어기의 이득이며, i_{d_ref}, i_{q_ref} 는 각각 d축 및 q축의 기준전류이다.

2. 지연시간보상 제환전류제어기

비례제어기 이득은 빠른 전류응답을 얻도록 상태 테드비트 제어기를 이용하여 설계하면 식 (4)와 같다. 그리고 적분기 이득은 식 (3)에 대한 특성방정식과 일반적인 2차 시스템의 특성방정식을 비교하여 구하면 식 (5)와 같으며, 제동계수는 전달함수의 보드다이어그램을 이용하여 설계한다[5].

먼저 PWM 컨버터의 교류측에 대한 동기좌표계 다변수 상태방정식으로 부터 식 (1)과 같이 전원전

$$K_p = L/T_s - R \quad (4)$$

$$K_i = L \cdot (2 \cdot \zeta \cdot T_s)^{-2} \quad (5)$$

여기서 T_s 는 스위칭주기의 1/2인 샘플링주기, ζ 는 제동계수이다.

한편 컨버터에서 식 (4)의 비례이득은 저항값보다 매우 크므로 비례제어기에 의한 정상상태 제어 오차는 매우 작고, 또한 적분제어기에서 정상상태 오차가 없을 때의 출력은 시스템의 불확실성에 대한 보상제어 출력이다. 따라서 이와 같은 각 제어기의 특성을 이용하여 오차가 작은 경우에는 정상적인 적분제어기로 동작하고 오차가 클 때에는 적분동작을 하지 않고 다만 적분결과만을 출력하도록 하여 오차가 큰 과도상태에서도 적분결과를 적절히 이용할 수 있는 조건부 적분기로 적분제어기를 수정한다. 또한 이와 같은 제어기 설계 개념을 바탕으로 조건부 적분기의 전류오차 제한치를 적절히 선정함으로써 전류오차가 큰 과도상태에서 제어입력 포화에 따른 적분기의 와인드업(wind-up)현상을 피할 수 있다. 그림 1에 이와 같은 전류제어기를 나타내었으며, Mag_BPW는 블록 내부에 나타낸 그림과 같이 동작한다.

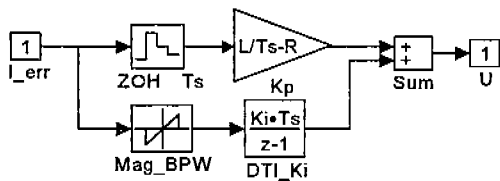


그림 1. 디지털 궤환전류제어기 구성도

한편 이와 같이 비례이득이 큰 경우에는 디지털 제어기의 구현시 수반되는 제어연산시간 등에 따른 지연시간에 의해서 제어특성이 떨어지기 때문에 적절한 대책을 수립하여야 한다. 그림 2는 단일변수 제어시스템에 지연시간(τ)을 보상하는 스미스 예측기를 나타낸 것으로 전달함수는 식 (6)과 같다. 식 (6)의 전달함수로 부터 제어기는 지연시간이 없는 경우와 같이 설계할 수 있고, 다만 출력이 지연시간 만큼 늦게 나타남을 알 수 있다.

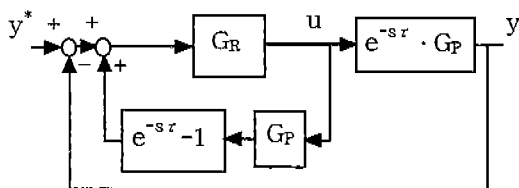


그림 2. 스미스 예측기의 구성도

$$\frac{y}{y^*} = \frac{G_R G_P}{1 + G_R G_P} \cdot e^{-s\tau} \quad (6)$$

본 논문에서는 이와 같은 단일변수 제어시스템에 적용된 스미스 예측기를 이용하여 지연시간을

보상하기로 한다. 앞에서 식 (1)과 같은 제어방법을 적용하여 다변수 상태방정식으로 부터 구한 식 (2)의 단일변수 상태방정식을 이용하면 그림 2처럼 스미스 예측기를 적용할 수 있다. 따라서 그림 1의 디지털 전류제어기에 식 (2)의 이산화 시스템을 이용하여 스미스 예측기를 적용하면 그림 3과 같다. 여기서 PWM 컨버터의 디지털 제어를 위한 전원 위상각 검출, 공간벡터 전압변조법의 구현, 전원 전압 및 전류의 측정, 동기좌표계 전류제어기의 연산 등의 실제 구현 방법을 고려하면 연산과 관련한 지연시간은 그림 3에 나타낸 것과 같이 한 샘플링주기로 볼 수 있으며, 전류측정과 관련한 부분은 프로그램상에서 샘플링시점을 적절히 선정하면 무시할 수 있다.

한편 컨버터의 제한된 직류링크 전압에 의한 제어전압제한으로 전류오차가 큰 과도상태에서는 제어전압이 이상적으로 구현되지 않고 제한된다. 따라서 실제 구현되는 제어전압을 이용하는 방법으로 스미스 예측기를 수정한 지연시간보상 궤환전류제어기는 그림 4와 같다.

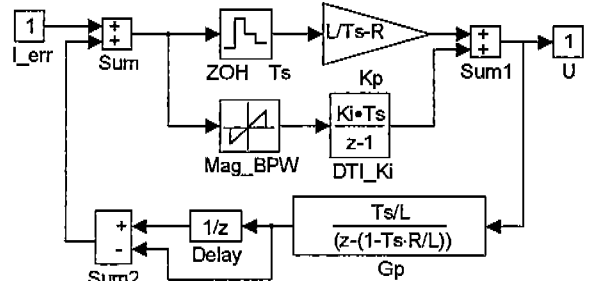


그림 3. 지연시간보상 궤환전류제어기

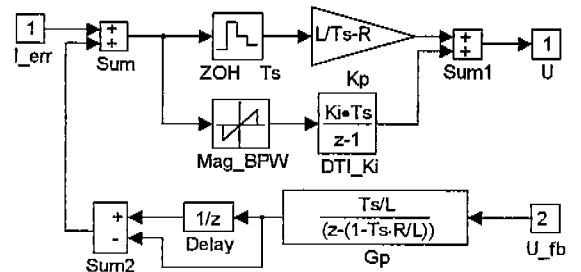


그림 4. 제어전압제한을 이용한 지연시간보상 궤환전류제어기

3. 시뮬레이션 결과

그림 5는 공간벡터 전압변조법을 이용한 PWM 컨버터의 제어시스템을 Simulink/Matlab으로 모델링한 전체시스템 구성도이며, 주요부는 전류제어부(Current Controller), 공간벡터 전압변조부(SVPWM), 동기좌표계상에서 모델링한 교류측 회로부(System)의 세부부

이고, 직류링크 부분은 이상적인 것으로 가정하였다. 여기서 과변조 방법으로는 과변조시에 도 식 (1)의 보상전압을 이상적으로 구현할 수 있는 벡터과변조 방법을 채택하였으며[7], 그림 5에 제어전압제한을 이용하는 전류제어기에 사용하기 위한 궤환 제어전압(U_{dq_fb})을 나타내었다.

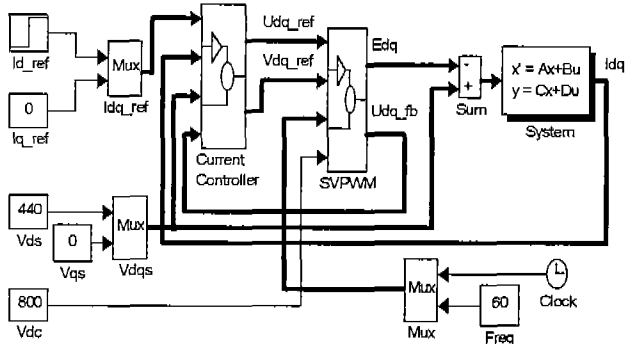


그림 5. 제어시스템의 Simulink 블록도

표 1은 유도전동기 구동시스템의 전원측 PWM 컨버터로 사용되는 시스템의 상수 및 제어기 이득으로 시뮬레이션에 사용한 상수값이다.

표 1. 시스템 상수 및 제어기 이득

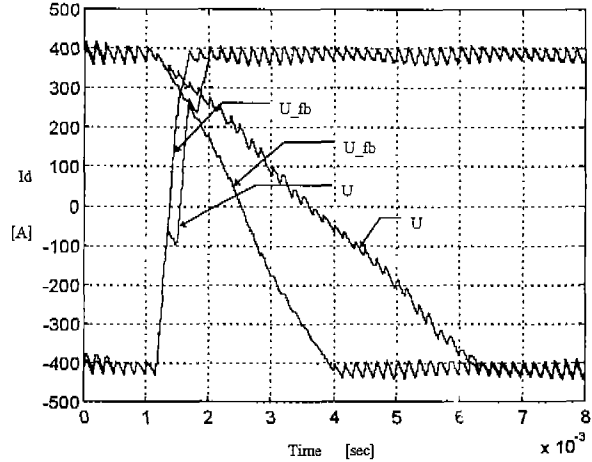
$L = 0.5[\text{mH}]$	$V_{dc} = 800[\text{V}]$	$f_{sw} = 3[\text{kHz}]$
$R = 2[\text{m}\Omega]$	$V_{ll} = 440[\text{V}]$	$K_p = 2.998$
$C = 27.2[\text{mF}]$	$P_{out} = 185[\text{kW}]$	$K_i = 2250$

한편 시뮬레이션에 사용한 전류오차 제한치는 $50[\text{A}]$ 로 선정하였으며, 전원전압은 측정오차가 있는 것으로 가정하여 정격전압의 1.1배를 전류제어기에서 사용하였다.

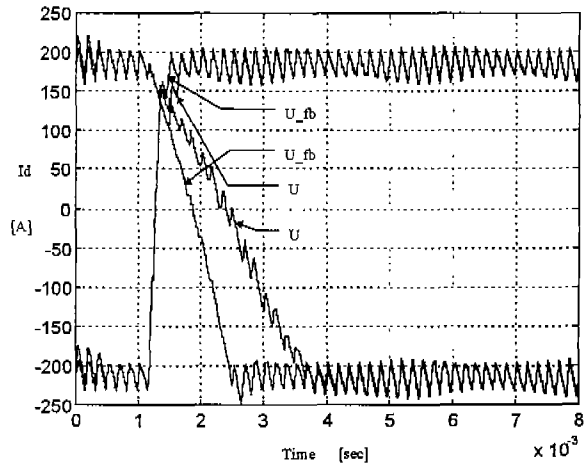
그림 6과 그림 7은 각각 그림 3과 그림 4에 대한 d축 및 q축 전류제어 시뮬레이션 파형을 비교하여 나타낸 것으로 한 샘플링주기의 지연에도 불구하고 양호한 전류제어 특성을 나타내고 있다. 그림 6에서 제어전압제한을 이용하는 방법이 보다 빠른 제어응답을 보이며, 특히 가용한 제어전압이 작은 경우에 응답특성의 개선정도가 현저하다. 그림 7은 d축 전류 변화시의 q축 전류파형으로서 과도상태에서 전류응답이 빠른 경우에 약간의 간섭이 발생하지만 전류응답이 느린 경우에는 간섭이 거의 발생하지 않으므로 식 (1)에 의한 비간섭제어가 양호하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 디지털 전류제어기의 구현시 수반되는 지연시간에 따른 제어기의 성능저하를 피



(a) 기준전류 계단변화: $400[\text{A}] \leftrightarrow -400[\text{A}]$



(b) 기준전류 계단변화: $200[\text{A}] \leftrightarrow -200[\text{A}]$

그림 6. d축 전류의 계단응답 시뮬레이션 파형(U : 전압제한 무이용, U_{fb} : 전압제한 이용, 오차제한치 = $50[\text{A}]$)

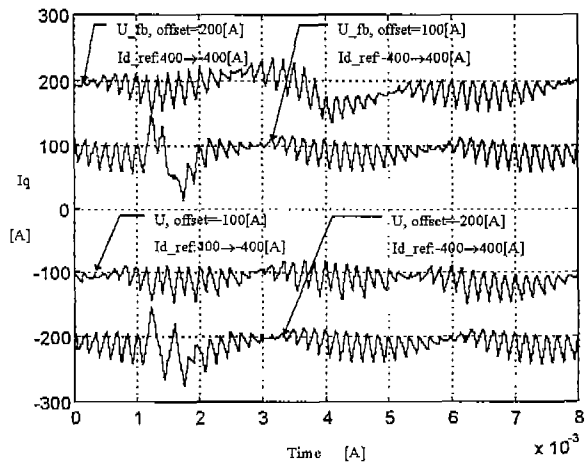


그림 7. d축 전류 변화시의 q축 전류 시뮬레이션 파형(U : 전압제한 무이용, U_{fb} : 전압제한 이용, 오차제한치 = $50[\text{A}]$, $I_{q_ref} = 0[\text{A}]$)

하기 위한 방법으로 스미스 예측기를 이용한 지연 시간 보상기를 적용할 때, 제어전압제한에 따른 영향을 최소화 함으로써 제어기의 성능을 향상시키고자 기존 스미스 예측기의 구조를 일부 수정한 지연시간보상 전류제어기를 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 지연시간보상 효과 및 개선된 전류제어 특성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, "A New Synchronous Current Regulator and an Analysis of Current-Regulated PWM Inverters", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-22, no. 4, pp. 678-690, 1986
- [2] Robert D. Lorenz and Donald B. Lawson, "Performance of Feedforward Current Regulators for Field-Oriented Induction Machine Controllers", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA-23, no. 4, pp. 597-602, 1987
- [3] D. C. Lee, S. K. Sul, M. H. Park, "High Performance Current Regulator for a Field-Oriented Controlled Induction Motor Drives", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 538-544, 1992
- [4] Jong-Woo Choi, Seung-Ki Sul, "Fast Current Controller in 3-Phase AC/DC Boost Converter Using d-q Axis Cross-Coupling", IEEE PESC Conf. Rec., pp. 177-182, 1996
- [5] Jin-Woo Lee, "Digital Current Controller with Smith-Predictor for PWM Converters", The Journal of the Korean Institute of Power Electronics, vol. 1, no. 1, pp. 7-11, 1996
- [6] O. J. M. Smith, "Closer Control of Loops with Dead Time", Chemical Engineering Progress, vol. 53, no.5, pp. 217-219, 1957
- [7] 이진우, 강병희, 백상기, 민종진, "공간벡터 펄스폭변조법의 새로운 과변조 연산 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 게재예정, 1997