

# 시간 지연 제어 기법을 이용한 새로운 데드 타임 보상법

김명복, 김현수, 윤명중  
한국과학기술원 전자전산학과

## A New Dead-Time Compensation Method using Time Delay Control Approach

Kim, Myung-Bok, Kim, Hyun-Soo, Youn, Myung-Joong  
Department of Electrical Engineering and Computer Science, KAIST

### ABSTRACT

A new dead time compensation method using time delay control approach is presented. The dead time in switching pattern cause the voltage distortion and it can be considered as the disturbance voltage.

In this paper, the disturbance voltage is estimated using time delay control and the estimated disturbance voltage is summed with voltage command in predictive current control by a feed-forward.

The proposed scheme is implemented on a PMSM and the effectiveness is verified through comparative simulation.

### 1. 서 론

최근에는 DSP등과 같은 고성능을 가진 연산처리 소자를 이용하여 교류 전동기의 제어를 디지털로 구현하고 있다. 그리고 IGBT와 같은 빠른 스위칭 시간을 갖는 소자를 사용해서 제어하고 있다. 하지만 스위칭 소자가 아무리 빨라도 턴-온과 턴-오프 시간과 같이 스위칭 특성을 가지게 된다. 그래서 제어할 때 스위칭 소자의 보호를 위해서 게이트 신호에 수  $\mu\text{sec}$ 의 데드타임을 주게 된다. 이러한 데드타임을 출력 전압에 왜곡을 주게 된다. 특히 낮은 전압 명령에서는 데드 타임 등으로 인해서 출력 전압이 거의 형성되지 않는다. 이러한 경우 교류 전동기의 저속 제어 시 치명적이다.

이러한 데드타임을 줄이기 위해서 많은 연구가 진행되어 왔다.<sup>[3]</sup> 이러한 데드타임에 의한 영향은 오프-라인으로는 힘들기 때문에 온-라인으로 해결하는 방법이 계속 연구되어 오고 있다. 하지만 온-라인으로 해결하고자 할 때는 추정 알고리즘이 상당히 복잡해진다. 추정 알고리즘 중에서

간단히 구현할 수 있으면서 강인한 특성을 갖는 추정 알고리즘이 바로 시간 지연 제어이다.

그래서 본 논문에서 2장에서 데드타임에 의한 영향과 시간 지연 제어와 영구 자석형 동기 전동기에 적용 방법을 소개한다. 그리고 4장에서는 모의 실험으로서 제안된 방법의 우수성을 입증한다.

### 2. 시간 지연 제어를 이용한 전류 제어

#### 2.1. 데드 타임 영향과 시간 지연 제어

영구 자석형 동기 전동기의 전류제어를 할 때 스위칭 패턴은 이상적인 스위칭 패턴에 Arm short 방지를 위해서 그림 1과 같이 데드 타임을 고려한 스위칭 패턴을 만들어 스위칭 소자의 게이트 신호로 사용한다. 즉, 한 상을 턴-온 시킬 경우 아래쪽 스위칭 소자를 켜주고, 턴-오프 시킬 경우는 그 반대의 방법으로 해서 Arm short를 방지한다.

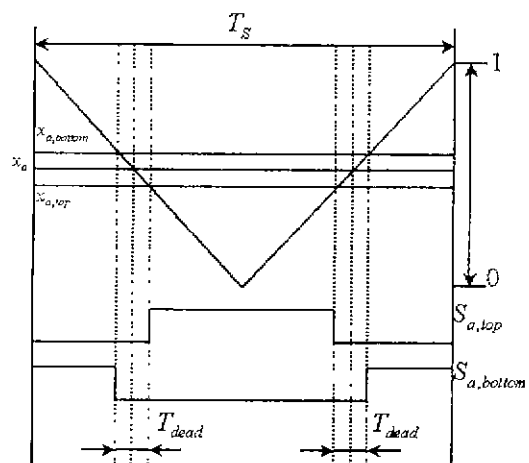


그림 1 데드타임을 고려한 스위칭 패턴

하지만 이 방법으로 하였을 때는 데드 타임의 영

향으로 출력전압의 왜곡을 발생시킨다. 이러한 왜곡된 출력 전압으로 인해서 상 전류의 왜곡을 유발한다.<sup>[8]</sup>

따라서 이러한 전류를 왜곡하는 왜곡된 출력전압 성분을 외란으로 간주하고 이 외란을 추정하는 방법을 시간 지연제어로 구현하고자 한다.

먼저 시간 지연 제어에 대한 설명으로 시간 지연 제어는 시스템 매개 변수의 변동이나 외란 등 알 수 없는 부분을 지연된 시간 전의 값으로 알아내는 방법이다. 제어하고자 하는 시스템을 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = f(x, t) + B(x, t)u + d(t) \quad (1)$$

여기서 각 부분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$x$  : 상태 변수,  $f(x, t)$  : 시스템 특성  
 $d(t)$  : 외란 부분,  $B(x, t)$  : 입력 행렬  
 $u$  : 입력 함수

또한 제어하고자 하는 모델은 식 (2)와 같이 비교적 간단한 선형 모델로 세울 수가 있다.

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m r \quad (2)$$

이 때 오차( $e_m = x_m - x$ )의 동특성을 다음과 같이 두고자 한다.

$$\dot{e}_m = A_m e_m$$

위와 같은 오차의 동특성이 나타나려면 제어하고자 하는 시스템 방정식은 알 수 있는 부분 ( $\hat{B}$ )과 알 수 없는 부분 ( $\hat{f}(x, t)$ )으로 다음 식(3)과 같이 분리할 수 있다.

$$\dot{x} = \hat{f}(x, t) + \hat{B}u \quad (3)$$

오차의 동특성 방정식은 다음 식(4)와 같이 주어진다.

$$\dot{e}_m = A_m e_m + [-\hat{f} + A_m x + B_m r - \hat{B}u] \quad (4)$$

이 때 오차의 동특성 방정식에서 제어 입력은 다음 식(5)과 같이 두면 오차는 원하는 동특성으로 제어가 된다.

$$u = \hat{B}^{-1} [-\hat{f}(x, t) + A_m x + B_m r] \quad (5)$$

그리고 행렬 B가 역행렬이 존재하지 않는 경우 입력은 다음 식(6)과 같이 들 수 있다.

$$u = \hat{B}^+ [-\hat{f}(x, t) + A_m x + B_m r] \quad (6)$$

$$\hat{B}^+ = (\hat{B}^T \hat{B})^{-1} \hat{B}^T$$

그리고 충분히 작은 지연 시간(L)에 대해서 시스템의 매개 변수는 거의 변하지 않는다는 가정 아래에서 다음 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{f}(x, t) \cong \hat{f}(x, t-L)$$

$$\hat{f}(x, t) = \dot{x} - \hat{B}u(t)$$

$$\cong \dot{x}(t-L) - \hat{B}u(t-L) \quad (7)$$

따라서 시간 지연 제어 입력은 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \hat{B}^+ [-\dot{x}(t-L) + \hat{B}u(t-L) + A_m x + B_m r]$$

$$= u(t-L) + \hat{B}^+ [-\dot{x}(t-L) + A_m x + B_m r] \quad (8)$$

## 2.2. 영구 자석형 동기 전동기에 적용

앞에서 설명한 시간 지연 제어를 영구 자석형 동기 전동기에 적용할 때는 제어기를 어떻게 구성하는지를 살펴보겠다.

먼저 영구 자석형 동기 전동기의 전기적 동특성을 나타내는 수학적 모델은 다음 식(9)과 같다.<sup>[1]</sup>

$$v_s = A_o i_s + L_{so} \dot{i}_s + d_o + f_s \quad (9)$$

여기서 각 부분은 아래와 같은 벡터로 나타낼 수 있다. 'o'는 공칭값(nominal value)이다. 공칭값으로 둔 부분은 앞에서 설명한 것 같이 수학적 모델링에서 알 수 있는 부분이다.

$$v_s = [v_{qs} \ v_{ds}]^T, \quad i_s = [i_{qs} \ i_{ds}]^T$$

$$f_s = [f_{qs} \ f_{ds}]^T, \quad d_o = [\lambda_{mo} \omega_r \ 0]^T$$

$$A_o = \begin{bmatrix} R_{so} & L_{so} \omega_r \\ -L_{so} \omega_r & R_{so} \end{bmatrix}$$

위의 식에서  $f_s$ 는 전동기의 수학적 모델링에서 알 수 없는 부분으로 외란 전압으로 간주해서 다음 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_s = \Delta A i_s + \Delta L_s \dot{i}_s + \Delta d + f_{dead} \quad (10)$$

여기서 각 부분은 시스템 매개변수의 오차와 데드 타임에 의한 외란 전압( $f_{dead}$ )으로 들 수가 있

다.

$$\Delta A = \begin{bmatrix} \Delta R_s & \Delta L_s \omega_r \\ -\Delta L_s \omega_r & \Delta R_s \end{bmatrix}$$

$$\Delta d = \begin{bmatrix} \Delta \lambda_m \omega_r \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Delta R_s = R_s - R_{so}$$

$$\Delta L_s = L_s - L_{so}, \quad \Delta \lambda_m = \lambda_m - \lambda_{mo}$$

그러면 외란 전압을 추정하기 위해서 충분히 작은 지연 시간( $L$ ) 동안 외란 전압이 변하지 않는다는 가정 하에서 다음 식(11)과 같이 둘 수 있다.

$$\hat{f}_s(t) \cong f_s(t-L)$$

$$= v_s(t-L) - A_o i_s(t-L)$$

$$- L_{so} \dot{i}_s(t-L) - d_o \quad (11)$$

이러한 방법으로 추정된 외란 전압은 예측형 전류 제어기에 피드-포워드(feed-forward) 부분으로 추가하여서 나타낼 수 있다. 하지만 이 부분을 그대로 사용할 경우에는 추정식에서 전류의 미분하는 부분이 있으므로 전류 값이 변동할 때는 시스템이 불안정 해 질 수 있다. 그래서 이 추정된 부분을 저역 통과 여파기(Low Pass Filter)를 거친 값을 사용한다. 디지털로 구현한 저역 통과 여파기는 다음 식(12)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 ( $a$ 는  $2\pi f_c$ 이고  $f_c$ 는 차단 주파수이다.)

$$H(z) = \frac{aT_s}{1 - e^{-aT_s} z^{-1}} \quad (12)$$

따라서 제안된 방법으로 구현한 변형된 예측형 전류 제어기는 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_s^*(k) = A_o i_s(k) + (L_{so}/T)[i_s^*(k+1) - i_s(k)]$$

$$+ d_o + \hat{f}_s(k) \quad (13)$$

### 3. 모의 실험

제안된 방법의 우수성을 입증하기 위해서 컴퓨터 모의 실험을 이용하여서 기존의 예측형 전류 제어 방법과 데드 타임을 보상한 제어기를 비교하여 실험하였다. 실험에서 데드 타임( $T_{dead}$ )은  $4[\mu sec]$ 이다.

다음 표 1은 모의 실험에서 사용한 영구 자석형 동기 전동기의 시스템 상수이다.

$R_s$	4.9[ $\Omega$ ]	$t_m$	50[msec]
$L_s$	6.9[mH]	$P$	8
$\lambda_m$	0.06667[Vsec]	$J$	0.000172[kgm <sup>2</sup> ]

표 1 영구자석형 동기 전동기의 시스템 상수

이러한 영구 자석형 동기 전동기를 이용하여서 모의 실험한 전류 파형은 다음 그림 2와 같이 나타난다. 그림 2는 데드 타임으로 인하여 발생하는 왜곡된 전류 파형이다.

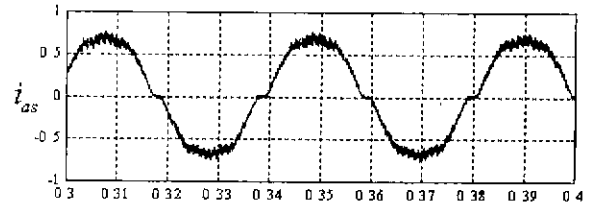


그림 2 데드 타임의 영향을 고려하지 않은 경우

그림 2에서 살펴보면 전류 파형의 한주기에 왜곡된 부분이 6번 나타나게 되는데 데드타임을 a상 전류 값이 0부근에서 나타난다. 3상이므로 b상, c상 전류가 0되는 부분에서도 영향을 받으므로 총 6번 나타나게 된다.

그림 3은 추정된 q축 외란 전압이다. 그리고 그림 4는 추정된 d축 외란 전압이다. 이 추정된 외란 전압이 예측형 전류 제어기에 각각 q축과 d축 전압 명령에 추가하여 전압 명령을 만들어 낸다.

그림 5은 그림 3과 그림 4의 시간 지연 제어 기법으로 추정된 외란 성분을 전압 명령에 추가하여 제어한 전류 파형이다. 여기서는 데드타임에 의해 생기는 전류 왜곡이 없음을 알 수 있다.

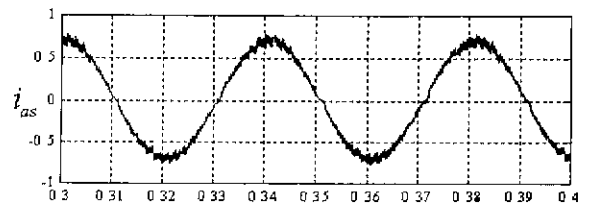


그림 3 데드타임을 보상한 경우(TDC)

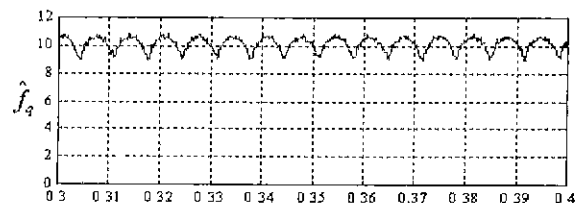


그림 4 시간 지연 알고리즘으로 추정된 q축 외란

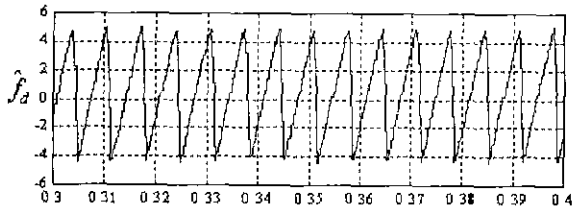


그림 5 시간 지연 알고리즘으로 추정된 d축 외란

#### 4. 결 론

본 논문에서 데드타임에 의한 출력 전압의 왜곡을 보상하는 새로운 방법을 제시하였다. 데드타임에 의한 영향에 의한 출력 전압의 왜곡을 외란 전압으로 간주하고 시간 지연 제어를 통해서 외란 전압을 추정한다. 추정된 외란 전압 부분을 예측형 전류 제어기의 전압 명령 부분에 피드 포워드 부분으로 추가한다. 이러한 전압 명령으로 제어했을 때 출력 전류의 왜곡이 사라지는 것을 모의 실험으로 입증하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P. C. Krause, "Analysis of Electric Machinery" McGraw-Hill, 1987.
- [2] K.H. Kim, I.C. Baik and M.J. Youn, "Simple and robust digital current control scheme of permanent magnet synchronous motor using time delay control approach" *Electronics Letters*, Vol.35, No.12, pp.1027-1028, 1999.
- [3] 김현수, 문형태, 김명복, 윤명중, "외란관측기를 이용한 새로운 데드타임 보상법", *전력전자학술대회논문집*, pp.252-255, 1999.