

디지털 제어 교류 전동기 구동시스템의 전류 측정 오차 해석 및 보상

宋 丞 鎬, 崔 鐘 宇, 薛 承 基

Analysis and Compensation of Current Measurement Error in Digitally Controlled AC Drives

Seung-Ho Song, Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul

요 약

디지털 제어 방식으로 구동되는 모든 교류 전동기 벡터제어시스템의 근간을 이루는 전류 측정에 관한 문제를 다룬다. 일반적인 펄스폭 변조 방식 교류 전동기 구동 시스템에서 전동기 전류에 포함된 인버터 스위칭 노이즈를 없애기 위하여 저역 통과 필터를 사용하는데 이러한 필터는 필연적으로 측정된 신호의 시간 지연을 유발하게 된다. 따라서 샘플링한 전류값에는 기본파 성분 뿐만아니라 고조파 리플 성분이 포함된다. 본 논문에서는 3상 대칭 펄스폭 변조시 기준 전압 벡터의 위치에 따른 전류 샘플링 오차를 해석적으로 구하고 이러한 샘플링 오차를 최소화하기 위한 기법을 제안한다. 제안된 지연 보상 샘플링 기법을 사용하면 정상 상태 전류 측정 오차를 최소화할 수 있고 보다 정확한 토오크 제어가 가능하게 됨을 시뮬레이션과 실험을 통해 보였다.

ABSTRACT

This paper addresses the current measurement issue of all digital field oriented control of ac motors. The paper focuses on the effect of low-pass filter and also on the sampling of the fundamental component of the motor current. The low-pass filter, which suppresses the switching noise of the motor current, introduces variable phase delay according to the current ripple frequency. It is shown that the current sampling error consists of the fundamental component and high frequency ripple components. In this paper, the dependency of this current sampling error on the reference voltage vector is investigated analytically and a sampling technique is proposed to minimize the error. The work is based on the three phase symmetry pulse width modulation inverter driving an induction machine. With this technique, the bandwidth of current regulator can be extended to the limit given by the switching frequency of the inverter and more precise torque regulation is possible.

Key Words : AC motor drive system, Digital current control, Pulse width modulation, Current sampling

1. 서 론

최근들어 개발, 적용되고 있는 디지털 전동기 구동시스템은 주요 제어 기능이 소프트웨어로 구현되어 있다. 그중 하나가 전류제어기로서 교류 전동기 구동 시스템의 가장 핵심을 이루는 부분이다. 벡터 제어의 성능은

바로 이러한 전류제어기의 특성에 직접적인 영향을 받으므로 전류 제어기의 성능을 개선하려는 많은 시도가 있어왔다^[1~5]. 그러나 전류 측정을 위한 인터페이스 회로나 신호 처리기, 아날로그/디지털 변환기 등의 특성에 따른 전류 측정 오차에 관한 연구는 상대적으로 적었다^[6~8].

펄스폭 변조(Pulse Width Modulation, PWM) 방식 인버터의 출력 전압은 원하는 기본파 주파수의 전압 이외에 고조파 성분을 포함하고 있으며 따라서 고조파 전류 리플이 발생하게 된다. 이러한 고조파 전류 성분이 측정장치를 통해 입력되면 전동기 제어 성능을 저하시키게 된다. 즉 고조파 전류 리플로 인해 출력 전압 기준치에 왜곡이 발생하거나 전류 제어기의 응답성을 올리지 못하는 문제점이 있다. 그 결과 시스템의 동작 특성이 저하되고 제어 시스템의 안정 동작 영역이 축소되는 결과를 낳게 된다. 또한 측정된 전류에 포함된 저주파 오차 성분은 자속 기준 벡터 제어의 성능을 저하시키고 토오크 리플을 발생시킨다. 따라서 제어 시스템의 입장에서는 인버터에 의해 발생된 리플이 없는 기본파 성분만을 측정하는 것이 가장 바람직하다.

전류 측정시 고조파 성분을 제거하기 위한 노력은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 그 하나는 순시 샘플링에 의한 방법^[6]이고 또 다른 하나는 부분적으로 평균을 취한 값을 얻는 방법^[7]이다. 일정 스위칭 주파수 공간 벡터 PWM 방식에서는 참고 문헌^[6]에서 제안한 바와 같이 영벡터(zero vector)의 중간 지점에서 전류를 샘플링 하는 것에 의해 기본파 성분을 직접 샘플링 하는 것이 가능하다. 참고 문헌^[8]에서는 a상 전류와 b상 전류를 동시에 얻기 위하여 기준점의 전, 후에서 각 상 전류를 두번씩 샘플링 하는 방법을 제안하기도 하였다. 평균치 샘플링 방식은 추가적인 하드웨어를 필요로하며 한 샘플링 주기만큼의 시간 지연을 수반한다.

실제 적용에서는 스위칭 노이즈를 없애기 위해 저역 통과 필터를 사용하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 이러한 필터에 의해 발생하는 시간 지연이 전류 샘플링 오차에 미치는 영향을 해석하고 이러한 지연을 보상하는 샘플링 기법을 제안하였다. 또한 3상 대칭 PWM방법에 대하여 전압 기준 벡터에 따라 시간지연에 의한 전류 샘플링 오차를 해석적으로 계산하였다. 이러한 샘플링 오차 때문에 발생하는 토오크 제어 성능 저하 등의 영향을 검토하고 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 본 논문에서의 해석 결과와 제안된 샘플링 기법의 타당성을 확인하였다.

2. 저역 통과 필터의 특성

전류 변환 신호는 아날로그 차동 증폭기 및 저역 통과 필터 등으로 구성된 인터페이스 회로를 통해 입력된다. 디지털 제어 방식의 전형적인 전류 측정 회로

구성을 그림 1에 나타내었다. 또한 일반적으로 많이 사용되는 2차 저역 통과 필터의 회로도를 그림 2 (a)에 나타내었고, 5.1kHz의 차단 주파수를 갖는 버터워스(Butter worth) 필터에 대한 주파수 응답 특성을 그림 2(b)와 (c)에 나타내었다. 여기서 위상각 지연을 해당 주파수를 고려하여 시간 지연값으로 변환하여 표시하였다. 이러한 시간 지연값은 차단 주파수부근 까지의 일정한 상수값을 보이다가 주파수가 높아질수록 급격히 저하되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 전류 샘플링시 에일리어싱 억제(anti-aliasing) 효과는 기대하기 어렵다. 왜냐하면 PWM 스위칭 주파수의 반보다 낮은 차단 주파수를 선택할 경우 제어주기에 대하여 지나치게 긴 시간 지연이 발생하기 때문이다. 3상 공간 벡터 PWM의 경우 대표적인 전류 리플 주파수는 스위칭 주파수의 2배에 해당하는 값이다. 해석을 간단하게 하기 위해서 저역 통과 필터를 일정한 이득, G_d 와 2배 스위칭 주파수에서의 지연 시간 상수, T_d 를 가진 블록으로 간주한다.

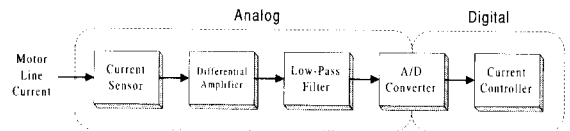


그림 1 전류 샘플링 과정
Fig. 1 Sampling procedure of currents.

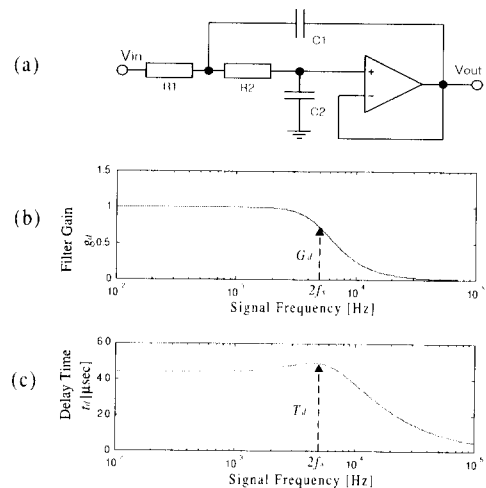


그림 2 2차 저역 통과 필터의 특성 (a)회로 구성 (b) 이득 (c) 위상 지연에 의한 시간지연
Fig. 2 Characteristic of a 2nd order low-pass filter. (a) Configuration, (b) Gain, and (c) Delay time due to phase lag.

$$V_{out}(t) \approx G_d V_{\in}(t - T_d) \tag{1}$$

3. PWM 기법과 전류 샘플링

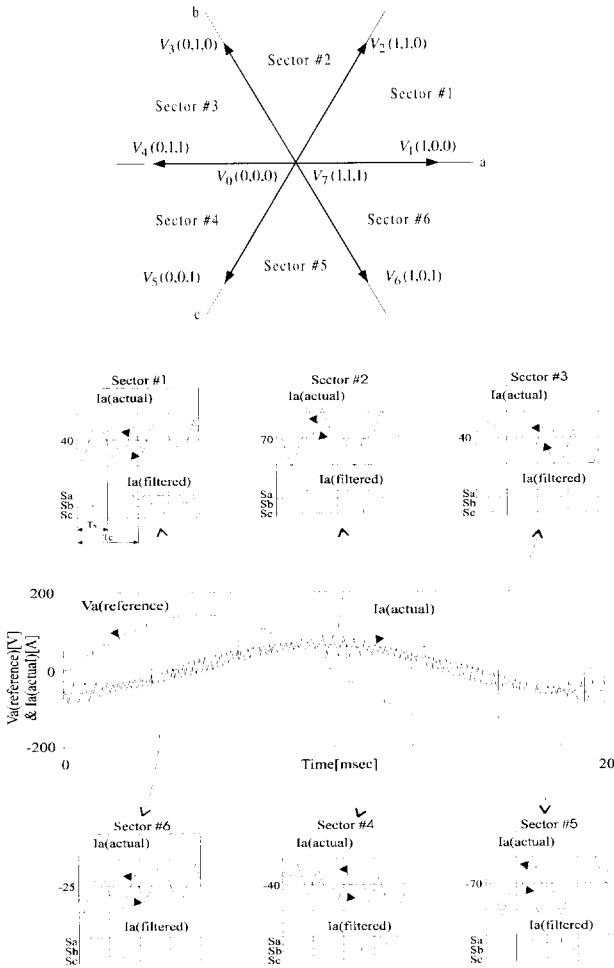


그림 3 출력 주파수 50Hz 운전시 각 섹터별 PWM 신호와 전동기 전류 그리고 필터된 전류 (스위칭 주파수 2.5kHz 필터 차단 주파수 5.1kHz인 경우 시뮬레이션 결과)

Fig. 3 PWM signals, motor current, and filtered current at each sector during 50 Hz operation (Simulation with the switching frequency of 2.5kHz and the filter cut-off frequency of 5.1kHz.).

그림 3에서는 3상 공간 벡터 PWM의 스위칭 패턴에 따라 각 섹터마다 발생하는 리플 전류의 형태를 보이고 있다. 고성능 디지털 교류 전동기 구동 시스템에서 전류 리플을 감소시키고 빠른 제어 응답성을 얻기 위하여 전류 샘플링 및 제어 알고리즘을 한 스위칭 주

기, T_s 내에서 두 번 수행하는 경우가 많다(제어 주기: T_c). 실전으로 표시된 것은 실제 전동기 전류이고 점선은 지역 통과 필터의 출력 신호를 나타내고 있다. 실제 전류의 파형이 복잡하게 다양한 주파수 성분을 포함하고 있으므로 필터를 거친 출력도 다양한 이득과 시간 지연을 보이고 있다.

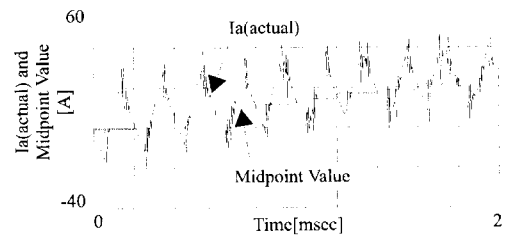
PWM 펄스 패턴에 따라 영벡터의 중간 지점에서 전류를 샘플링하면 기본과 성분의 전류를 얻을 수 있다. 그러나 실제 전류는 지역 통과 필터를 거쳐 샘플링 되므로 PWM 영벡터의 중간 지점에서 샘플링 하면 샘플링 전류는 기본과 성분 이외의 값을 가지게 된다. 이와 같이 전류 샘플링 오차를 샘플링 전류와 기본과 전류간의 차이라고 정의한다. 따라서 샘플링 시점을 잘 정하는 것이 샘플링 오차를 최소화하기 위해 매우 중요하다.

그림 4에는 실제 실험 장치에서 실제 전동기 전류와 필터된 전류 및 샘플링된 전류를 확대하여 관찰한 실험 파형을 보였다. 그림 4 (a) 맨 위에는 실제 전류와 제로 벡터 중간에서 샘플링된 전류값을 함께 보였고, 가운데에는 필터된 전류와 그 전류의 중간점 샘플링값을 보였다. 맨 아래에는 실제 전류 중간점 샘플링값과 필터된 전류 샘플링 값을 함께 비교 하였다. 그림에서 보듯이 PWM의 on모드와 off모드의 리플 전류 형태가 다르며 그에 따라서 샘플링된 전류에도 고조파 리플이 포함되게 된다. 그림 4 (b)에는 필터된 전류를 필터 지연 시간만큼 지연시켜 샘플링한 경우에 샘플링된 전류가 실제 전류의 중간값에 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 전류 샘플링 오차 해석

만일 필터된 전류가 제로 벡터 중간점으로부터 T_{ds} 만큼 시간 지연을 가지고 샘플링 되었을 때, 실제 아날로그 회로의 지연 시간, T_d ,와 보상을 위한 지연 시간, T_{ds} 사이에 다음과 같은 오차가 존재하게 된다.

$$\Delta T_d = T_d - T_{ds} \tag{2}$$



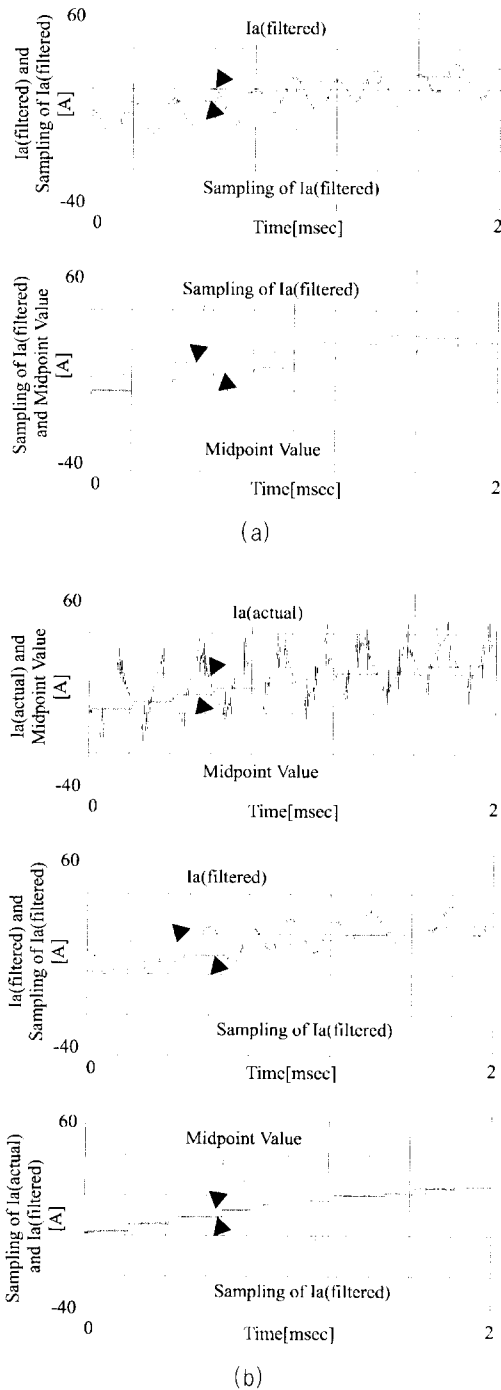


그림 4 실제 전동기 전류와 필터된 전류의 샘플링 (실험) (a) 시간 지연 없이 샘플링한 경우 (b) 90° 지연을 주어 샘플링한 경우

Fig. 4 Sampling of actual motor current and filtered current (experiment). (a) Without delayed sampling. (b) With 90° delayed sampling.

다음과 같은 가정하에 전류 샘플링 오차는 인가되는 전압 벡터의 값과 PWM 변수들로부터 직접 계산되어 질 수 있다.

- 고정자 저항의 전압 강하는 누설 인덕턴스, σL_s 에 의한 전압강하에 비해 작은 값으로 무시할 만하다.
- 상전압 기준값은 $V_a^* = (V_{1a} T_1 + V_{2a} T_2) / T_s$ 로서 한 샘플링 주기동안 일정하다.
- 필터의 이득, G_d , 와 시간 지연, T_d 는 식 (1)과 같이 일정하다.

그림 5 (e)에서 네 가지 전형적인 전압 벡터가 표시되어 있고 각각은 그림 5 (a), (b), (c) 와 (d)의 전압 기준 벡터에 해당한다. 그림 5에서는 보상을 위한 샘플링 지연 시간, T_{ds} 는 0이라고 가정하였고, 이것은 본래의 실제 전류를 $\Delta T_d = T_d$ 시간만큼 미리 샘플링하는 것과 등가로 볼 수 있다.

A. 사례 1 : “On” 과 “Off” 모두 제로 벡터 중간에서 샘플링 하는 경우

제로 벡터인가 시간의 길이가 충분히 길어서 샘플링 지연 시간 오차보다 큰 경우, 즉, $(|\Delta T_d| < \frac{T_0}{2})$ 인 경우에는, on 과 off 모드에서 샘플된 전류의 고조파 성분이 같은 값을 갖는다. 따라서 그 값들의 평균값, $I_{h_average}$ 또한 같은 값을 가지며 $I_{h_on} = I_{h_off}$ 이 되고 그 값을 식(3)에 표시한 바와 같이 필터 이득과 지연 시간 오차에 따라 계산될 수 있다. 그림 5 (a)에 이와 같은 고조파 전류의 모양을 PWM 패턴과 함께 나타내었다.

$$I_{h_on} = I_{h_off} = G_d \times \frac{V_a^* \times |\Delta T_d|}{\sigma L_s} \times \text{sgn}(\Delta T_d) \quad (3)$$

여기서

I_{h_on}, I_{h_off} : 각각 “on” 과 “off” 모드에서 샘플된

a상 전류의 고조파 성분 오차

G_d : 주파수 $2f_s$ 에서의 필터 이득 주파수

σL_s : 고정자 과도 누설 인덕턴스

V_a^* : a상 기준 전압 이다.

$$I_{h_average} = G_d \times \frac{V_a^* \times |\Delta T_d|}{\sigma L_s} \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (4)$$

$$I_{h_ripple} = 0. \quad (5)$$

B. 사례 2 : "On" (또는 "Off") 모드에서 첫 번째 유효 벡터 중간에서 샘플링 하는 경우

한편, 그림 5 (b)의 경우는 샘플링 지연 시간오차가 제로 벡터인가 시간보다 긴 경우 ($|\Delta T_d| > \frac{T_0}{2}$), 샘플링하는 시점에서 인가되는 전압 벡터의 크기가 다르므로, "on"모드에서 샘플링된 고조파 전류, I_{h_on} 는 "off"모드에서 샘플링된 고조파 전류, I_{h_off} 와 달라지게 된다. 이와 같은 경우 각 모드의 전류 오차는 식 (6), (7)과 같이 표현되고 그 평균값은 식 (8), 그 차이값은 식 (9)와 같다.

$$I_{h_on} = \frac{G_d}{\sigma L_s} \times \left(V_a^* \frac{T_0}{2} + (V_{2a} - V_a^*) \times \left(\frac{T_0}{2} - |\Delta T_d| \right) \right) \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (6)$$

$$I_{h_off} = \frac{G_d}{\sigma L_s} \times \left(V_a^* \frac{T_0}{2} + (V_{1a} - V_a^*) \times \left(-\frac{T_0}{2} - |\Delta T_d| \right) \right) \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (7)$$

$$I_{h_average} = \frac{G_d}{\sigma L_s} \times \left(V_a^* \Delta T_d + \frac{(V_{2a} + V_{1a})}{2} \times \left(\frac{T_0}{2} - |\Delta T_d| \right) \right) \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (8)$$

$$I_{h_ripple} = \frac{G_d}{\sigma L_s} \times (V_{2a} - V_{1a}) \times \left(\frac{T_0}{2} - |\Delta T_d| \right) \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (9)$$

C. 사례 3 : "On" 모드에서 두 번째 유효 벡터 중간에서 샘플링 하는 경우

그림 5 (c)는 $|\Delta T_d| > \frac{T_0}{2} + T_1$ 인 경우이고 그림 5 (d)는 $|\Delta T_d| > \frac{T_0}{2} + T_2$ 인 경우로서 그림 5(e)에 표시한 것과 같이 전압 기준 벡터의 크기가 크고 위상이 기본 벡터 부근에 위치한 경우가 이러한 예에 속한다. 이 때 전류오차는 식(10)과 (11)에 나타내었고, 평균값과 차이값은 (12)과 (13)에 각각 보였다.

$$I_{h_on} = \frac{G_d}{\sigma L_s} \times \left(V_a^* \frac{T_0}{2} + (V_{2a} - V_a^*) \times \left(\frac{T_0}{2} - |\Delta T_d| \right) \right) \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (10)$$

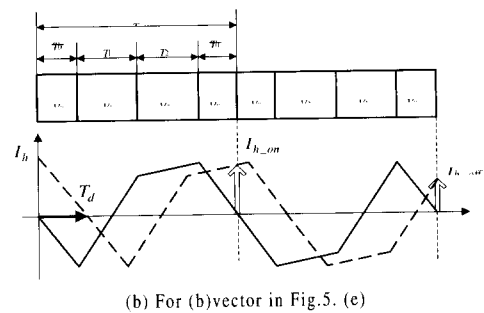
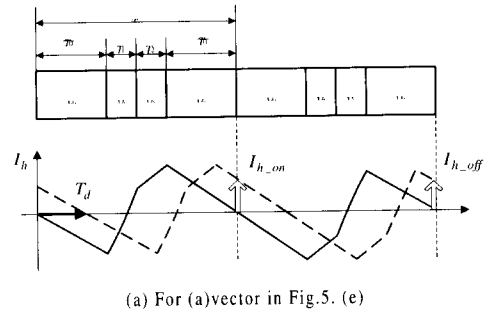
$$I_{h_off} = \frac{G_d}{\sigma L_s} \times \left(V_a^* \frac{T_0}{2} + (V_{1a} - V_a^*) (-T_1) + (V_{2a} - V_a^*) \left(\frac{T_0}{2} - |\Delta T_d| + T_1 \right) \right) \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (11)$$

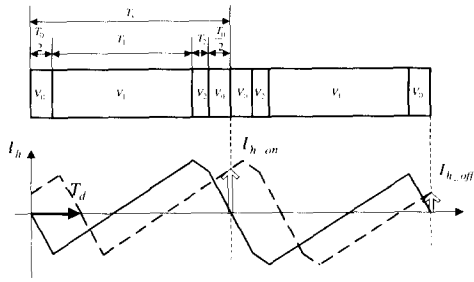
$$I_{h_average} = \frac{G_d}{\sigma L_s} \times \left(V_a^* \Delta T_d + V_{2a} \left(\frac{T_0}{2} - |\Delta T_d| + \frac{T_1}{2} \right) - V_{1a} \frac{T_1}{2} \right) \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (12)$$

$$I_{h_ripple} = \frac{G_d}{\sigma L_s} \times (V_{1a} - V_{2a}) \times T_1 \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (13)$$

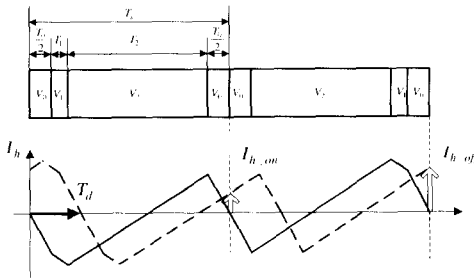
D. 사례 4 : "Off" 모드에서 두 번째 유효 벡터 중간에 샘플링 하는 경우

그림 5 (d)의 경우 전류 오차는 (c)의 경우와 마찬가지로 표시될 수 있고, 평균 전류와 리플 전류값은 각각 식 (14)와 (15)처럼 계산된다.

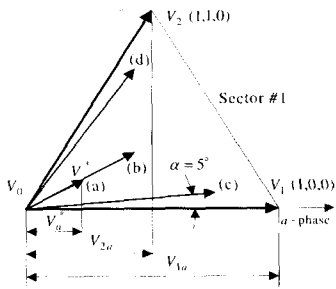




(c) For (c)vector in Fig.5. (e)



(d) For (d)vector in Fig.5. (e)



(e)

그림 5 네가지 전압 기준 벡터에 따른 등가 전류 샘플링 오차의 계산

- (a) $|V^*| = 50\text{volts}, \alpha = 30^\circ$,
- (b) $|V^*| = 100\text{volts}, \alpha = 30^\circ$,
- (c) $|V^*| = 150\text{volts}, \alpha = 5^\circ$,
- (d) $|V^*| = 150\text{volts}, \alpha = 55^\circ$,
- (e) 기준 전압 벡터

Fig. 5 Equivalent sampling of harmonic a-phase currents in four cases of voltage vector.

- (a) $|V^*| = 50\text{volts}, \alpha = 30^\circ$,
- (b) $|V^*| = 100\text{volts}, \alpha = 30^\circ$,
- (c) $|V^*| = 150\text{volts}, \alpha = 5^\circ$,
- (d) $|V^*| = 150\text{volts}, \alpha = 55^\circ$,
- (e) Reference voltage vectors

$$I_{h_average} = -\frac{G_d}{\sigma L_s} \times \left(V_{d1}^* \Delta T_d + V_{1a} \left(\frac{T_0}{2} - |\Delta T_d| + \frac{T_2}{2} \right) - V_{2a} \frac{T_2}{2} \right) \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (14)$$

$$I_{h_ripple} = -\frac{G_d}{\sigma L_s} \times (V_{1a} - V_{2a}) \times T_2 \times \text{sgn}(\Delta T_d). \quad (15)$$

그림 6에는 전압 기준 벡터가 (a) 50volts, (b) 100volts, 그리고 (c) 150volts 인 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과를 보였다. 시뮬레이션과 실험에 사용한 유도전동기와 인버터 시스템의 상세는 부록에 정리되어 있다. A-상 전압 기준값, 필터링된 전류, 샘플링된 전류, 수식에 의해 계산된 고조파 전류 및 그 평균값, 차이값등을 차례로 보이고 있다. 그림 6 (c)에서 보인 것처럼 전압 기준값이 증가할수록 고조파 전류의 평균값은 상전압 기준과 동상을 이루며 기본과 성분 뿐만 아니라 고조파 성분도 포함하고 있다.

리플 전류, $I_{h_ripples}$ 는 “on”모드와 “off” 모드의 고조파 전류값의 차이, $I_{h_on} - I_{h_off}$ 를 나타낸 것으로서 고조파 전류의 리플 크기에 해당하는 값이다. 이 값은 I_{h_ripple} 제로 벡터의 인가 시간이 보상을 위한 지연 시간 보다 긴 경우, $(|\Delta T_d| < \frac{T_0}{2})$, 에는 0이 된다. 또한 이 값은 기본과 한 주기에 두번 2번 섹터와 5번 섹터 영역에서 큰 값을 나타내는 데 그 이유는 유효 벡터의 크기 차, $V_{1a} - V_{2a}$ 가 다른 구간에 비해 두배가 되기 때문이다.

그림 7 (a)에는 $I_{h_average}$ 의 주파수 스펙트럼 분석 결과를 상전압 크기에 대하여 나타내었다. 이와 같은 저주파 전류 샘플링 오차는 기준 토크와 실제 발생 토크간에 오차를 일으키게 된다. 상전압 기준의 크기가 증가함에 따라 기본과 전류 오차가 증가하다가 90V 이상에서는 사례 2에 해당되어 전류 오차에 5고조파, 및 7고조파성분이 포함되고 기본과 성분의 크기는 오히려 감소하고 있다. 이러한 사실은 그림 6 (b)와 (c)의 $I_{h_average}$ 를 비교하여 보아도 알 수 있다.

I_{h_ripple} 는 그림 7 (b)에 보인 것과 같이 일정 전압 이상에서 선형적으로 증가하며, 이와 같이 샘플링된 전류에 포함된 리플은 특히 높은 출력 전압 영역에서 전류 제어의 응답 주파수를 제한하는 원인이 된다.

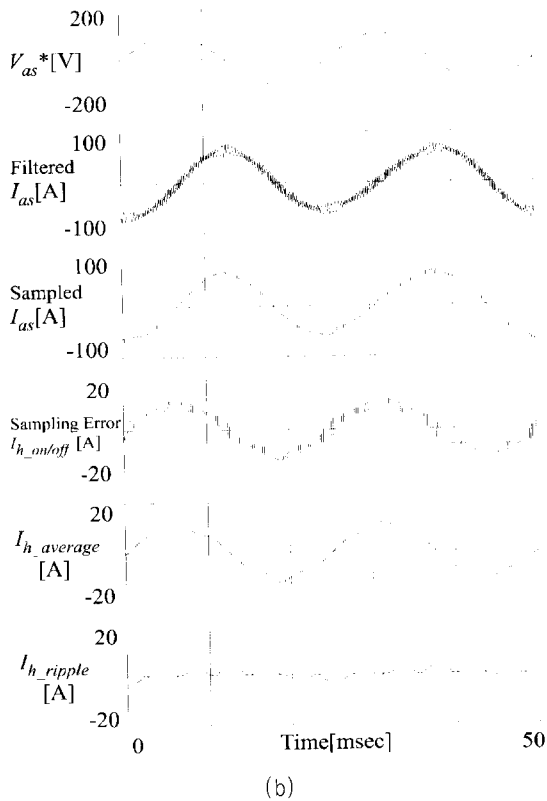
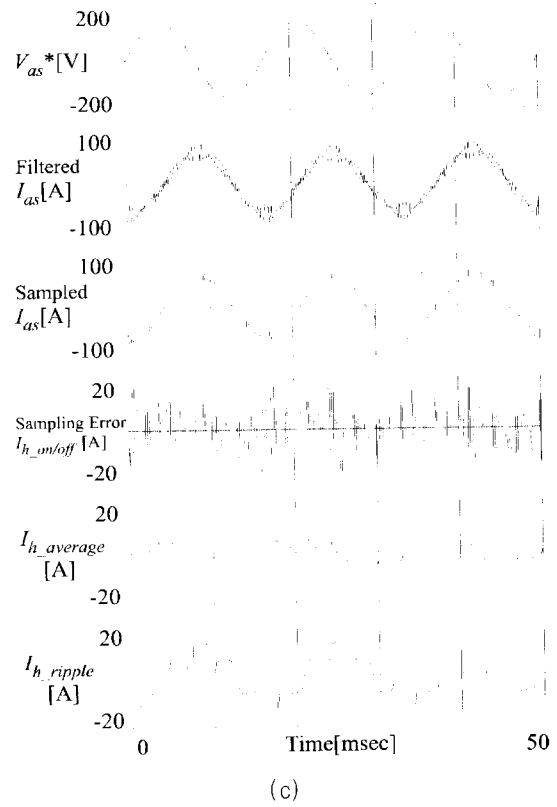
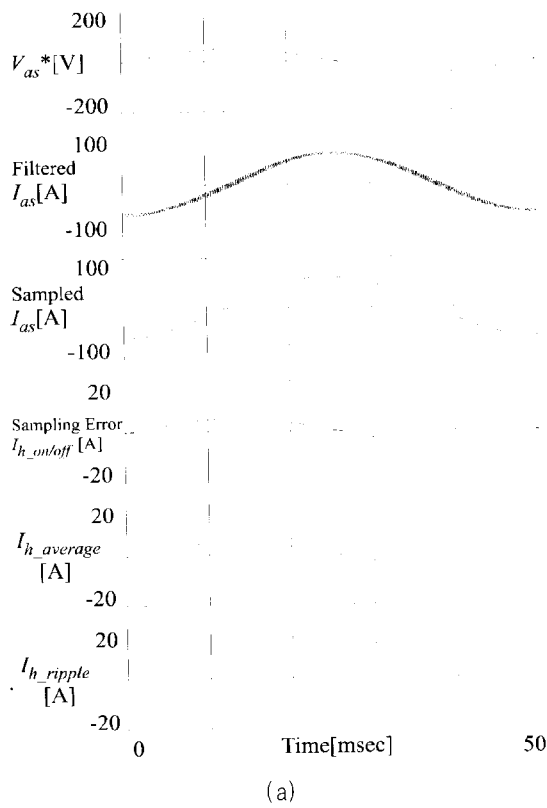


그림 6 V/f 일정 제어시 고조파 전류

(a) 기준 전압 50볼트 (b) 기준 전압 100볼트
 (c) 기준 전압 150볼트 일 때 위로부터 a상 전압 기준값, 필터된 전류, 샘플링된 전류, 계산된 전류 샘플링 오차, 오차의 평균, 오차의 리플 (시뮬레이션)

Fig. 6 Harmonic currents in constant V/f operation of (a) 50, (b) 100, and (c) 150 volts(simulation). From top to bottom, a-phase voltage reference, filtered a-phase current, sampled a-phase current, calculated current sampling error, average of the error, and ripple of the error.

그림 8에 보인 실험 결과는 그림 6의 시뮬레이션과 동일한 조건에서 얻은 것으로 시뮬레이션과 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 각 그림의 맨 아래쪽에 표시한 전류 샘플링 오차는 필터링하지 않은 전류를 샘플링한 값과 필터링 한 전류의 샘플링 값의 차이를 구한 것이다. 실험 과정에서 전류의 왜곡은 실제 상황에서 존재하는 데드 타임과 영전류 클램핑과 같은 비선형성에 의해 나타나는 현상이다. 전압 50 볼트에서 나타난 약간의 전류 리플은 필터 모델링의 부정확성 때문에 생긴 것으로 보인다. 전압이 증가할수록 필터 지연에 의

해 발생하는 전류 샘플링 오차가 더욱 심해지는 것을 알 수 있다.

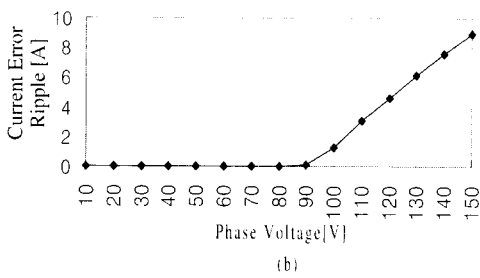
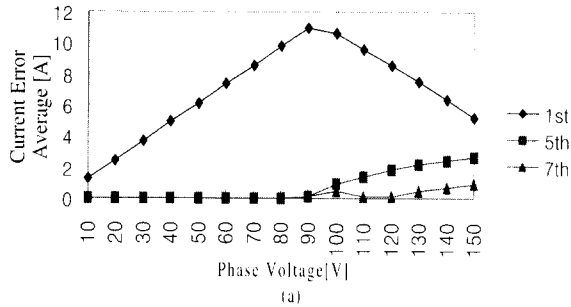


그림 7 샘플링 지연이 없는 경우 상전압에 대한 전류 샘플링 오차 (a) 전류 샘플링 오차 평균값, $I_{h_average}$ 의 주파수 분석. (b) 전류 샘플링 오차 리플값, I_{h_ripple}

Fig. 7 Current sampling error against phase voltage without sampling delay. (a) FFT result of current error average. $I_{h_average}$
(b) Average of current error ripple, I_{h_ripple}

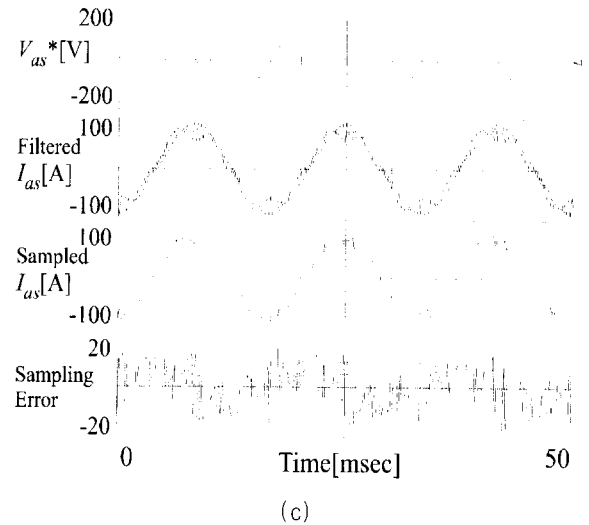
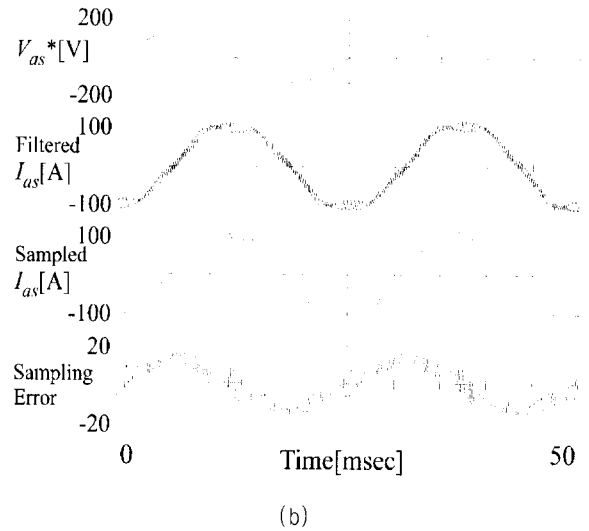
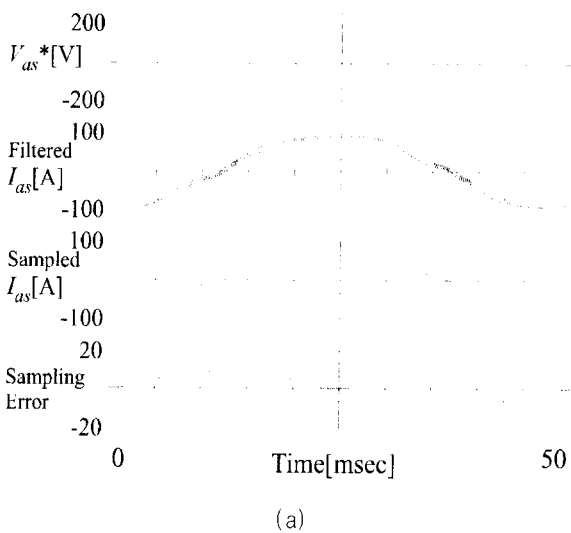


그림 8 V/f 일정 제어시 고조파 전류 (a) 기준 전압 50볼트 (b) 기준 전압 100볼트 (c) 기준 전압 150볼트 일 때 위로부터 a상 전압 기준값, 필터된 전류, 샘플링 된 전류, 측정된 전류 샘플링 오차, 오차의 평균, 오차의 리플 (실험 결과)

Fig. 8 Harmonic currents in constant V/f operation of (a) 50, (b) 100, and (c) 150 volts (experiment). From top to bottom, a-phase voltage reference, filtered a-phase current, sampled a-phase current, and measured current sampling error.

그림 9에는 상전압 기준치가 150V로 고정되어 있을 때 샘플링 지연 시간을 변화시키면서 전류 샘플링 오차를 계산한 결과를 나타내고 있다. 그림 9의

왼쪽 모서리 값은 지연 보상이 없는 경우로서 그림 7 (a)의 오른쪽 끝에 나타난 상전압 기준 150V인 경우에 해당한다. 그림 9에서 샘플링 지연시간의 크기가 실제 필터의 지연시간의 70%~130% 부근인 경우에는, 전류 샘플링 오차에 5 고조파 또는 7고조파 성분은 없고 기본과 성분만이 지연 시간 오차에 비례하여 선형적으로 존재함을 알 수 있다. 실제로 하드웨어 필터의 지연 시간은 전류에 포함된 주파수 성분이 다양하므로 일정한 상수값 T_d 라고 보기는 어렵다. 또한 부품의 오차나 편차에 의해 아날로그 회로의 특성도 변화한다. 만일 샘플링 지연시간이 실제 지연시간보다 커지면(100% 이상) 샘플링 오차는 대칭적으로 증가하고 그 위상은 상전압 기준과 반대로 180°의 위상차를 갖게 된다.

그림 10의 실험 결과도 이와 같은 형태를 보이고 있다. 그림 10(a)는 50Hz 운전중에 지연 보상을 하지 않고 전류를 샘플링한 결과이다. 아날로그 필터 회로에 의해 필터링한 전류와 샘플링된 전류를 동시에 보였고, 전류 샘플링 오차는 기본과 성분과 리플 성분을 포함하고 있다. 전류 샘플링 오차의 평균 값은 a상 전압과 동상이고 리플성분은 스위칭 주파수로 진동하고 있다. 1부터 6까지의 섹터 번호는 전압 섹터의 위치를 나타내며 일정한 위상각을 갖는 신호 포착을 위한 기준으로 사용되고 있다. 그림 (b)는 100% 지연된 샘플링의 경우이고 그림 (c)는 140% 지연된 샘플링을 했을 때로서 전류 오차가 상전압 기준과 위상이 반대이다.

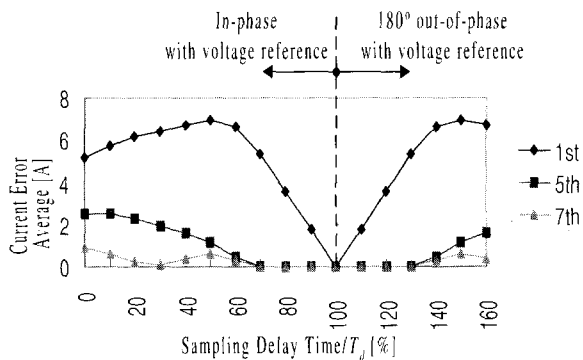


그림 9 샘플링 지연 시간에 대한 전류 샘플링 오차
Fig. 9 Current sampling error against sampling delay time.

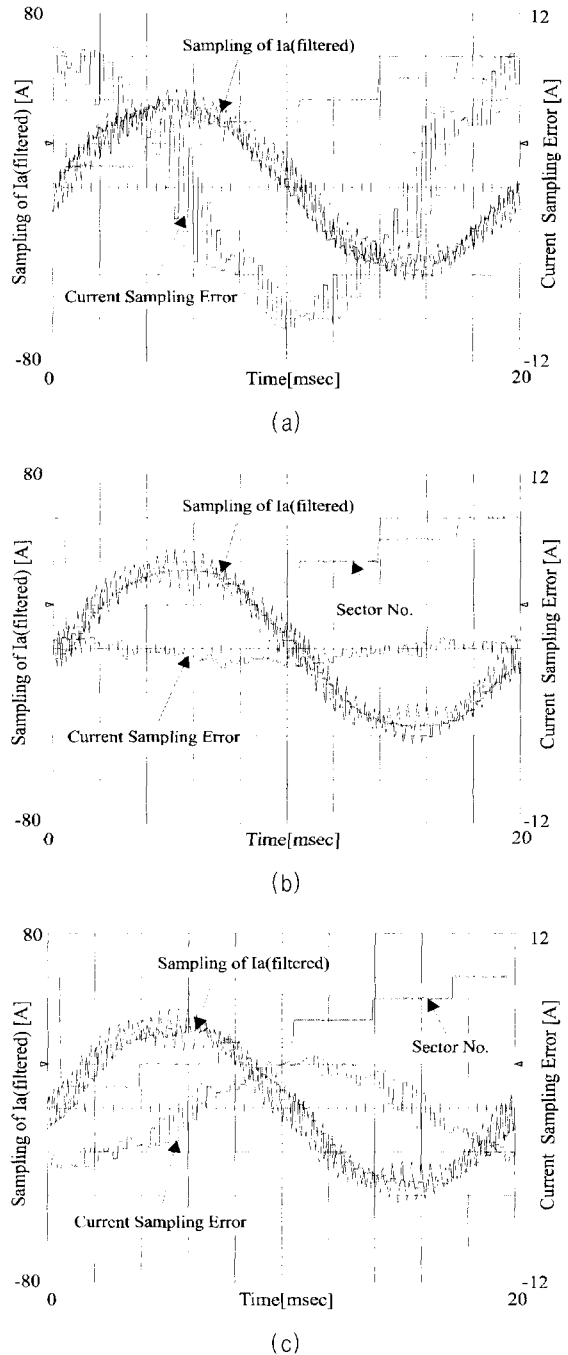
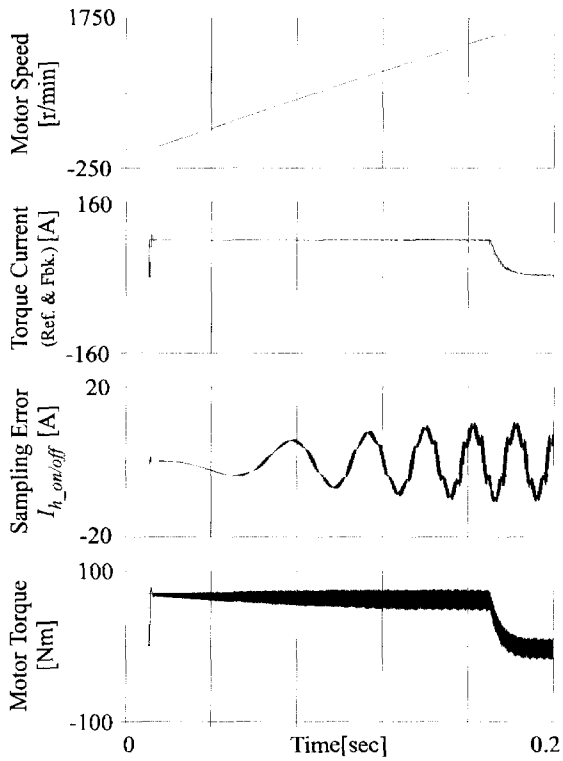
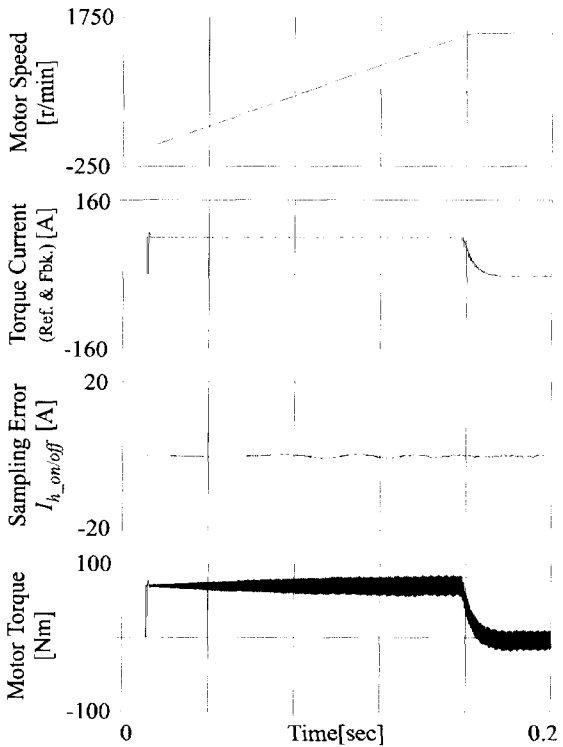


그림 10 50 Hz 운전중 필터된 전류와 샘플링된 전류 그리고 전류 샘플링 오차 (a) 지연 샘플링 하지 않은 경우 (b) 100% 지연 샘플링을 했을 경우 (c) 140% 지연 샘플링을 했을 경우 (실험 결과)

Fig. 10 Sampling of filtered current and the current sampling error at operation of 50 Hz (a) without delayed sampling, (b) with 100% delayed sampling and (c) with 140% delayed sampling.(experiment)



(a)



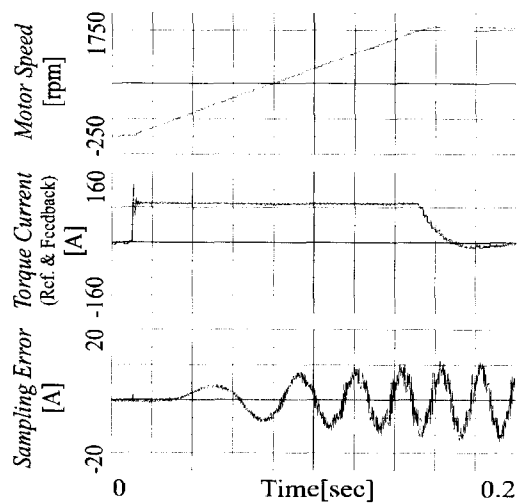
(b)

그림 11 가속중 토오크 발생 특성 (시뮬레이션 결과)

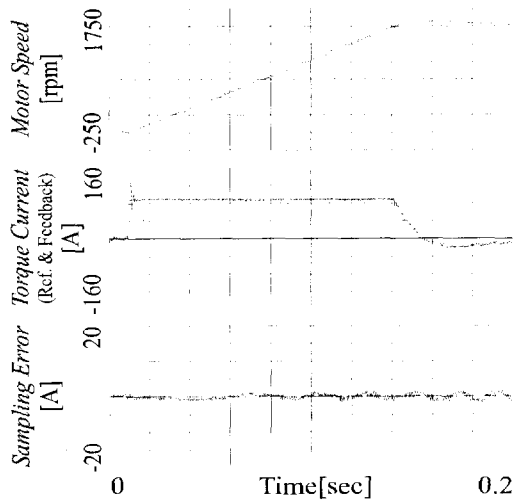
(a) 지연 샘플링 하지 않은 경우 (b) 100% 지연 샘플링을 했을 경우 위에서부터 전동기 속도, 토오크 분 전류 기준 및 궤환값, 전류 샘플링 오차, 그리고 실제 토오크

Fig. 11 Torque generation characteristics during acceleration(simulation). (a) Without delayed sampling. (b) With delayed sampling. From the top, the motor speed, the reference/feedback of torque current, the current sampling error and the reference/real torque.

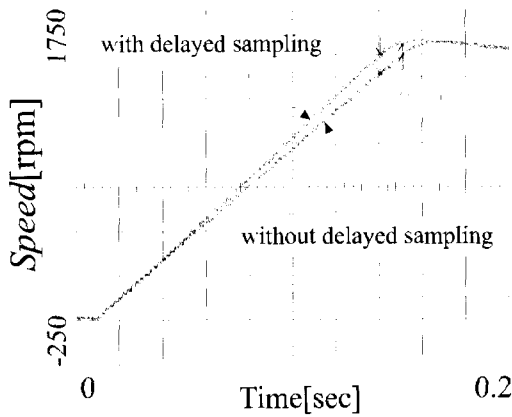
측정된 전류에 포함된 오차는 위상과 크기면에서 전동기 구동 시스템의 자속기준 제어의 성능을 저하시킨다. 전류 샘플링 오차 때문에 토오크 제어가 제대로 이루어 지지 않아서 발생하는 문제점을 파악하기 위해 그림 11과 그림 12에 보인 것과 같은 전동기 가속 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 그림 11에서 전동기 속도 기준을 0에서 1500rpm으로 변경시켰을 때 전동기 속도, 토오크분 전류 기준 및 궤환값, 전류 샘플링 오차, 토오크 기준 및 실제 토오크를 위로부터 그렸다. 그림 11 (a)는 전동기 전류를 지연 없이 샘플했을 경우이고 그림 11 (b)는 50 μ sec의 지연 시간을 주어 샘플링한 경우이다. 샘플링시 보상 지연하지 않으면 발생된 출력 토오크의 평균값이 기준값보다 감소하는 반면에 적당한 지연을 주어 샘플링하면 그림 11 (b)에 보인 것처럼 발생 토오크의 평균값은 기준값과 거의 일치하고 9% 정도 가속 시간이 감소하였다. 그림 12에 보인 실험 결과에서도 가속 시간이 10.2msec 감소하는 등 시뮬레이션 결과와 일치한다.



(a)



(b)



(c)

그림 12 가속중 토크 발생 특성 (실험 결과)

(a) 지연 샘플링 하지 않은 경우 (b) 100% 지연 샘플링을 했을 경우 위에서부터 전동기 속도, 토크 분 전류 기준 및 궤환값, 전류 샘플링 오차 (c) 속도 응답성 비교

Fig 12 Torque generation characteristics during acceleration (experiment).

(a) Without delayed sampling. (b) With delayed sampling. (From top to bottom) the motor speed, the reference/feedback of torque current, and the current sampling error. (c) Comparison of speed responses.

5. 결 론

본 논문에서는 PWM 인버터로 구동되는 교류 전동기 구동시스템에서 전류 샘플링 오차에 관하여 그 영

향과 보상을 검토하였다. 먼저 저역 통과 필터 등에 의해 발생한 신호의 전달 지연이 있는 경우 전류 샘플링에 발생하는 오차의 크기를 전압 기준 벡터의 위치에 따라 해석적으로 구하였다. 이와 같은 전류 오차중에서 기본과 전류 오차 성분은 토크 제어에 영향을 미치고, 고조파 오차 성분은 전류 제어기의 응답성을 올리지 못하게되는 원인이 된다. 그 결과 동적인 응답 특성이 저하되고, 시스템의 안정 동작 영역이 제한되는 등의 문제가 발생한다. 본 논문에서는 필터 지연에 의해 발생하는 이러한 문제점을 보상하기 위해 지연된 샘플링 방법을 제안하였다. 정상 상태 및 과도 상태 응답 특성의 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 방법의 효용성을 검증하였다.

부 록

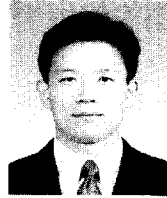
- A. 전동기 사양
11 kW 스펀들용 유도 전동기 4 극, 기저 속도 1500 rpm, 최대 속도 6000 rpm, $R_s=0.04\Omega$, $R_r=0.0175\Omega$, $L_s=6.6mH$, $L_r=6.6mH$, $L_m=6.45mH$.
- B. 인버터
DC 링크 전압 310V, IGBT PWM 인버터, 스위칭 주파수 2.5 kHz, 샘플링 주파수 5 kHz.
- C. 전류 제어기 및 PWM 방식
역기전력 전향 보상을 포함한 동기 좌표계 PI 전류 제어기, 완전 디지털 5 kHz 샘플링, 3상 대칭 공간 벡터 PWM.

참 고 문 헌

- [1] David M. Brod and Donald W. Novotny, "Current Control of VSI PWM Inverters", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA 21, no. 4, May/June, pp.562~570, 1985.
- [2] Timothy M. Rowan and Russel 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, July/Aug., pp.678~690, 1986.
- [3] 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, July/Aug., pp.597~602, 1987.
- [4] Dong-Choon Lee, Seung-Ki Sul and Min-Ho Park, "High Performance Current Regulator for a Field-Oriented Controlled Induction Motor Drive", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA 30, no. 7, Sep./Oct., pp.1247~1257, 1994.

- [5] Jong Woo Choi, Heui-Wook Kim and Seung-Ki Sul, "New Current Control Concept Minimum Time Current Control in the Three Phase PWM Converter", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. PE-12, no. 1., pp. 124~131, 1997.
- [6] Y. Yamamoto, T. Kodama, T. Yamada, T. Ihioka, T. Niwa, "Digital Current Control Method of Induction Motor Using Synchronous Current Detection with PWM Signal", *Tr. of IEE-Japan*, Vol. 112-D, No. 7, pp. 613~622, 1992 (in Japanese).
- [7] A. Mertens and D. Eckardt, "Voltage and Current Sensing in Power Electronic Converters Using Sigma Delta A/D Conversion", *IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec.*, pp. 1092~1098, 1996.
- [8] V. Blasko, V. Kaura and W. Niewiadomski, "Sampling Methods for Discontinuous Voltage and Current Signals and Their Influence on Bandwidth of Control Loops of Electrical Drives", *IEEE APEC Conf. Rec.*, pp. 520~526, 1997.
- [9] H. van der Broeck, H. Skudelny, G. V. Stanke, "Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 24, no 1, Jan./Feb. 1988, pp. 142~150.
- [10] Dae-Woong Chung, Joohn Sheok Kim and Seung-Ki Sul, "Unified Voltage Modulation Technique for Real Time Three Phase Power Conversion", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. IA-34, no. 2, Mar./Apr., 1998, pp. 374~380.
- [11] Raymond B. Sepe and Jeffrey H. Lang, "Implementation of Discrete Time Field Oriented Current Control", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no 3, May/June 1994, pp. 723~727.
- [12] S. H. Song, J. W. Choi and S. K. Sul, "Current measurement of digital field oriented control", in *Conf. Rec. of IAS'96*, pp. 334~338, 1996. (to be appeared in *Industry Applications Magazine*.)

저 자 소 개



송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 8월 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1992년 8월~1995년 2월 포스콘 기술연구소 연구원. 현 기초 전력 공학 공동 연구소 전력전자 연구센터 연구원.



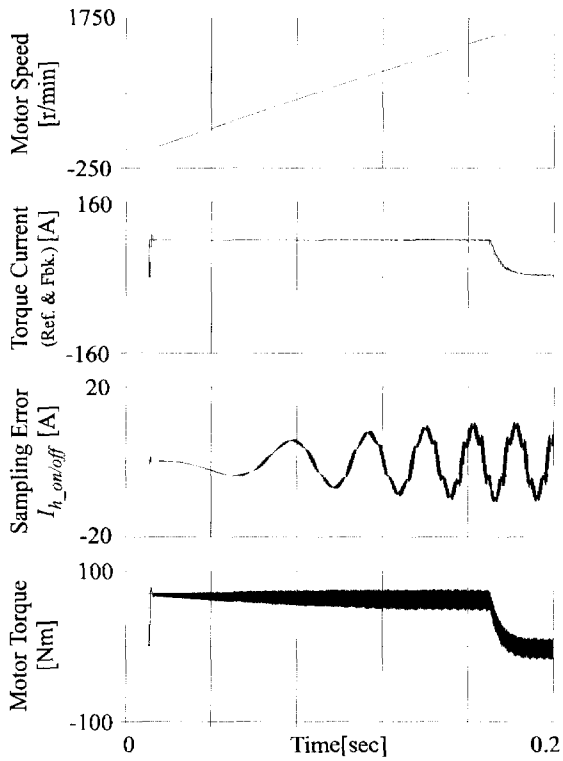
최종우(崔鐘宇)

1969년 2월 25일생. 1991년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 8월 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1996년 8월~현재 LG산전 연구소 선임 연구원.

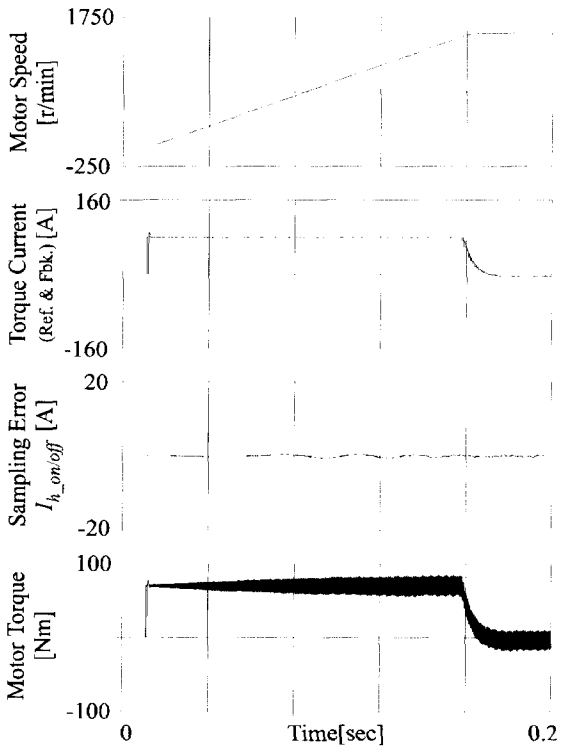


설승기(薛承基)

1958년 3월 25일생. 1980년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986년~1988년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 객원 연구원. 현재 서울대학교 공과대학 전기공학부 부교수. 당 학회 학술이사.



(a)



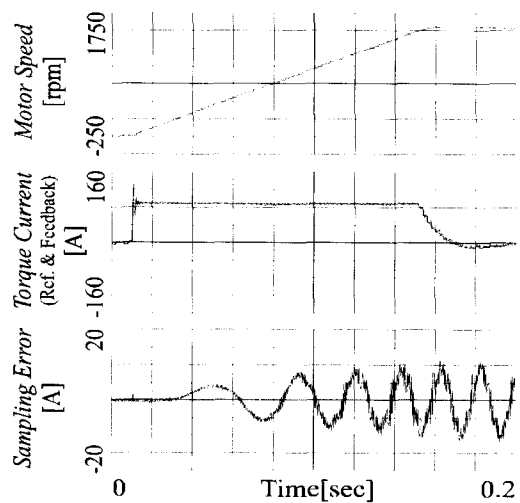
(b)

그림 11 가속중 토오크 발생 특성 (시뮬레이션 결과)

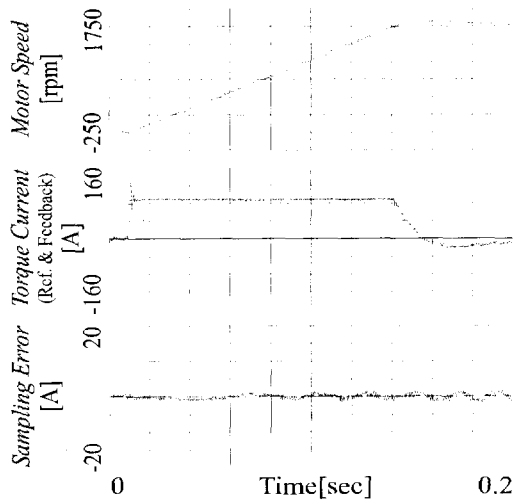
(a) 지연 샘플링 하지 않은 경우 (b) 100% 지연 샘플링을 했을 경우 위에서부터 전동기 속도, 토오크 분 전류 기준 및 궤환값, 전류 샘플링 오차, 그리고 실제 토오크

Fig. 11 Torque generation characteristics during acceleration(simulation). (a) Without delayed sampling. (b) With delayed sampling. From the top, the motor speed, the reference/feedback of torque current, the current sampling error and the reference/real torque.

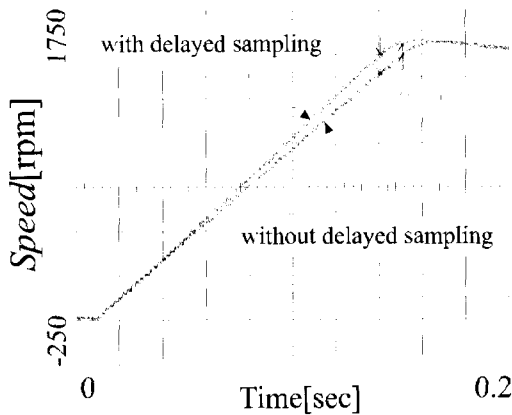
측정된 전류에 포함된 오차는 위상과 크기면에서 전동기 구동 시스템의 자속기준 제어의 성능을 저하시킨다. 전류 샘플링 오차 때문에 토오크 제어가 제대로 이루어 지지 않아서 발생하는 문제점을 파악하기 위해 그림 11과 그림 12에 보인 것과 같은 전동기 가속 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 그림 11에서 전동기 속도 기준을 0에서 1500rpm으로 변경시켰을 때 전동기 속도, 토오크분 전류 기준 및 궤환값, 전류 샘플링 오차, 토오크 기준 및 실제 토오크를 위로부터 그렸다. 그림 11 (a)는 전동기 전류를 지연 없이 샘플했을 경우이고 그림 11 (b)는 50 μ sec의 지연 시간을 주어 샘플링한 경우이다. 샘플링시 보상 지연하지 않으면 발생된 출력 토오크의 평균값이 기준값보다 감소하는 반면에 적당한 지연을 주어 샘플링하면 그림 11 (b)에 보인 것처럼 발생 토오크의 평균값은 기준값과 거의 일치하고 9% 정도 가속 시간이 감소하였다. 그림 12에 보인 실험 결과에서도 가속 시간이 10.2msec 감소하는 등 시뮬레이션 결과와 일치한다.



(a)



(b)



(c)

그림 12 가속중 토오크 발생 특성 (실험 결과)

(a) 지연 샘플링 하지 않은 경우 (b) 100% 지연 샘플링을 했을 경우 위에서부터 전동기 속도, 토오크 분 전류 기준 및 궤환값, 전류 샘플링 오차 (c) 속도 응답성 비교

Fig 12 Torque generation characteristics during acceleration (experiment).

(a) Without delayed sampling. (b) With delayed sampling. (From top to bottom) the motor speed, the reference/feedback of torque current, and the current sampling error. (c) Comparison of speed responses.

5. 결 론

본 논문에서는 PWM 인버터로 구동되는 교류 전동기 구동시스템에서 전류 샘플링 오차에 관하여 그 영

향과 보상을 검토하였다. 먼저 저역 통과 필터 등에 의해 발생한 신호의 전달 지연이 있는 경우 전류 샘플링에 발생하는 오차의 크기를 전압 기준 벡터의 위치에 따라 해석적으로 구하였다. 이와 같은 전류 오차중에서 기본파 전류 오차 성분은 토오크 제어에 영향을 미치고, 고조파 오차 성분은 전류 제어기의 응답성을 올리지 못하게되는 원인이 된다. 그 결과 동적인 응답 특성이 저하되고, 시스템의 안정 동작 영역이 제한되는 등의 문제가 발생한다. 본 논문에서는 필터 지연에 의해 발생하는 이러한 문제점을 보상하기 위해 지연된 샘플링 방법을 제안하였다. 정상 상태 및 과도 상태 응답 특성의 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 방법의 효용성을 검증하였다.

부 록

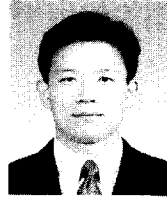
- A. 전동기 사양
11 kW 스펀드용 유도 전동기 4 극, 기저 속도 1500 rpm, 최대 속도 6000 rpm, $R_s=0.04\Omega$, $R_r=0.0175\Omega$, $L_s=6.6mH$, $L_r=6.6mH$, $L_m=6.45mH$.
- B. 인버터
DC 링크 전압 310V, IGBT PWM 인버터, 스위칭 주파수 2.5 kHz, 샘플링 주파수 5 kHz.
- C. 전류 제어기 및 PWM 방식
역기전력 전향 보상을 포함한 동기 좌표계 PI 전류 제어기, 완전 디지털 5 kHz 샘플링, 3상 대칭 공간 벡터 PWM.

참 고 문 헌

- [1] David M. Brod and Donald W. Novotny, "Current Control of VSI PWM Inverters", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA 21, no. 4, May/June, pp.562~570, 1985.
- [2] Timothy M. Rowan and Russel 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, July/Aug., pp.678~690, 1986.
- [3] 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, July/Aug., pp.597~602, 1987.
- [4] Dong-Choon Lee, Seung-Ki Sul and Min-Ho Park, "High Performance Current Regulator for a Field-Oriented Controlled Induction Motor Drive", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA 30, no. 7, Sep./Oct., pp.1247~1257, 1994.

- [5] Jong Woo Choi, Heui-Wook Kim and Seung-Ki Sul, "New Current Control Concept Minimum Time Current Control in the Three Phase PWM Converter", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. PE-12, no. 1., pp. 124~131, 1997.
- [6] Y. Yamamoto, T. Kodama, T. Yamada, T. Ihioka, T. Niwa, "Digital Current Control Method of Induction Motor Using Synchronous Current Detection with PWM Signal", *Tr. of IEE-Japan*, Vol. 112-D, No. 7, pp. 613~622, 1992 (in Japanese).
- [7] A. Mertens and D. Eckardt, "Voltage and Current Sensing in Power Electronic Converters Using Sigma Delta A/D Conversion", *IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec.*, pp. 1092~1098, 1996.
- [8] V. Blasko, V. Kaura and W. Niewiadomski, "Sampling Methods for Discontinuous Voltage and Current Signals and Their Influence on Bandwidth of Control Loops of Electrical Drives", *IEEE APEC Conf. Rec.*, pp. 520~526, 1997.
- [9] H. van der Broeck, H. Skudelny, G. V. Stanke, "Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 24, no 1, Jan./Feb. 1988, pp. 142~150.
- [10] Dae-Woong Chung, Joohn Sheok Kim and Seung-Ki Sul, "Unified Voltage Modulation Technique for Real Time Three Phase Power Conversion", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. IA-34, no. 2, Mar./Apr., 1998, pp. 374~380.
- [11] Raymond B. Sepe and Jeffrey H. Lang, "Implementation of Discrete Time Field Oriented Current Control", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no 3, May/June 1994, pp. 723~727.
- [12] S. H. Song, J. W. Choi and S. K. Sul, "Current measurement of digital field oriented control", in *Conf. Rec. of IAS'96*, pp. 334~338, 1996. (to be appeared in *Industry Applications Magazine*.)

저 자 소 개



송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 8월 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1992년 8월~1995년 2월 포스콘 기술연구소 연구원. 현 기초 전력 공학 공동 연구소 전력전자 연구센터 연구원.



최종우(崔鐘宇)

1969년 2월 25일생. 1991년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 8월 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1996년 8월~현재 LG산전 연구소 선임 연구원.



설승기(薛承基)

1958년 3월 25일생. 1980년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986년~1988년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 객원 연구원. 현재 서울대학교 공과대학 전기공학부 부교수. 당 학회 학술이사.