

역 기전력에 무관한 가변 히스테리시스 밴드 전류 제어

김 경화^o, 조 관렬, 정 세교, 오 동성, 윤 명중
한국과학기술원 전기및 전자공학과

Adaptive Hysteresis Band Current Control Independent of the Back EMFs

Kyeong-Hwa Kim, Kwan-Yuhl Cho, Se-Kyo Chung, Dong-Seong Oh, and Myung-Joong Youn
KAIST Department of Electrical Engineering

Abstract

The conventional adaptive hysteresis band current control technique has disadvantages such that on-line calculation of the hysteresis band is very complex, therefore, the adaptive hysteresis band must be stored in the look-up table. In this paper, a new simplified adaptive hysteresis band current control technique with phase decoupling is presented. The adaptive band is independent of the back EMFs. Using this adaptive band and the phase decoupled current error, the modulation frequency is fixed at nearly constant and the PWM inverter has optimal switching pattern.

1. 서론

교류 전동기의 벡터 제어(vector control)시 발생 되는 토 오르는 전류 제어의 성능에 직접적인 영향을 받는다. 그러므로 전체적인 구동 시스템이 좋은 성능을 얻기 위해서는 전류 명령에 대해 과도상태(transient-state)에서의 빠른 응답 특성, 정상 상태(steady-state)에서의 작은 전류 오차, 그리고 낮은 전류 맥동(ripple)이 요구된다. 이러한 성능을 만족시키기 위해서 현재까지 PWM 인버터의 다양한 전류 제어 기법이 제안되고 연구되어 왔다. [1-6] 이러한 전류 제어 기법은 크게 히스테리시스 전류 제어, 삼각파 비교형 전류 제어, 그리고 예측형 전류 제어로 구분 되며, 또한 이들의 몇가지 변화된 형태가 있다.

삼각파 비교형 전류 제어는 삼각파의 주파수로 고정되는 규칙적인 스위칭 상태를 갖는다. 따라서 고조파 특성이 우수하지만, 전류의 위상 지연(phase delay) 현상이 나타나고 전압 이득이 커짐에 따라 다중교차(multiple crossing) 현상을 일으켜 이 전류 제어 기법의 특징이라 할 수 있는 규칙적인 스위칭이 어려워진다. 예측형 전류 제어는 부하 전류가 전류 명령을 잘 추종하도록 하는 인버터의 공간 전압 벡터의 크기와 방향을 계산하여 전압 제어를 하는 방식으로 우수한 제어 성능을 갖는다. 그러나 부하의 정확한 정보(R, L, c)가 요구되고 직접적인 하드웨어 구현이 어렵다. [3]

히스테리시스 전류 제어는 hysteresis band를 갖는 on-off 제어 형태로, 구현이 간단하고 빠른 응답 특성을 나타내며, 또한 inherent peak 전류 제한 능력을 가지고 있어 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 불규칙한 스위칭으로 인해 스위칭 소자의 선정에 어려움이 있고 최대 전류 오차가 hysteresis band의 2배 까지 될 수 있다. 또한 고정된 hysteresis band를 갖는 전류 제어기는 역 기전력이 작을 때 limit cycle이라는 고속 스위칭이 발생하고, 인버터 스위치의 3상의 상태가 동시에 on 또는 off 될 때 freewheeling 현상이 일어나 전류가 band 내를 흐르는 현상이 발생한다. [4] 이를 극복하기 위하여 일정한 스위칭 주파수를 갖는 가변(adaptive) 히스테리시스 전류 제어 기법이 제안 되어 왔다. [5, 6] 그러나 이러한 방법은 가변 band를 결정하는 식이 복잡하여 일반적으로 look-up table에 저장하는 방법을 취한다. 본 논문에서는 가변 band를 간단하게 계산하고, phase decoupling을 사용하여 각 상간의 interaction을 피함으로써 독립적으로 각 상에 히스테리시스 전류 제어를 적용할 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다. 또한 제안된 제어 알고리즘에서 hysteresis band는 역 기전력과 무관하게 계산되어 역 기전력이 변해도 영향을 받지 않는다.

2. 가변 band 히스테리시스 제어

그림 1은 3상 부하를 갖는 전압원 인버터의 간략한 구성도이다. 3상 부하는 R-L 임피던스와 역 기전력을 가진 대칭적인 등가 회로로 근사화 된다. 전압원 인버터의 상태는 3개의 스위칭 함수 S1, S2, 그리고 S3에 의해 결정된다. 상태 '1'은 상측 스위치의 on을 나타내고, 상태 '0'은 하측 스위치의 on을 나타낸다. 이 때 각 스위치의 극 전압(pole voltage)은

$$v_i = V_m S_i, \text{ where } i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

으로 나타내어지고, Y결선 부하에 대해 상전압(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})은 다음과 같이 나타낸다.

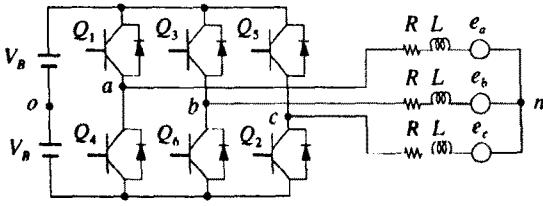


그림 1. 3상 부하를 갖는 전압원 인버터

$$v_{abcn} = K_{123}^{abcn} \cdot v_{123} \quad (2)$$

$$v_{abcn} = (v_{an} \ v_{bn} \ v_{cn})^T$$

$$v_{123} = (v_1 \ v_2 \ v_3)^T$$

$$K_{123}^{abcn} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}$$

또한 일반적인 교류 전동기의 전압 방정식은 다음과 같이 나타난다.

$$v_{abc} = R i_{abc} + L \frac{d}{dt} i_{abc} + e_{abc} + v_n \cdot 1. \quad (3)$$

여기서 v_{abc} 와 i_{abc} 는 인버터 출력 전압과 전류 벡터이고, v_n 은 부하의 중성점 전압, 그리고 1 은 단위 컬럼 벡터이다. 모든 전압의 기준점은 직류 전압원의 중성점이고, 부하 파라미터가 대칭일때 상전압 (v_{an} , v_{bn} , v_{cn}) 과 부하의 중성점 전압 (v_n) 은 다음과 같이 주어진다.

$$v_{an} = v_a - v_n \quad (4)$$

$$v_{bn} = v_b - v_n$$

$$v_{cn} = v_c - v_n$$

$$v_n = \frac{v_a + v_b + v_c}{3}. \quad (5)$$

즉 순시 출력 극 전압 v_{abc} 는 DC 링크 전압 V_B 만 주어지면 인버터 스위치의 상태 (스위칭 함수 S) 에 의해 결정되어 교류 전동기와 같은 일반 3상 Y결선 부하의 중성점 전압 (v_n) 을 (5) 식과 같이 구할 수 있으므로 phase decoupling 이 가능하다.

i_{abc}^* 를 부하의 전류 명령이라 하면 기준 전압 (reference voltage) 은

$$v_{abc}^* = R i_{abc}^* + L \frac{d}{dt} i_{abc}^* + e_{abc} \quad (6)$$

로 정의된다.

그리고 식 (3) 과 (6) 으로부터 전류 오차식은

$$R \Delta i_{abc} + L \frac{d}{dt} \Delta i_{abc} = v_{abc}^* - v_{abc} + v_n \cdot 1 \quad (7)$$

이고 여기서 $\Delta i_{abc} = i_{abc}^* - i_{abc}$ 이다.

가. Phase Decoupling

부하 전류가 hysteresis band 를 touching 하지 않고 band 내로 흐르는 free-wheeling 현상은 각 상에서의 전류 오차가 다른 상의 영향을 받아 일어나는 현상으로, 이러한 다른 상의 interaction 효과를 제거하기 위해서 Δi_{abc}^c 를 각 상의 상 전압에 의해서만 결정되는 Δi_{abc}^c 와 phase interaction 의 결과로 일어나는 i_n 로 분리한다.

즉 식 (7) 로 부터

$$R \Delta i_{abc}^c + L \frac{d}{dt} \Delta i_{abc}^c = v_{abc}^* - v_{abc} \quad (8)$$

$$R i_n + L \frac{d}{dt} i_n = v_n \quad (9)$$

와 같이 분리할 수 있고 여기서 $\Delta i_{abc} = \Delta i_{abc}^c + i_n \cdot 1$ 이다.

Δi_{abc}^c 는 다른 상전압에는 독립적으로 각 상에 의해서만 결정되고, i_n 은 각 상간의 상호 작용에 의해 발생하는 전류이다.

식 (9) 에서 i_n 은 부하 파라미터 R, L 이 주어지면 v_n 으로부터 구해지고, 따라서 Δi_{abc}^c 를 구할 수 있어 각 상에 대해 독립적인 히스테리시스 제어가 수행될 수 있다. 이러한 방법에 의하여 phase interaction 현상을 제거할 수 있으므로 각 상의 전류를 다른 상의 전류에 영향을 받지 않도록 제어할 수 있다.

나. 가변 band 히스테리시스 제어

3상 부하의 a상에 대한 전압 방정식으로부터 저항 R 의 전압 강하가 무시될 때 hysteresis band 를 touching 하는 시간은 다음과 같다.

$$\Delta t = \frac{L \Delta i_a}{v_{an} - e_a} \quad (10)$$

기존의 고정 band 를 가지는 히스테리시스 전류 제어는 hysteresis band 가 고정되므로 스위칭 시간 Δt 가 부하 파라미터에 따라 변하므로 불규칙적인 스위칭 주파수를 일으키는 반면에, 가변 band 히스테리시스 전류 제어는 Δt 를 일정하게 유지하는 Δi_a 를 미리 계산하여 일정한 스위칭 주파수를 갖게 한다. phase decoupling 된 3상 인버터의 각 상에 독립적인 전류 오차 Δi_{abc}^c 를 제어하기 위한 가변 히스테리시스 band 는 일반적으로 변조 주파수의 스위칭 시간이 부하의 시상수 (L/R) 보다 매우 작으므로 R 의 효과를 무시할 수 있다. 이러한 조건하에서 변조 주파수를 거의 일정하게 유지하는 가변 band 는 다음과 같다.

$$H_{abc} = \frac{TV_B}{8L} \left(1 - \frac{(v_a^{*2} \ v_b^{*2} \ v_c^{*2})^T}{V_B^2} \right) \quad (11)$$

다. 기준 전압(v_{abc}^*)의 예측

v_{abc}^* 를 간단히 구하기 위해 v_{abc}^* 의 평균 값을 도입 하자.

v_{abc}^* 은 Δi_{abc} 가 선형적으로 변화한다고 가정하면, 식 (8)의 양변을 적분함으로써 (k-1)번째의 기준 전압 $v_{abc}^*(k-1)$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_{abc}^*(k-1) = \frac{1}{T} \int_{(k-1)T}^{kT} v_{abc}^*(t) dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_{(k-1)T}^{kT} v_{abc}^*(t) dt + \frac{L}{T} (\Delta i_{abc}(k) - \Delta i_{abc}(k-1)) \quad (12)$$

여기서 $(k-1)T < t < kT$ 이다.

또한 AC 위상 변수를 동기 회전 기준축에서의 등가 DC 변수로 변환하면 다음 방정식이 구해진다.

$$v_{qdo}^*(k-1) = K_{abc}^{dqos} (\theta(k) - \Delta\theta/2) \cdot v_{abc}^*(k-1) \quad (13)$$

여기서 $\Delta\theta = \theta(k) - \theta(k-1)$ 이고, 정상 상태에서는 $v_{qdo}^*(k) = v_{qdo}^*(k-1)$ 관계가 성립하므로 식 (13)으로부터 $v_{abc}^*(k)$ 는 식 (14)와 같이 $v_{abc}^*(k-1)$ 로 나타낼 수 있다.

$$v_{abc}^*(k) = (K_{abc}^{dqos})^{-1} (\theta(k) + \Delta\theta/2) \cdot v_{qdo}^*(k) = P v_{abc}^*(k-1) \quad (14)$$

여기서

$$P = \cos\Delta\theta \cdot I - \frac{\sin\Delta\theta}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

3. 시뮬레이션 결과

그림 2는 3개의 주요한 부분으로 구성된 가변 히스테리시스 전류 제어의 1상에 대한 기본적인 구성도이다. Phase decoupling 부에서는 각 상의 독립적인 전류 오차(Δi_{abc}^*)를 계산하기 위해 부하 파라미터와 부하 증정점 전압(v_a)로부터 in 을 구한다. 예측부(prediction part)에서는 한 샘플링 시간 전의 기준 전압 $v_{abc}^*(k-1)$ 으로부터 현재의 기준 전압 $v_{abc}^*(k)$ 를 구한다. 가변 band의 발생부에서는 변조 주파수(modulation frequency)가 일정하게 유지되도록 하는 가변 band를 발생하여 인버터의 스위칭이 규칙적으로 일어나고 전류 맥동이 최소화되도록 한다.

시뮬레이션에서 사용된 부하 파라미터는 $R = 1[\Omega]$, $L = 5[mH]$, $e_a = 60 \cos(100\pi t)$ 이고 $i_a^* = 10 \cos(100\pi t)$ 의 전류 명령을 사용한다. 그림 3은 일반적인 가변 band 히스테리시스 전류 제어의 한 상에 대한 전류 파형, 전류 오차와 band, 및 전류의 궤적(trajecory)을 나타낸다. 그림 4는 제한된 전류 제어 방법의 한 상의 전류, 전류 오차와 가변 band, 및 전류의 궤적을 나타낸다. 그림 3에서 나타난 바와 같이 일반적인 가변 band 전류 제어에서는 각 상간의 interaction에 의하여 스위칭이 일정하게 이루어지지 않고 각 상의 전류가 band를 벗어나는 현상이 발생한다. 그러나 제한된 전류 제어에서는 phase decoupling에 의해 각 상간의 interaction 현상이 없으므로 스위칭이 규칙적으로 이루어지

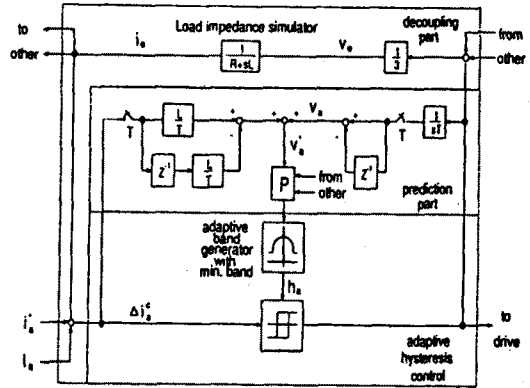


그림 2. 가변 히스테리시스 전류 제어의 구성도

고 각 상의 전류는 항상 band를 touching 하면서 전류 오차가 band 내에 있게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 전류 제어형 전압원 인버터의 phase decoupling 된 가변 band 히스테리시스 전류 제어를 제시한다. 기존의 가변 band 히스테리시스 전류 제어는 band를 결정하는 식이 복잡하여 look-up table에 저장하지 않고는 band의 계산이 매우 어렵다. 제안된 가변 band 히스테리시스 전류 제어 기법을 사용하면 역 기전력과 무관한 간단한 band의 계산식을 구할 수 있고 phase decoupling을 사용하여 상간의 interaction을 피함으로써 스위칭 주파수를 일정하게 유지할 수 있다.

참고 문헌

- [1] D.M. Brod and D.W. Novotny, "Current Control of VSI - PWM Inverters," IEEE Trans. Ind. Appl. IA-21, no. 4, pp. 562-570, 1985
- [2] 정 세 교, 영구자석형 동기전동기 구동을 위한 펄스폭 변조형 전압원 인버터의 전류 제어, 한국과학기술원 석사학위논문, 199
- [3] H.L. Huy and L. A. Dessaint, "An Adaptive Current Control Scheme for PWM Synchronous Motor Drives : Analysis and simulation," IEEE Trans. Power Elec., vol. PE-5, no. 2, pp.151-159, 1990
- [4] M.L. Mazenc, C. Villanueva, J. Hector, "Study and Implementation of Hysteresis Controlled Inverter on a Permanent Magnet Synchronous Machine," Conf. Rec. of IEEE/IAS Annual Meeting, pp.426-431., 1984
- [5] B.K. Bosc, "An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System," IEEE IECON, pp.684-670, 1988
- [6] L. Malesani, and P. Tenti, "A Novel Hysteresis Control Method for Current-Controlled Voltage-Source PWM

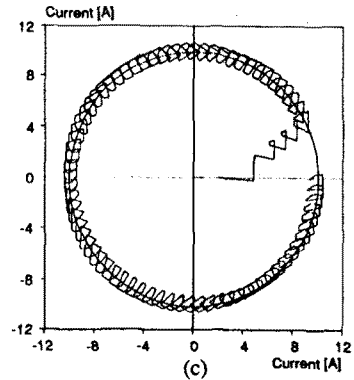
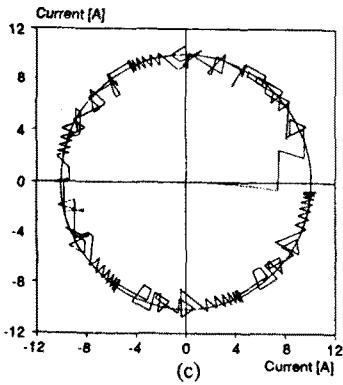
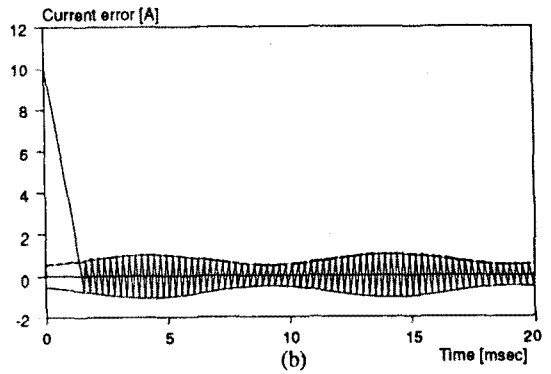
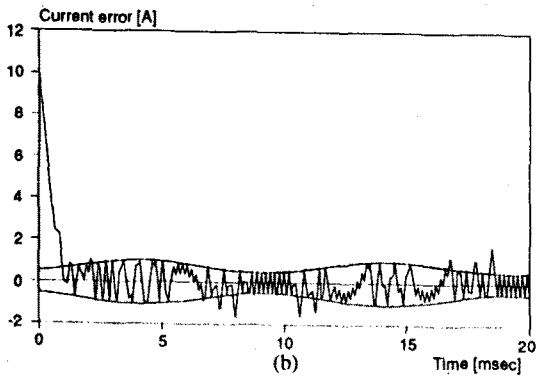
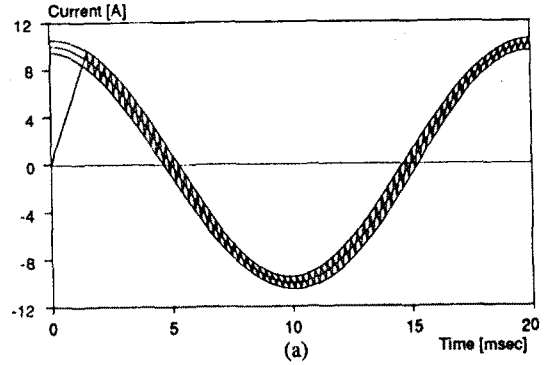
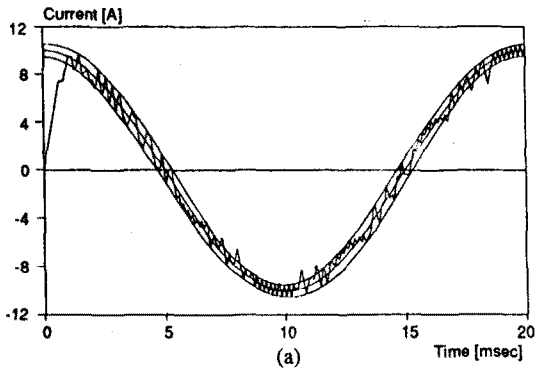


그림3. 일반적인 가변 히스테리시스 전류 제어

- (a) 상전류
- (b) 전류 오차
- (c) 전류 궤적

그림4. 제안된 가변 히스테리시스 전류 제어

- (a) 상전류
- (b) 전류 오차
- (c) 전류 궤적