

# 전류제어기와 전동기 모델링을 이용한 3-레벨 Neutral-Point-Clamped 인버터의 중성점 션트 저항을 통한 상전류 복원 방법

유재준, 구현근, 김장목  
부산대학교 전기공학과

## Phase Current Reconstruction Method from Neutral Shunt Resistor in Three-Level Neutral-Point-Clamped(NPC) Inverter

You Jae-Jun, Ku Hyun-Keun, Kim Jang-Mok  
Department of Electrical Engineering, Pusan National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 인버터 시스템의 가격을 줄이기 위해 3-레벨 NPC 인버터의 중성단에 하나의 션트 저항을 삽입함으로써 AC 전동기의 3상 전류를 획득하는 방법을 제안한다. 션트 저항으로부터 정확한 상 전류를 획득하기 위해서는 최소한의 시간이 필요하며 때문에 측정불가영역이 존재하게 된다. 기존의 측정불가영역으로부터 상 전류를 복원하는 방법은 스위칭 패턴을 이동시키거나 공간 벡터 전압 변조 기법(SVPWM) 이외의 변조 기법을 이용하였는데 이러한 방법은 전류에 고조파를 증가시켜 효율을 떨어뜨리고 소음을 발생시킨다. 본 논문에서는 동기 좌표계 d-q축 비례적분제어기와 전동기 시스템의 전달함수를 이용하여 지령 전류로부터 실제 전류와 같은 전류를 얻는 방법을 통해 기존의 문제점들을 개선하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

키는 문제점이 발생한다. 본 논문에서는 동기 좌표계 d-q축 비례적분제어기와 전동기 시스템을 모델링을 이용하여 전달함수로 표현한다. 그리고 이를 통해 지령전류를 실제 전류시켜 기존의 전류 복원 방법에서 발생하는 문제점을 개선하는 방법을 제안한다.

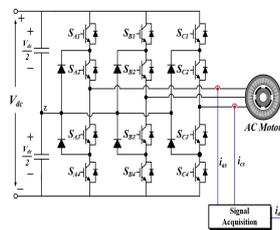


그림 1 전류 센서 인버터

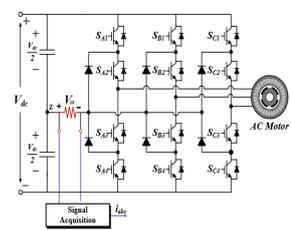


그림 2 3-레벨 중성점 션트 NPC 인버터

### 1. 서론

AC 전동기의 순시 토크 제어를 하기 위해서는 자속과 전류의 크기와 위상을 제어해야 한다. 일반적으로 자속을 기준으로 전류의 방향과 크기를 제어하는데 이러한 제어 방법을 벡터제어 또는 자속 기준 제어(FOC, Field Oriented Control) 라고 한다. 벡터 제어를 위해서는 전동기에 흐르는 상전류를 획득하는 것이 필수적이다.

일반적으로 전동기에 흐르는 3상 전류는 그림 1과 같이 2개의 전류 센서를 이용하여 두 상의 전류는 측정하고, 나머지 한 상은 키르히호프의 전류 법칙( $i_a + i_b + i_c = 0$ )을 이용하여 계산을 통해 얻는다. 하지만 제품이 대량 생산되는 산업분야에서는 전동기 제어시스템의 가격 절감이 중요시되므로 상대적으로 고가의 전류 센서 대신 그림 2와 같이 저가의 션트 저항을 인버터에 삽입하여 3상 전류를 획득한다.

션트 저항을 이용하여 전류를 획득하는 방법은 전류 센서를 사용할 때 발생하는 높은 비용부분 이외에도 전류 스케일 오차문제에 대해 이점을 가지지만 기술적으로 구현이 어렵다는 단점이 있다. 그러므로 현재 많은 산업 분야에서는 션트 저항으로부터 전류를 획득하는 방법에 대해 관심이 높아지고 활발히 연구가 진행되고 있다.

기존의 션트 저항으로부터 전류를 획득할 때 발생하는 전류 획득 불가 영역은 스위칭 패턴을 이동시키거나 공간 벡터 전압 변조 기법(SVPWM) 이외의 기법<sup>[1]</sup>을 사용함으로써 전류를 복원하였다. 하지만 이러한 방법들은 전류의 고조파를 증가시켜 소음을 발생시

### 2. 본론

#### 2.1 중성단 션트 저항으로부터 상전류 획득

그림 3은 3-레벨 NPC 인버터의 스위칭 상태에 따른 전압 벡터도를 나타낸다. 여기서 P State는 그림 1에서 한 암(Arm)에 대해 상단 암의 스위치( $S_{A1}, S_{A2}$ )만 On된 상태로  $V_{dc}/2$ 의 출력 상태를 가지고 O State는 가운데 스위치( $S_{A2}, S_{A3}$ ), N State는 하단 암의 스위치( $S_{A3}, S_{A4}$ )가 On된 상태로 각각  $0, -V_{dc}/2$ 의 출력 상태를 가진다. 중성단에 션트저항이 위치한 경우 스위치가 O State인 경우에만 션트 저항으로부터 전류를 획득할 수 있는데 이를 3-레벨 NPC 인버터의 전압 벡터도에 나타내면 그림 4와 같다.

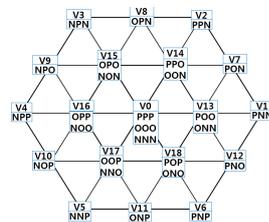


그림 3 3-레벨 NPC 인버터전압 벡터도

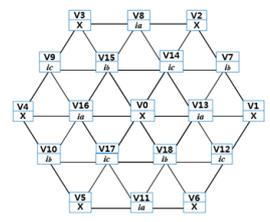


그림 4 3-레벨 중성단 션트 인버터 전압 벡터도

#### 2.2 3-레벨 중성단 션트 인버터의 측정 불가 영역

션트 저항으로부터 정확한 상 전류를 획득하기 위해서는 최소한의 시간  $T_{min}$  이후에 전류를 샘플링해야 한다.

$$T_{\min} = T_{\text{dead}} + T_{\text{settling}} + T_{AD} \quad (1)$$

$T_{\min}$ 은 수식 (1)과 같이 정의가 되는데 이 때  $T_{\text{dead}}$ 는 인버터의 데드 타임(Dead Time),  $T_{\text{settling}}$ 은 인버터의 링잉(ringing)현상이 발생한 뒤 안정화 될 때까지의 시간을 의미하고  $T_{AD}$ 는 A/D 컨버터(Analog to Digital Converter)의 변환시간을 의미한다.

3-레벨 중성단 선트 인버터의 측정불가능영역은 그림 5의 한상( $i_a$ ) 전류의  $T_{\min}$ 에 의한 측정불가능영역을 적용하여 전압 벡터도에 나타내면 그림 6과 같다<sup>[2]</sup>. 그림 6의 흰색 부분은 두 상 이상의 전류가 측정 가능한 부분(Area 1)이고 회색 부분은 측정 불가 영역(Area 2)이다.

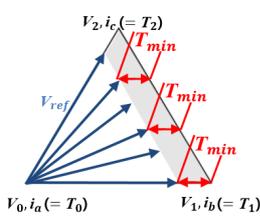


그림 5  $i_a$  상 전류 측정 불가 영역

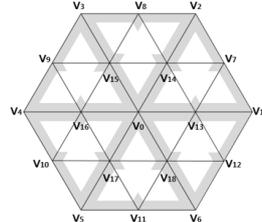


그림 6 3레벨 중성단 선트 인버터 측정 불가영역 전압 벡터도

### 2.3 제안하는 상전류 복원 방법

3상 AC 전동기의 속도를 제어하기 위해서는 토크 제어가 필수적이다. 토크제어는 전류제어에 의해 이루어지는데 전류제어의 경우 일반적으로 그림 7과 같이 동기 좌표계 d-q축 비례적분 제어가 사용된다.

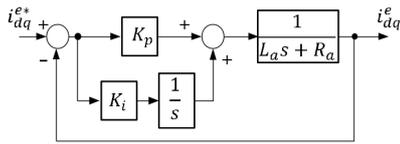


그림 7 동기 좌표계 d-q축 비례적분 제어기 및 전동기 시스템 블록도

이때 비례 이득  $K_p(=L_a\omega_{cc})$  과 적분이득  $K_i(=R_a\omega_{cc})$  에 대해 그림 6의 블록도를 개루프 전달함수로 구해보면 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있고 이를 이용하여 폐루프 전달함수를 구해보면 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_o(s) = (K_p + \frac{K_i}{s}) \times (\frac{1}{R_a + sL_a}) = (\frac{\omega_{cc}(R_a + sL_a)}{s}) \times (\frac{1}{R_a + sL_a}) = \frac{\omega_{cc}}{s} \quad (2)$$

$$G_c(s) = \frac{I_{dq}^*(s)}{I_{dq}^e(s)} = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)} = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \quad (3)$$

식 (3)를 통해 d-q축 실제 전류는 d-q축 지령전류를 차단 추파수가  $\omega_{cc}$  인 저역 통과 필터를 통과시켜 얻은 1차 지연요소와 같음<sup>[3]</sup>을 알 수 있다. 본 논문에서는 이를 이용하여 3-레벨 중성단 선트 인버터의 전류 측정 불가 영역을 복원 한다.

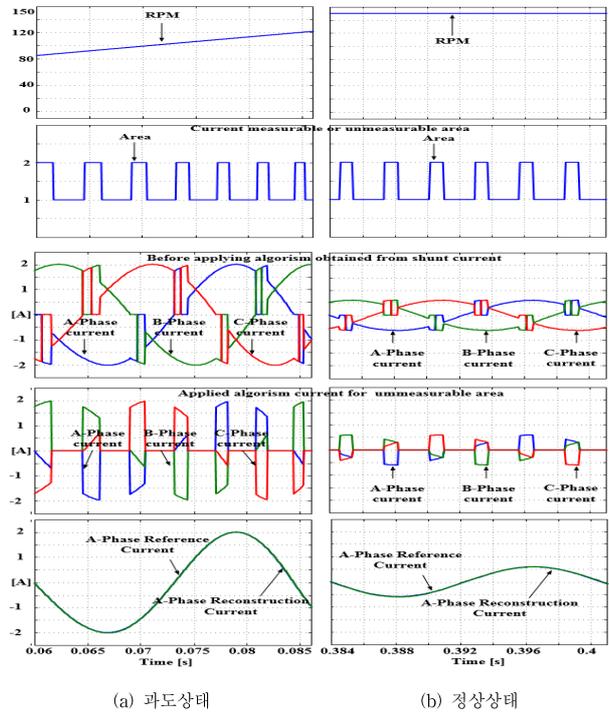
### 3. 시뮬레이션

본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 3-레벨 중성단 선트 인버터의 전류 측정불가 영역에 대한 복원을 검증하였다. 그림 8은 알

고리즘 적용 전/후의 (a) 과도상태와 (b) 정상상태를 나타낸다. 여기서 Area 1은 두 상 전류모두 측정 가능한 영역이고 Area 2는 한 상 또는 두 상의 전류가 측정 불가능한 영역을 의미한다. 알고리즘을 적용하기 전에는 선트저항으로부터 측정된 전류가 Area 2에서 부정확한 것을 볼 수 있는데 이 영역에 대해 알고리즘을 적용하면 제일 아래에 있는 두 파형과 같이 과도상태와 정상상태에서 지령 전류 값과 일치하는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션은 표 1의 파라미터를 바탕으로 150[rpm]에서 동작시킨 파형이다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Poles	48	Vdc	310[V]
고정자 저항	5.96[Ω]	역기전력 상수	0.1528[V · s]
정격속도	400[rpm]	고정자 인덕티스	37.5[mH]



(a) 과도상태 (b) 정상상태

그림 8 Area에 따른 알고리즘 미적용/적용 상 전류

### 3. 결론

본 논문에서는 3-레벨 중성단 선트 인버터에서  $T_{\min}$ 에 의한 측정 불가 영역에 대해 실제 전류를 지령 전류에 동기 좌표계 d-q축 비례적분 제어기와 전동기를 모델링한 전달함수에 통과시킴으로써 지령전류의 1차 지연요소로 간주한다. 이는 기존의 스위칭 패턴을 이동시키거나 SVPWM 이외의 변조방법으로 인한 고조파증가 및 소음 문제를 개선하였다. 활용한 방법은 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] H. R. Kim and T. M. Jahns, "Phase current reconstruction for AC motor drives using a dc-link single current sensor and measurement voltage vectors," IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 5, pp. 1413 - 1419, Sep. 2006.
- [2] Hojoon Shin and Jung-Ik Ha "Phase Current Reconstructions from DC-Link Currents in Three-Phase Three-Level PWM Inverters" IEEE Trans. Power Electronics, vol. 29, pp. 582-593, Feb. 2014.
- [3] 염한범, "직류단 선트 저항을 이용한 3상 인버터의 속도 가변을 고려한 상전류 추정 방법", 부산대학교 전기공학과 공학 석사 학위 논문, 2016년 2월