

단일 전류 센서를 이용한 단전원 듀얼 인버터의 3상 전류 복원 알고리즘

변하민, 박성민

홍익대학교 전자전기융합공학과

3-Phase Current Reconstruction Algorithm for Single Source Dual Inverter Using a Single Current Sensor

Ha-Min Byun, Sung-Min Park

Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

본 논문에서는 단전원 듀얼 인버터 구조에서 단일 전류 센서를 이용한 3상 전류 복원 알고리즘을 제안한다. 모터의 벡터 제어를 위해서는 3상 전류 정보가 필수적이다. 영상분 전류 (Zero-Sequence Current, ZSC)를 제거하기 위해 120도 디커플링 전압 벡터 변조 방식을 사용할 경우, 영전압 벡터 인가 시 직류단 전류 측정이 불가능하다. 본 논문에서는 전류 센서의 위치를 인버터 사이로 변경함으로써 영전압 벡터 인가 시 전류를 측정하는 방법을 제안한다. 제안하는 알고리즘에 대한 타당성과 구현 가능성은 Matlab/Simulink 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

두 개의 인버터에 의해 공급되는 2-레벨 개방 권선형 영구 자석 전동기는 3-레벨 인버터와 동일한 공간 벡터를 생성할 수 있으며, 이에 따라 기존 Y-결선 토폴로지와 비교해서 높은 DC-link 전압 이용률을 가질 수 있다.

PMSM의 벡터 제어를 위해서는 모터의 3상 전류 정보가 필수적이며, 일반적으로 최소 두 개의 전류 센서가 요구된다.^[1] 센서의 개수를 줄이는 것은 비용 및 부피 측면에서 이점을 가지며, 스케일 오차의 문제가 줄어들기 때문에 중요시된다. 본 논문은 단일 전류 센서를 이용한 단전원 듀얼 인버터 구조의 3상 전류 복원 방법을 제안한다. 제안하는 알고리즘의 신뢰성 및 구현 가능성은 Matlab/Simulink 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 듀얼 인버터 구조의 단일 센서 전류 복원

2.1 듀얼 인버터 구조의 영상분 전류 저감 스위칭 기법

단전원을 사용하는 듀얼 인버터 구조는 영상분 경로 (Zero-sequence path)가 발생한다. 이에 따라, 의도하지 않은 ZSC가 권선에 순환 전류를 발생시켜 전력 반도체 소자에 치명적인 전류 스트레스를 초래한다. 이를 방지하기 위해서는 ZSC를 발생시키지 않는 전압 벡터 변조 방식이 요구된다. ZSC를 제거하기 위해 일반적으로 120도 디커플링 전압 벡터 변조 방식이 채택된다. 120도 디커플링 전압 벡터 변조 방식은 표 1의 영상분 전압 (Zero-Sequence Voltage, ZSV)을 발생시키지 않는 20가지의 스위칭 조합만을 사용하여 ZSC를 제거하는 방식을 의미한다.

본 논문에서 제안하는 전류복원 알고리즘의 넓은 적용을

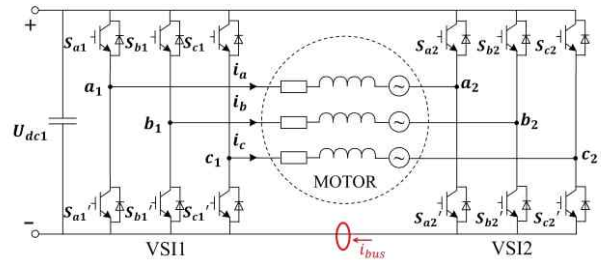


그림 1 단일 전류 센서를 포함한 단전원 듀얼 인버터 구조

표 1 스위칭 조합에 따라 생성되는 영상분 전압

Combinations of switching states	ZSV
$V_{70'}$	U_{dc}
$V_{71'}, V_{73'}, V_{75'}, V_{20'}, V_{40'}, V_{60'}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$
$V_{72'}, V_{74'}, V_{76'}, V_{10'}, V_{30'}, V_{50'}, V_{21'}, V_{23'}, V_{25'}, V_{41'}, V_{43'}, V_{45'}, V_{61'}, V_{63'}, V_{65'}$	$\frac{U_{dc}}{3}$
$V_{00'}, V_{11'}, V_{22'}, V_{33'}, V_{44'}, V_{55'}, V_{66'}, V_{77'}, V_{24'}, V_{26'}, V_{42'}, V_{46'}, V_{62'}, V_{64'}, V_{13'}, V_{15'}, V_{35'}, V_{31'}, V_{51'}, V_{53'}$	0
$V_{27'}, V_{47'}, V_{67'}, V_{01'}, V_{03'}, V_{05'}, V_{12'}, V_{32'}, V_{52'}, V_{14'}, V_{34'}, V_{54'}, V_{16'}, V_{36'}, V_{56'}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$
$V_{17'}, V_{37'}, V_{57'}, V_{02'}, V_{04'}, V_{06'}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$
$V_{07'}$	$-U_{dc}$

위해, 제안하는 알고리즘은 120도 디커플링 변조 방식에서 적용할 수 있도록 설계되었다.

2.2 듀얼 인버터 구조의 단일 센서 전류 복원

고장자 권선이 개방된 듀얼 인버터 구조에서는 3상 전류의 합이 0이 되지 않으므로 한 주기 내에서 전류 복원을 위해 필요한 정보는 3개가 된다. 따라서 유효 전압 벡터뿐만 아니라 영전압 벡터 인가 시에도 전류 측정이 요구된다.^[2] 일반적으로 단일 전류 센서를 이용한 전류 복원 시 직류단에 전류 센서가 위치한다. 그러나 듀얼 인버터 구조는 영전압 벡터 인가 시 직류단에 전류가 흐르지 않아 전류 측정이 불가능하다. 영벡터 전압 인가 시 직류단 전류 측정을 위해 연구가 진행된 바 있으나, 모든 동작 영역에서 PWM의 위상 변화가 필요하여 소프트웨어적 부담이 발생한다. 또한, 스위칭의 비대칭으로 인해 스위칭 횟수가 증가하여 전고조파 왜곡 및 스위칭 손실에 영향을 미친다.

표 2 벡터 조합에 따라 획득되는 전류와 상전류 관계

Sector	Switching State	i_{bus}	Sector	Switching State	i_{bus}
I	$V_{00'}$	$i_a + i_b + i_c$	IV	$V_{00'}$	$i_a + i_b + i_c$
	$V_{13'}$	$i_a + i_c$		$V_{51'}$	$i_b + i_c$
	$V_{24'}$	i_a		$V_{46'}$	i_b
II	$V_{00'}$	$i_a + i_b + i_c$	V	$V_{00'}$	$i_a + i_b + i_c$
	$V_{35'}$	$i_a + i_b$		$V_{51'}$	$i_b + i_c$
	$V_{24'}$	i_a		$V_{62'}$	i_c
III	$V_{00'}$	$i_a + i_b + i_c$	VI	$V_{00'}$	$i_a + i_b + i_c$
	$V_{35'}$	$i_a + i_b$		$V_{13'}$	$i_a + i_c$
	$V_{46'}$	i_b		$V_{62'}$	i_c

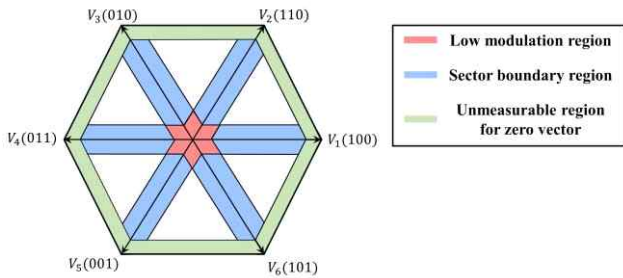


그림 2 듀얼 인버터 구조의 전류 복원 불가 영역

표 3 시뮬레이션에 사용된 듀얼 인버터의 파라미터

Parameters	Value
직류단 전압	300 [V]
d축 인덕턴스(L_d)	1.6 [mH]
q축 인덕턴스(L_q)	2.1 [mH]
고정자 저항(R_s)	0.0065 [Ω]
극 수(Pole pairs)	4

따라서 본 논문은 영전압 벡터 인가 시 전류 정보를 얻는 방법으로 직류단이 아닌 두 인버터 사이에 전류 센서를 위치시키는 것을 제안한다. 영전압 벡터 인가 시 두 인버터 사이에 Free-wheeling 전류가 흐르게 되므로 추가적인 소프트웨어적 기법 없이 표 2와 같은 전류 정보를 확보할 수 있다.

2.3 복원 불가 영역 분석

정확한 전류 정보를 얻기 위해서는 샘플링 최소 시간 T_{min} 동안 전압 벡터가 인가되어야 한다. T_{min} 은 다음과 같이 정의한다.

$$T_{min} = T_d + T_{set} + T_{conv} \quad (1)$$

T_d 는 인버터의 데드타임, T_{set} 은 전류가 안정되는데 걸리는 지연 시간, T_{conv} 은 샘플링 시간과 아날로그-디지털 변환 시간의 합이다.

듀얼 인버터 구조에서는 영전압 벡터 인가 시에도 전류 측정이 요구되기 때문에 그림 2와 같이 영전압 벡터 인가 시간이 충분하지 않은 고속 영역에서 복원 불가 영역이 발생한다.

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 단전원 듀얼 인버터 구조의 단일 전류 센서를 이용한 전류 복원 알고리즘은 Matlab/Simulink을 통한 시뮬레이션으로 검증하였으며, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 3과 같다. 그림 3과 그림 4는 10kHz의 스위칭 주기를 가지며, 전동기를

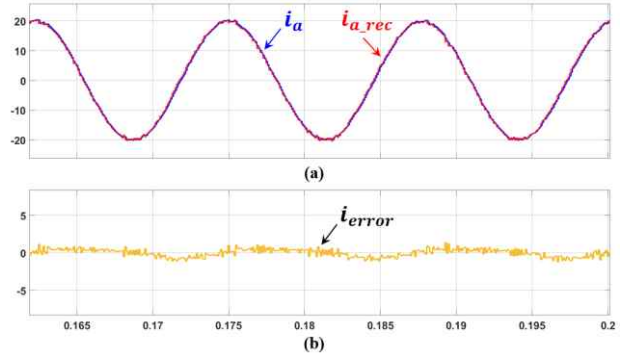


그림 3 (a) 실제 a상 전류와 복원된 a상 전류, (b) 복원된 전류와 실제 전류 간의 오차

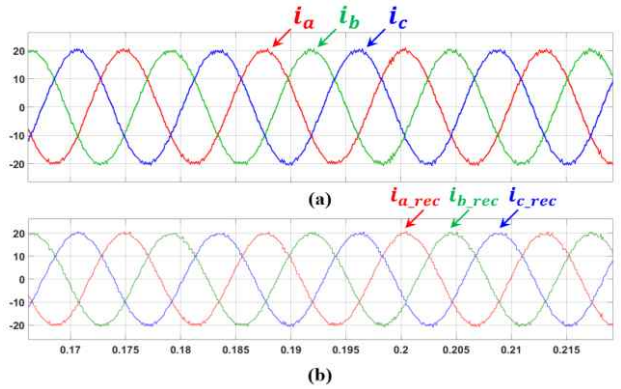


그림 4 (a) 듀얼 인버터의 실제 3상 전류 파형, (b) 복원된 3상 전류 파형

300r/min으로 구동할 때 실험 결과이다. 그림 3은 제안하는 방법을 이용해 복원한 a상 전류와 실제 전류 파형을 함께 나타냈으며, 두 전류 간의 오차는 계산을 통해 나타냈다. 두 전류 간의 오차 피크 값은 약 1.3A로 상전류의 약 3% 수준이다. 이는 제안하는 알고리즘을 통해 복원된 전류는 전체 시스템의 제어를 위해 사용될 수 있을 만큼 신뢰성을 갖는다고 판단할 수 있다. 그림 4는 제안하는 알고리즘을 이용하여 복원된 3상 전류와 실제 3상 전류를 나타내며, 단일 전류 센서를 통해 전류 복원이 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 단전원 듀얼 인버터 구조에서 단일 전류 센서를 이용한 3상 전류 복원 알고리즘을 제안하였다. 전류 센서의 위치를 두 인버터 사이로 이동시킴으로써 영전압 벡터 인가 시에도 상전류 정보를 얻어 한 주기 내에서 전류 복원을 완성할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Y.-H. Noh, W.-J. Lee, "Analysis and compensation of current measurement errors using one shunt current sensing in high-speed region", Journal of Power Electronics, Vol. 24, pp. 778-788, 2024.
- [2] C. Zhang, C. Gan, K. Ni, Z. Yu, H. Shi and R. Qu, "Phase Current Reconstruction of Open-Winding Synchronous Reluctance Motor Based on Edge-Alignment and Phase-Shift Strategy", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 5, pp. 5173-5185, May, 2022.