

직류단 단일 전류 센서를 이용한 4-레그 인버터의 전류 재구축 기법

이은우, 김도현, 이준석
단국대학교

Current Reconstruction for Four-Leg Inverter with Single DC-link Current Sensor

Eun-Woo Lee, Do-Hyeon Kim, June-Seok Lee
Dankook University

ABSTRACT

본 논문에서는 직류단 단일 전류 센서를 이용한 4-레그 인버터(Four-Leg Inverter, FLI)의 전류 재구축 기법을 제안한다. 3상 듀얼 전동기를 구동하는 FLI의 경우 직류단 단일 전류 센서로부터 최소 4상의 전류 정보를 요구하므로 2상의 전류 정보를 사용하는 기존 전류 재구축 기법 적용에 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 기존 3상 인버터와 비교하여 단일 전류 센서로부터 전류 측정 불가능 영역의 차이점을 설명하며, 측정 불가능 영역에서 최소 전압 주입 기법과 스위칭 보상 기법을 통한 전류 측정 방법을 제안한다. 또한, FLI의 스위칭 상태에 따른 각 전동기의 상전류를 재구축하는 기법을 제안한다. 제안한 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

4-레그 인버터(Four-Leg Inverter, FLI)는 3상 듀얼 전동기 구동 시스템 중 하나로 펄스폭 제어 시 2대의 3상 전류 정보를 요구한다. 일반적으로, 전동기 각 상에 위치한 전류 센서로부터 3상 전류를 측정하므로 최소 4개의 전류 센서가 필요하다. 그러나, 여러 개의 전류 센서는 시스템의 크기와 비용을 증가시키며, 각 전류 센서의 내부 파라미터 오차로 인한 전류 측정 오류를 야기할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 직류단 단일 전류 센서를 이용한 전류 재구축 기법이 연구되고 있다.^[1,2]

전류 재구축 기법은 단일 전류 센서로부터 측정되는 전류 정보를 토대로 3상 전류로 재구축하는 기법이다. 이때, 전류 정보는 인버터의 스위칭 상태에 따라 변화하고 전류 측정을 위한 최소 인가 시간(T_{min})이 필요하다. T_{min} 이 확보되지 않는 전류 측정 불가능 영역(dead band)은 기존 3상 인버터와 다르게 영벡터와 유효 전압 벡터의 경계면에만 존재할 뿐만 아니라 두 전동기를 하나의 인버터로 제어하는 토폴로지 구조에 의해 새로운 dead band가 발생한다. 또한, 기존의 단일 전류 센서는 유효 전압 벡터에만 전류 정보를 얻을 수 있으나, FLI의 경우 영벡터와 유효 전압 벡터로부터 전류 정보를 얻어야 한다.

본 논문에서는 FLI의 dead band를 피하고 전류 측정하는 기법을 제안한다. dead band에서 반 주기동안 각 지령 전압 벡터(V_{s1}^* , V_{s2}^*)에 최소 전압을 인가하여 T_{min} 을 확보한다. 이때,

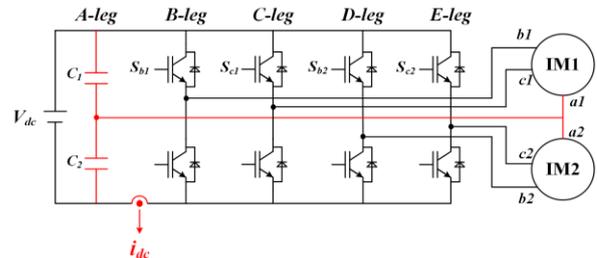


그림1 직류단 단일 전류 센서를 이용한 Four-Leg Inverter
Fig.1 Circuit of Four-Leg Inverter with single Dc-link current sensor

단일 전류 센서로부터 정확한 전류를 측정할 수 없기 때문에 확보되지 않는 T_{min} 은 스위칭 보상 기법을 통해 보상한다. 또한, FLI에서 단일 전류 센서를 통한 전류 정보를 분석하고 상전류를 재구축하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. Four-Leg Inverter의 구조 및 변조 기법

2.1 Four-Leg Inverter의 구조

그림 1은 2대의 3상 유도 전동기를 구동하는 FLI의 회로도이며, 2개의 커패시터와 8개의 스위치, 그리고 2대의 유도 전동기로 구성된다. B, C 레그는 IM1의 b1과 c1상과 D, E 레그는 IM2의 b2와 c2상에 연결된다. 커패시터로 구성된 A 레그는 두 전동기의 a1, a2상에 공통으로 연결되는 구조이다.

2.2 Four-Leg Inverter의 변조 기법

커패시터의 중성점으로부터 a상 전류가 나오는 FLI의 구조적 특성에 의해 직접적으로 a상을 변조할 수 없다. 따라서, 3상 전압의 균형을 맞추기 위해 선간 전압을 통해 b, c상을 변조하는 ETAM 변조 기법을 사용한다.^[3] 이때, b, c상 최종 지령 전압(v_{bi}^* , v_{ci}^* , $i=1, 2$)은 다음과 같다.

$$\begin{cases} v_{bi}^* = v_{bmi}^* - v_{ani}^* \\ v_{ci}^* = v_{cni}^* - v_{ani}^* \end{cases} \quad (i=1,2) \quad (1)$$

여기서, v_{pmi}^* 는 i번째 전동기의 p상 지령 전압을 의미한다.

3. 직류단 단일 전류 센서를 이용한 전류 재구축 기법

3.1 전류 측정 불가능 영역

그림 2는 스위칭 한 주기(T_s)에서 FLI의 스위칭 동작을

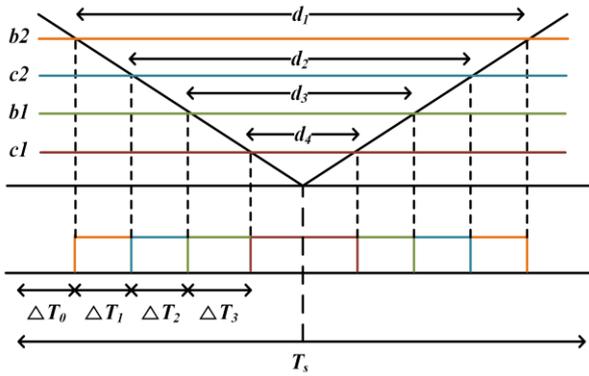


그림2 FLI의 스위칭 상태
Fig.2 Switching pattern of FLI

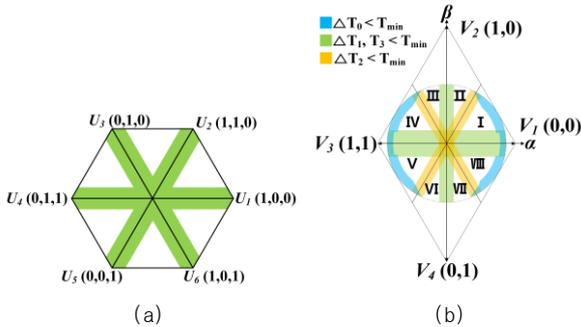


그림3 인버터에 따른 전류 측정 불가능 영역 (a) 3상 인버터 (b) FLI
Fig.3 Schematic diagram of the dead band (a) with 3-leg inverter (b) with FLI

나타낸다. 여기서 ΔT_k ($k=0, 1, 2, 3, 4$)는 각 스위칭 사이의 시간을 의미하며 스위칭 듀티의 차로 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta T_0 &= 0.5T_s(1-d_1), & \Delta T_1 &= 0.5T_s(d_1-d_2), \\ \Delta T_2 &= 0.5T_s(d_2-d_3), & \Delta T_3 &= 0.5T_s(d_3-d_4). \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 d_n ($n=1, 2, 3, 4$)는 스위칭 듀티이며 지령 전압의 크기 순으로 결정된다. 즉, 크기가 가장 큰 지령 전압은 d_1 , 가장 작은 지령 전압은 d_4 이다.

직류단 단일 전류 센서로부터 측정되는 전류(i_{dc})의 정확도와 신뢰성을 높이기 위해 스위칭 동작 후 최소 T_{min} 이후에 측정해야 한다. 이때, T_{min} 은 i_{dc} 의 정착 시간(T_{set}), 데드 타임 시간(T_{dead}), A/D 변환 시간(T_{ad})의 합으로 정의된다.

$$T_{min} = T_{set} + T_{dead} + T_{ad}. \quad (3)$$

그림 3은 3상 인버터와 FLI에서 IM1의 dead band를 공간벡터로 나타낸 그림이다. 여기서, dead band는 유효 전압 벡터의 인가 시간이 T_{min} 을 만족하지 못해 전류 재구축을 할 수 없는 영역을 의미한다. 그림 3(a)는 3상 인버터의 경우를 나타내며, 전류 정보를 유효 전압 벡터로부터 얻을 수 있다. 이에 따라, dead band가 각 유효 벡터($U_1 \sim U_6$)의 경계에 위치하는 것을 알 수 있다. 그러나 FLI의 경우 스위치가 모두 꺼진 영벡터에서 커패시터로부터 나오는 전류 정보가 존재한다. 따라서, 전류 정보를 얻을 없는 ΔT_2 를 제외한 간격은 T_{min} 을 만족해야 하므로 그림 3(b)와 같이 dead band가 나타난다. 이때, 기존 3상 인버터와 다르게 ΔT_2 에 의한 새로운 dead band가 존재한다.

3.2 FLI의 전류 재구축 기법

dead band에서 얻은 전류 정보로 전류 재구축을 할 수 없다.

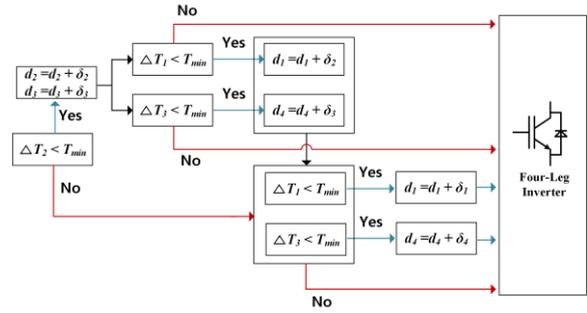


그림4 스위칭 보상 기법의 동작 시퀀스
Fig.4 The sequence of the switching compensation method

따라서, dead band에서 전류 측정을 가능하도록 하는 최소 전압 주입 기법을 사용한다.^[2] ΔT_k 가 T_{min} 을 만족하도록 좌측 $0.5T_s$ 동안 V_{s1}^* , V_{s2}^* 에 샘플링 전압(V_{samp1} , V_{samp2})을 주입한다. 그 결과, 반 주기동안 전류 측정이 가능해진다. 이후 나머지 우측 $0.5T_s$ 동안 V_{samp1} , V_{samp2} 만큼 차감함으로써 한 주기의 V_{s1}^* , V_{s2}^* 평균은 주입 전과 같아진다. 이때 주입된 지령 전압 벡터(V_{samp1}^* , V_{samp2}^*)와 차감된 지령 전압 벡터(V_{comp1}^* , V_{comp2}^*)는 다음과 같다.

$$V_{samp1}^* = V_{s1}^* + V_{samp1}, \quad V_{samp2}^* = V_{s2}^* + V_{samp2}. \quad (4)$$

$$V_{comp1}^* = V_{s1}^* - V_{samp1}, \quad V_{comp2}^* = V_{s2}^* - V_{samp2}. \quad (5)$$

여기서, 식 (4)와 식 (5)의 V_{samp1}^* , V_{samp2}^* , V_{comp1}^* , V_{comp2}^* 는 α - β 축 좌표계의 지령 전압 벡터로 좌표 변환을 통해 3상 지령 전압으로 변환되며, 식 (1)의 v_{bl}^* , v_{cl}^* 으로 계산된다.

단일 전류 센서로부터 재구축된 전류는 실시간으로 추종하지 않아 오차가 존재한다. 따라서, ΔT_k 는 T_{min} 보다 작을 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 스위칭 보상 기법을 제시한다. v_{bl}^* , v_{cl}^* 에 확보되지 않는 시간(δ_n , $n=1, 2, 3, 4$)만큼 좌측 $0.5T_s$ 동안 주입하고 나머지 우측 $0.5T_s$ 동안 차감하는 방식이다. 여기서, δ_n 은 d_n 에 주입되는 시간이며 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{cases} \delta_1 = T_{min} - \Delta T_1 \\ \delta_2 = T_{min} - 0.5\Delta T_2 \\ \delta_3 = -T_{min} + 0.5\Delta T_2 \\ \delta_4 = -T_{min} + \Delta T_3 \end{cases} \quad (6)$$

이때, 보상하는 크기를 최소화하기 위해 δ_1 , δ_2 는 스위칭 동작을 좌측으로 이동시키고, δ_3 , δ_4 는 우측으로 이동시킨다. 스위칭 보상 기법의 동작 순서는 그림 4와 같다. ΔT_2 가 T_{min} 보다 작은 경우 d_2 , d_3 에 δ_2 , δ_3 를 주입한다. 주입된 d_2 , d_3 에 의해 ΔT_1 , ΔT_3 가 T_{min} 보다 작은 경우 d_1 에 δ_1 , d_4 에 δ_4 를 주입한다. 마찬가지로, 주입된 d_1 과 d_4 를 이용하여 ΔT_1 , ΔT_3 가 T_{min} 보다 작은 경우 d_1 에 δ_1 , d_4 에 δ_4 를 주입한다.

좌측 $0.5T_s$ 에서 측정된 i_{dc} 는 인버터의 스위칭 상태에 따라 각 전동기의 상전류 정보를 나타낸다. 커패시터 중성점으로부터 a상 전류가 나오므로 스위치가 모두 꺼진 영벡터에서는 두 a상 전류의 합으로 나타나며, 각 전동기의 스위칭 동작에 따라 얻은 전류 정보는 다음과 같이 표현된다.

$$i_{dc} = i_{a1} + i_{a2} + S_{b1}i_{b1} + S_{c1}i_{c1} + S_{b2}i_{b2} + S_{c2}i_{c2} \quad (7)$$

i_{dc} 로부터 측정된 영벡터의 전류 정보와 ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 에서 얻은 전류 정보를 토대로 각 전동기의 3상 전류를 재구축한다.

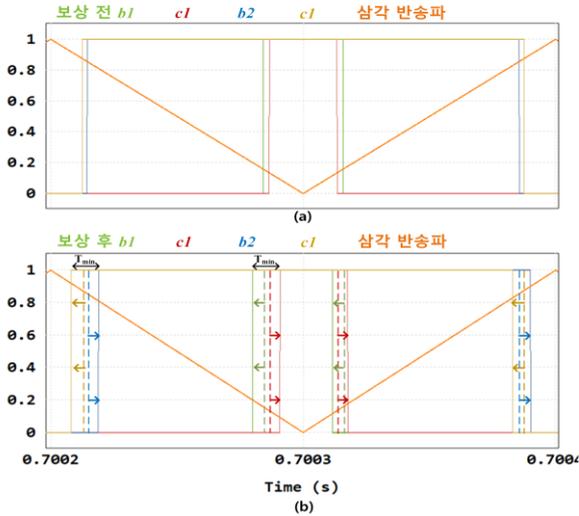


그림5 전류 측정 불가능 영역에서의 스위칭 상태 (a) 보상 전 스위칭 상태 (b) 보상 후 스위칭 상태
Fig.5 Switching pattern in the dead band (a) without compensation (b) with compensation

표 1 유도 전동기의 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameters of induction motor

Rated Voltage	380 [V]	Motor Speed	300 [rpm]
Rated Frequency	60 [Hz]	Magnetic Inductance	209.7[mH]
Rated Speed	1750 [rpm]	Stator, Rotor Inductance	221.36[mH]
Rated Current	7.493 [A]	Rotor Resistance	2.7369 [Ω]
Pole	4	Stator Resistance	1.9625 [Ω]

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

제안하는 직류단 단일 전류 센서를 이용한 FLI의 전류 재구축 기법은 표 1의 유도 전동기와 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 직류단 전압 V_{dc} 는 400V, T_s 는 200 μ s로 진행하였으며 T_{min} 는 10 μ s로 가정하였다. 또한, 두 전동기의 위상차는 180° 로 유지함으로써 중성점 전압차에 의한 영향을 배제하였다.

그림 5는 Sector I에서 dead band에 위치한 경우 보상 전 스위칭 상태와 보상 후 스위칭 상태를 나타낸다. 그림 5(a)와 같이 ΔT_1 , ΔT_3 가 T_{min} 보다 작아 전류가 측정되지 않는 부분이 발생한다. 제안한 기법을 통해 좌측 0.5 T_s 동안 T_{min} 이 확보되고 우측 0.5 T_s 동안 주입된 크기만큼 차감되는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 각 전동기의 3상 전류와 재구축 전류를 나타낸다. 여기서 I_{a1_est} , I_{b1_est} , I_{c1_est} 는 IM1의 재구축 전류, I_{a2_est} , I_{b2_est} , I_{c2_est} 는 IM2의 재구축 전류이다. 180°의 위상차로 동작함에 따라 각 전동기의 전류는 180°의 위상차로 출력하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 전류 측정 가능 영역에서 전류가 측정됨으로써 재구축 전류가 3상 전류에 따라 재구축하는 것을 확인할 수 있다.

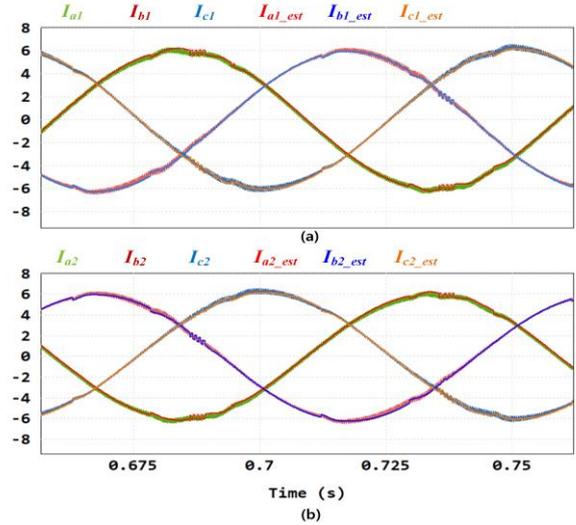


그림6 3상 전류와 재구축 전류 파형 (a) IM1의 파형 (b) IM2의 파형
Fig.6 The waveform of 3-phase current and reconstructed current (a) for IM1 (b) for IM2

4. 결론

본 논문은 직류단 단일 전류 센서를 이용한 FLI의 전류 재구축 기법을 제안하였다. FLI에서 발생하는 인버터 스위칭 상태에 따른 전류 정보와 dead band를 분석하였다. 또한, dead band를 피하기 위해 최소 전압 주입 기법과 스위칭 보상 기법을 적용하였다. 그 결과, 제안 기법 적용을 통해 FLI의 단일 전류 센서 기반 출력 전류 재구축이 가능함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 지원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0017120, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)

참고 문헌

- [1] Y. Gu, F. Ni, D. Yang and H. Liu, "Switching-State Phase Shift Method for Three-Phase-Current Reconstruction With a Single DC-Link Current Sensor," in *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 11, pp. 5186-5194, Nov. 2011.
- [2] J. -I. Ha, "Current Prediction in Vector-Controlled PWM Inverters Using Single DC-Link Current Sensor," in *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 716-726, Feb. 2010.
- [3] Y. Kimura, M. Hizume, K. Oka, and K. Matsuse, "Independent vector control of two induction motors with five-leg inverter by the expanded two arm PWM method," *IEEJ Int. Power Electron. Conf.*, pp. 613-616, 2005.