

단상 컨버터/3상 인버터 시스템에서 공통모드 전압에 의한 누설전류 분석

김원재, 김상훈

강원대학교 BIT 의료전기전자융합공학

Analysis of Leakage Current by Common-Mode Voltage in Single-Phase Converter/Three-Phase Inverter System

Won-Jae Kim, Sang-Hoon Kim

BIT Electrical & Medical Convergent Eng., Kangwon National Univ.

ABSTRACT

본 논문에서는 단상 컨버터/3상 인버터 시스템에서 공통모드에 의한 누설전류를 분석하였다. 컨버터/인버터 시스템의 공통모드 전압은 시스템에 존재하는 기생 임피던스를 총방전함으로써 수 A의 누설전류를 발생시킨다. 이에 본 논문에서는 단상 컨버터/3상 인버터 시스템에서 컨버터 입력 측 변압기와 전동기의 기생 임피던스를 고려하여 누설전류를 분석하였으며, 누설전류를 감소하기 위해 공통모드 전압 저감하는 방법을 제안한다. 모의실험을 통하여 제안된 기법에 의한 누설전류의 저감 효과를 확인하였다.

1. 서 론

PWM 컨버터는 에너지 사용의 효율성 증대와 관련하여 철도차량, EV(Electric Vehicle) 충전 인프라 등에서 AC/DC 전력 변환에 주로 사용되는 장치이다. 또한, 인버터는 EV, 드론, 3D 프린터 등 교류전동기의 가변속 응용분야에서 광범위하게 적용되고 있다. 이러한 컨버터와 인버터는 장비나 사람에게 심각한 해를 끼칠 수 있는 전압 형성을 방지하기 위해 의도적으로 접지를 한다. 이 경우 컨버터와 인버터의 스위칭에 의해 발생하는 공통모드 전압으로 인해 접지를 통해 흐르는 누설전류가 발생할 수 있다. 누설전류는 스위칭마다 스파이크성으로 발생하며 수십 kHz에서 수 MHz의 주파수대역을 가지므로 변압기와 전동기의 절연과, 전자파 장애(Electromagnetic Interference, EMI) 등의 문제가 발생할 수 있다. 또한, 공통모드 전압이 형성되는 전위점과 접지점 사이에 존재하는 기생 임피던스 따라 수 A의 누설전류가 흐를 수 있다. 이에 본 논문에서는 교류전동기를 구동하는 단상 컨버터/3상 인버터 시스템에서 컨버터 입력 측 변압기와 전동기에 존재하는 기생 임피던스를 고려하여 누설전류를 분석하였으며, 누설전류를 감소하기 위해 공통모드 전압 저감하는 방법을 제안한다.

2. 단상 컨버터/3상 인버터의 누설전류 저감

2.1 공통모드 전압과 누설전류

그림 1은 단상 컨버터/3상 인버터 시스템을 나타내며 변압기의 1차 측과 전동기의 외함이 동일한 점에 접지되어 있다.

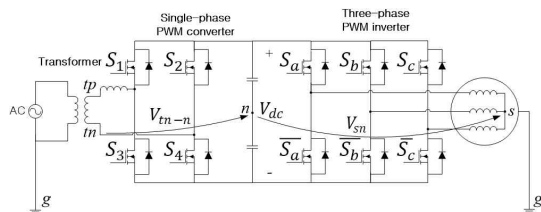


그림 1 단상 컨버터/3상 인버터 시스템

이러한 시스템의 공통모드 전압은 전동기 권선의 중성점 s 와 변압기 단자 tn 사이의 전압 V_{s-tn} 으로 나타나며 고정자 권선의 중성점과 DC링크 중성점 n 사이의 전압 V_{sn} 과 DC링크 중성점과 변압기 단자 tn 사이 전압 V_{n-tn} 의 합으로 주어진다.

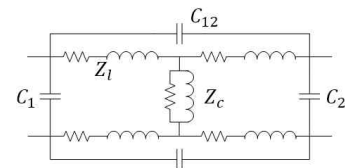
$$V_{s-tn} = V_{sn} + V_{n-tn} \tag{1}$$

$$V_{sn} = \frac{V_{dc}}{3}(S_a + S_b + S_c) - \frac{V_{dc}}{2} \tag{2}$$

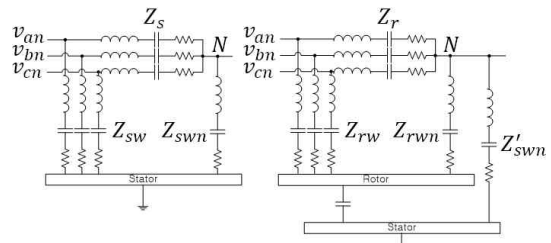
$$V_{n-tn} = \frac{V_{dc}}{2}(1 - 2S_2) \tag{3}$$

V_{sn} 은 인버터에서 각 레그(leg)의 윗상의 스위칭마다 $V_{dc}/3$ 의 크기로 변동하며 V_{n-tn} 은 컨버터에서 S_2 의 스위칭마다 V_{dc} 의 크기로 변동한다. 이러한 공통모드 전압은 변압기와 전동기의 기생 임피던스에 따라 수 A의 누설전류를 발생시킨다.

그림 2는 변압기와 전동기의 기생 임피던스를 나타낸다. 그림 2 (a)는 단자 간에 존재하는 기생 캐패시턴스 성분이 고려된 변압기의 등가회로를 나타내며 입력단자 간에 C_1 , 출력단자 간에 C_2 그리고 입출력 단자 간에 C_{12} 의 기생 캐패시턴스가 존재한다. 그림 2 (b)는 전동기의 누설전류와 관련된 영상 임피던스 회로이다^[2]. 고정자 영상임피던스 Z_s 와 회전자 영상 임피던스 Z_r 이 권선에 존재하며 권선과 고정자 간, 권선과 회전자 간, 중성점 N과 고정자 간에 각각 Z_{sw} , Z_{sr} , Z_{swN} 의 기생 임피던스 성분이 나타난다. 교류전동기를 구동하는 컨버터/인버터의 누설전류는 식(1)의 공통모드 전압이 그림 2의 기생 임피던스에 인가됨으로써 발생하게 된다.



(a) 변압기 등가회로



(b) 전동기의 영상임피던스 회로

그림 2 변압기의 기생 임피던스를 고려한 등가회로와 전동기의 영상임피던스 회로

단상 컨버터의 출력 전압이 280V인 상황에서 인버터에 대칭 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)을 적용하는 경우 on-sequence 동안 스위칭에 따른 공통모드 전압과 누설 전류가 그림 3에 나타나있다. 공통모드 전압은 V_{dc} 크기까지 나타나며 컨버터의 스위칭 시 높은 전압변동률(dv/dt)을 보인다. 또한, 누설전류의 peak-peak가 실효값에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 스파이크성으로 나타나는 누설전류는 변압기와 전동기의 절연 누적 스트레스와 절연과피 원인이 되므로 변압기와 전동기 보호를 위해 저감할 필요가 있다.

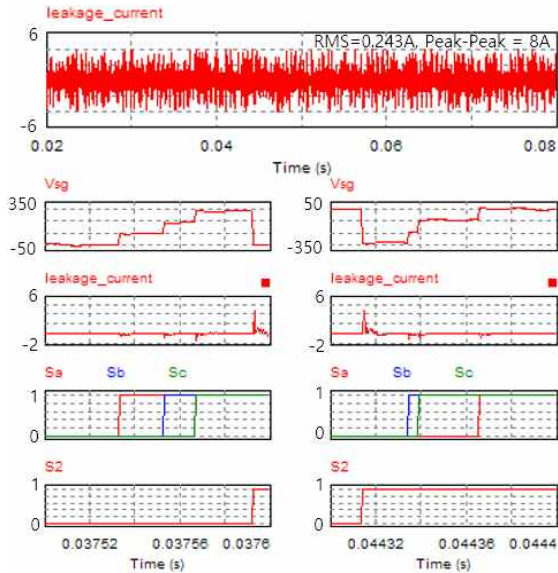


그림 3 기존 대칭 SVPWM 적용 시 스위칭에 따른 공통모드 전압과 누설전류

2.2 누설전류 저감 방법

누설전류는 그림 3에 나타나있듯이, 컨버터와 인버터의 스위칭에 동기 되어 나타나며 그 크기는 공통모드 전압의 전압변동률과 비례한다. 따라서 누설전류를 저감하기 위해서는 공통모드 전압 자체를 제거하거나 전압변동률을 저감하는 방법을 사용해야한다. 단상 컨버터/3상 인버터 시스템의 경우 식(1)~(3)을 통해 컨버터와 인버터의 스위칭시점을 일치시킴으로써 공통모드 전압을 저감할 수 있으며 컨버터의 S_2 스위칭시점에 일치시키는 인버터의 스위칭시점에 따라 $2V_{dc}/3$ 또는 $V_{dc}/3$ 크기로 공통모드 전압의 크기로 제한할 수 있다. 공통모드 전압을 $2V_{dc}/3$ 크기로 제한하기 위해서는 그림 3에 나타났는 V_{dc} 크기의 공통모드 전압을 제거해야한다. 그림 3로부터 V_{dc} 전압은 인버터 3상 지령전압 중 가장 작은 상의 스위칭시점을 컨버터의 S_2 스위칭시점과 일치시키는 경우 제거할 수 있다. 또한, $-V_{dc}$ 전압은 인버터 3상 지령전압 중 가장 큰 상의 스위칭시점을 컨버터의 S_2 스위칭시점과 일치시키는 경우 제거할 수 있음을 알 수 있다. 공통모드 전압을 $V_{dc}/3$ 크기로 제한하기 위해서는 $2V_{dc}/3$ 크기의 전압을 제거해야한다. $2V_{dc}/3$ 전압은 인버터의 중간 크기 상의 스위칭 때 발생하므로 인버터의 지령전압 중 중간 크기 상의 스위칭시점을 컨버터의 S_2 스위칭시점과 일치시킴으로써 제거할 수 있다. 따라서 단상 컨버터/3상 인버터 시스템에서 스위칭시점을 일치시키는 방법으로 공통모드 전압의 크기와 전압변동률을 저감할 수 있으며 이에 따라 누설전류를 감소할 수 있다.

3. 모의실험

제안된 방법을 적용하였을 경우 공통모드 전압과 누설전류의 저감 효과를 살펴보기 위해 그림 2의 기생 임피던스가 고려된 단상 컨버터/3상 인버터 시스템에 대해 모의실험을 진행하였다. 컨버터와 인버터의 스위칭 주파수는 5kHz이며 제어주기는 10kHz로 동기제어를 수행하였다.

그림 4는 제안된 기법을 적용한 경우 스위칭에 따른 공통모드 전압과 누설전류를 나타낸다. 제안된 기법으로 공통모드 전압이 $2V_{dc}/3$ 또는 $V_{dc}/3$ 크기로 제한됨을 알 수 있다. 또한, 스위칭시점이 일치함으로써 전압변동률이 감소됨을 알 수 있다. 누설전류는 실효값이 0.243A에서 0.173A로 약 29%가 저감되었으며, peak-peak는 8A에서 5A로 37.5%가 저감됨을 알 수 있다. 따라서 제안된 기법으로 공통모드 전압을 저감함으로써 누설전류를 저감할 수 있다.

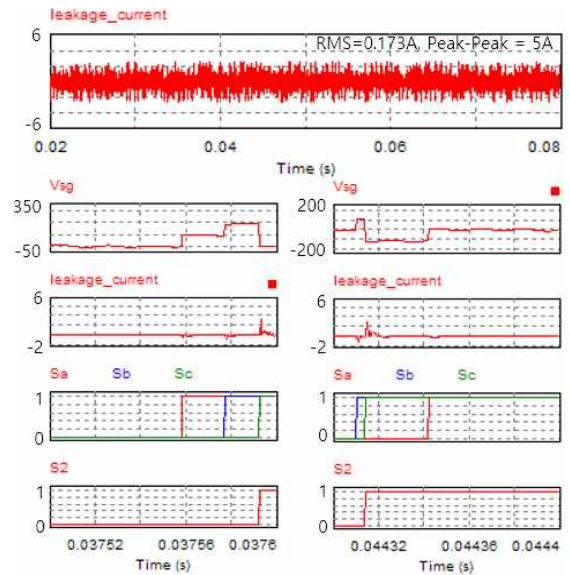


그림 4 제안된 기법을 적용 시 공통모드 전압과 누설전류

3. 결 론

본 논문에서는 단상 컨버터/3상 인버터 시스템에서 공통모드 전압에 의한 누설전류를 컨버터 입력 측 변압기와 전동기의 기생 임피던스를 고려하여 분석하였다. 스파이크성으로 나타나는 누설전류를 저감하기 위해 컨버터와 인버터의 스위칭시점을 일치시키는 방법으로 공통모드 전압을 저감하였다. 제안된 기법에 따른 누설전류의 저감 효과를 모의실험을 통해 확인하였다.

본 연구는 에너지기술평가원(에너지기술개발사업 산업기술혁신사업 : 과제번호 20183010140980)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Sang-Hoon Kim, Electric Motor Control DC, AC, and BLDC Motors, Elsevier Inc. ch.7, 2017.
- [2] S. Chen, T. A. Lipo, and D. Fitzgerald, "Modeling of Bearing Currents in PWM Inverter Drives," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 6, pp. 1365-1370, Nov./Dec., 1996.