

인버터로 구동되는 단상 유도전동기의 출력 누설전류 억제 대책에 관한 연구

박찬근^{*} · 박정환^{*} · 최승현^{*} · 이성근^{*}
^{*}한국해양대학교

A Study on the Rejection of A Output Leakage Current of Single Phase Induction Motor Driven a Inverter

Chan-kun Park^{*} · Jeung-hwan Park^{*} · Seung-hyun Choi^{*} · Sung-geun Lee^{*}
^{*}Korea Maritime University
E-mail : jiwonland@hanmail.net

요 약

본 논문은 PWM 인버터로 구동되는 단상 유도전동기의 출력 누설 전류 억제에 관한 방법을 제안한다. 제안된 방법은 누설 전류 피드백 회로가 부가된 인버터 시스템에 있어서 저차 고조파 저감을 위한 새로운 PWM 스위칭 알고리즘을 적용한 것이다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다.

ABSTRACT

This paper proposes the method to reduce output leakage current in single phase induction motor driven a PWM inverter. A proposed method applies to a new PWM switching algorithm to reduce low-order harmonic in an inverter system with a feedback circuit of leakage current. Simulation is done to confirm a validity of method proposed.

I. 서 론

최근 IGBT나 MOSFET 등의 고속 스위칭 소자의 발전에 힘입어 PWM 인버터의 스위칭 주파수의 고주파화가 진행되고 있다. 이에 따라 다음과 같은 새로운 문제점들이 제기되고 있다.

- 전동기 권선과 외함 간의 부유 용량을 통해서 접지선에 흐르는 고주파 누설 전류^[1]
- 전력용 반도체 소자와 방열판 사이의 부유 용량을 통해서 흐르는 고주파 누설 전류^[2]
- 전도성과 방사성 전자방해(EMI)^[3]
- 전동기 권선 절연의 열화^[4]

이러한 문제들은 인버터의 고속 스위칭으로 발생하는 전압, 전류의 급격한 변화에 의해 발생된다. 이들 중 고주파 누설 전류는 인버터의 전류제어에 악영향을 주거나, 누전 차단기의 오동작을 일으킨다. 이러한 고주파 누설 전류를 억제하기 위

해 트랜지스터 등을 이용한 액티브 커먼 모드 노이즈 캔슬러(ACC)를 이용하는 방법^[5]과 커먼 모드 트랜스를 이용하는 방법^[6] 등의 여러 가지 대책이 연구되어지고 있다. 그러나 이러한 방식은 보상 회로를 추가해야하는 등의 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 고주파 누설 전류를 저감하기 위해 새로운 PWM 스위칭 방식과 고주파 누설 전류를 피드백 시키는 방법을 제시한다. 이 방법은 별도의 보상 회로를 추가하지 않는 이점이 있다.

Pspice 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

II. 본론

1. 인버터 출력 누설 전류

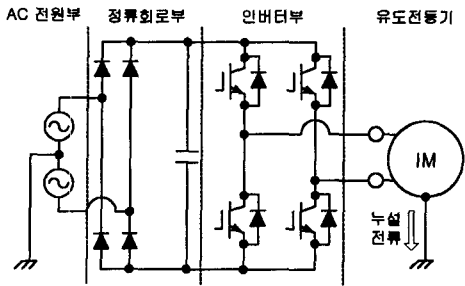


그림 1 고주파 누설전류 경로

그림 1은 단상 유도 전동기 PWM 인버터 제어 시스템에서 출력 누설 전류의 경로를 나타낸 것이다. PWM 인버터는 펄스폭 변조를 통해 DC 전원을 AC 전원으로 변환하는 전력 변환 장치로 스위칭 작용에 의해 선로의 인덕턴스 및 전동기 권선과 외함 사이 등에 존재하는 부유 용량을 통하여 고주파 누설 전류가 흐른다. [1][7]

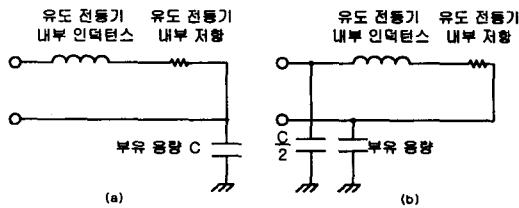


그림 2 전동기 모델

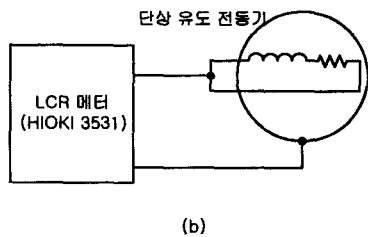
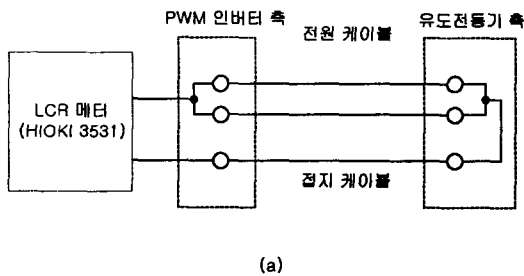


그림 3 케이블 인덕턴스 및 유도 전동기 임피던스 측정

그림 2(a)와 (b)는 전동기의 부유 용량을 고려한 2종류의 전동기 모델을 나타낸다.

그림 2(a)의 경우, 부유 용량을 통해 흐르는 누설전류는 전동기 내부 인덕턴스와 권선 저항의 영향을 받는다. 반면 그림 2(b)의 경우, 고주파 누설전류가 전동기의 권선으로 흐르지 않으므로 전동기 내부 인덕턴스와 권선 저항의 영향을 받지 않기 때문에 본 논문에서는 후자의 모델을 사용한다.

고주파 누설 전류의 해석을 위해, 케이블 임피던스 값과 부유 용량 값을 측정하여야 한다. 전동기와 인버터 사이의 케이블 임피던스와 부유 용량을 측정하는 방법은 그림 3과 같다. [1]

케이블 임피던스를 측정하기 위해, 그림 3(a)와 같이 전원 케이블을 인버터 측과 전동기 측의 양단을 단락시킨다. 단락시킨 전원선을 접지선에 접속하여, LCR 메터(HIOKI 3531)를 이용해 케이블의 인덕턴스를 측정하였다. 이와같은 방법으로 측정한 인덕턴스의 값은 6 [uH]이다.

그림 3(b)와 같이 접속하여 전동기의 부유 용량을 측정한 결과, 전동기 외함과 권선 간의 임피던스(부유 용량과 직렬저항) 값은 부유 용량 12[nF], 직렬 저항 150[Ω]이었다.

2. 누설 전류 억제 대책

누설 전류를 억제하기 위해 고주파 전류 피드백 방식과 고주파 저감을 위한 새로운 PWM 방식을 동시에 사용하였다.

그림 4에 제안한 시스템 회로도를 나타내었다.

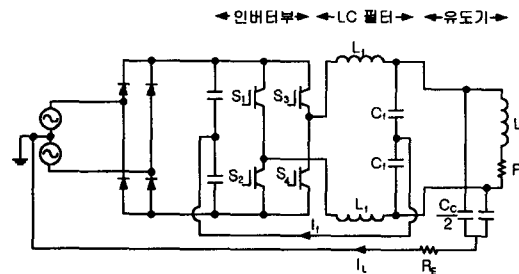


그림 4 제안된 시스템 회로도

여기서 R_E 는 접지선의 저항, C_C 는 부유 용량, L_M 과 R_M 은 전동기 권선의 인덕턴스와 내부 저항이며, I_f 는 피드백 전류, I_L 은 고주파 누설 전류이다.

A. 고주파 전류 피드백 방식

고주파 전류를 전원으로 피드백 하기 위해, 출력단과 DC-link부의 평활용 콘덴서를 2개로 나누어 직렬 연결하고, 그 중성점을 DC-link 부의 평활용 콘덴서의 중성점으로 연결하였다.

LC필터는 PWM 인버터의 스위칭 리플 소거용

이고, 리액터와 콘덴서로 구성된다.

B. 고조파 저감을 위한 PWM 제어방식

그림 5는 삼각파 비교 방식에 의한 PWM 방식이다. 그림 5(a)에 표시한 것과 같이 신호파(정현파)와 캐리어파(삼각파)와의 높이를 비교해 그림 5(b)에 나타낸 높이 $+E_d$ 및 $-E_d$ 의 PWM 출력전압을 얻는다.

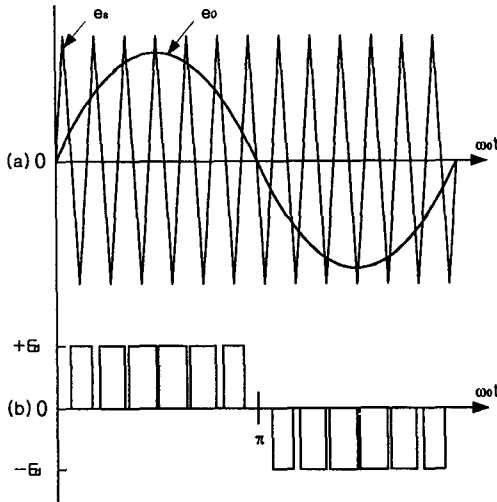


그림 5 일반적인 PWM 방식 및 파형

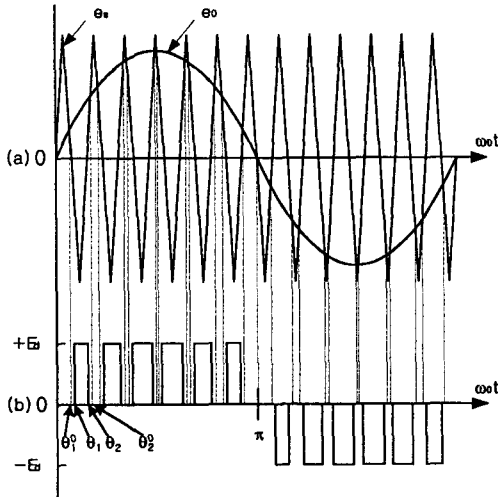


그림 6 제안한 PWM 방식 및 파형

그림 6은 본 논문에서 제안하는 방식에 의한 PWM 파형이다. 그림 6(a)는 그림 5(a)와 같지만, 그림 6(b)에 나타낸 것과 같이 삼각파 비교 방식으로 정한 시간보다 조금씩 비켜 위상 $\theta_1, \theta_2, \dots$ 로 스위칭의 on-off를 행하고, 높이 $+E_d$ 및 $-E_d$

의 PWM 출력전압을 얻는다. 그림 6의 스위칭 방식으로 출력 전압에 포함되어 있는 저차 고조파 성분을 경감 할 수 있다.

그림 6(b)의 PWM 파형은 반주기내에 p개의 펄스가 있는 대칭성 및 반파 대칭성을 가진 파형이다. 즉, 아래의 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} f(\omega_0 t) &= -f(-\omega_0 t) \dots \dots \dots (1) \\ f(\omega_0 t) &= -f(\omega_0 t - \pi) \end{aligned}$$

여기서, ω_0 는 신호파의 각주파수이다. 식 (1)에 의해, 고조파 성분의 코사인항과 우수차수가 사라진다. 그러므로, 그림 6(b)의 PWM파형을 푸리에 급수 전개할 때는, 신호파의 1/4주기만 생각하면 된다. 펄스의 높이는 E_d 이고, 펄스의 on-off의 위상을 순차적으로 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 로 하면 푸리에 계수 a_k 는 식 (2)와 같다.

$$a_k = \frac{4E_d}{k\pi} \sum_{j=1}^p (-1)^{j-1} \cos k\theta_j \dots \dots \dots (2)$$

단 $k=1, 3, 5, \dots$

여기서, p는 신호파의 반주기에서의 펄스 개수이다. 펄스 개수는 캐리어파 주파수 f_s 와 신호파 주파수 f_0 의 관계에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$p = \frac{1}{2}(f_s/f_0 - 1) \dots \dots \dots (3)$$

그러므로, PWM 출력전압 e_c 를 구하면 다음과 같다.

$$e_c = \sum_{k=1, 3, \dots}^{\infty} a_k \sin k\omega_0 t \dots \dots \dots (4)$$

그림 6(b)는 삼각파 캐리어 주파수(f_s)가 신호파 주파수(f_0)의 13배가 될 경우의 PWM 파형을 나타냈다. 따라서, 식 (3)으로부터 p는 6이다. 식 (4)에서 $k=1, 3, 5, \dots, 11$ 이다. 푸리에 함수 a_1, a_2, \dots, a_{11} 은 각각 기본파, 제3고조파, ..., 제11고조파의 진폭을 나타낸다.

기본파 진폭 a_1 을

$$a_1 = \frac{4E_d}{\pi} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2 + \cos \theta_3 - \dots - \cos \theta_6) \dots \dots \dots (5)$$

로 두고, 제3차부터 제11차까지의 고조파의 진폭을 전부 0으로 두면,

$$a_3 = a_5 = \dots = a_{11} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

6개(p개)의 연립방정식을 얻을 수 있다.

연립방정식을 만족하는 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6$ 의 해는 얼마든지 있지만, 캐리어파와 신호파의 교점으로 정한 $\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \theta_6^0$ 를 초기값으로 하여 해를 구한다.

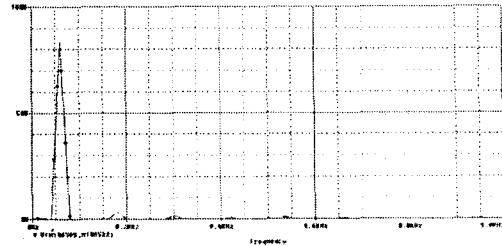
III. 시뮬레이션 및 고찰

그림 6에 나타난 회로도를 이용하여 Pspice 시뮬레이션을 행하였으며, 그 결과를 그림 7과 8에 나타내었다.

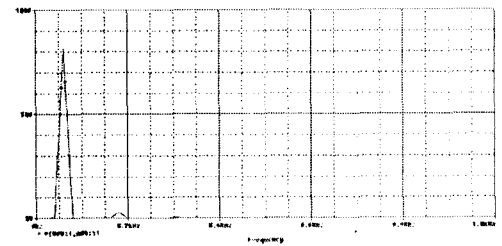
그림 7은 PWM 인버터의 출력 파형이다. 고주파 누설 전류, 출력 전류, 출력 전압의 순서로 나타내었다. (a)는 일반적인 방법을 사용하였을 때의 파형이다. 누설 전류의 최대값은 약 45[mA]의 값을 나타내고 있다. (b)는 제안된 방법을 사용하였을 때의 파형이다.

그림에서 보는 바와 같이 제안된 방법을 사용하였을 경우, 누설 전류가 거의 흐르지 않는다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 출력 파형의 주파수 스펙트럼 분석이다. (b)는 (a)에 비해 저차 고조파 성분이 줄어들었음을 알 수 있다. 이것은 제안된 방법이 고조파 저감을 가능하게 한다는 것을 잘 나타내어 주고 있다.

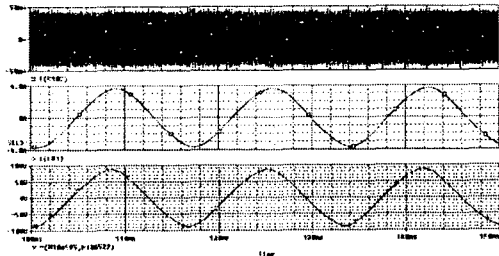


(a) 일반적인 방법

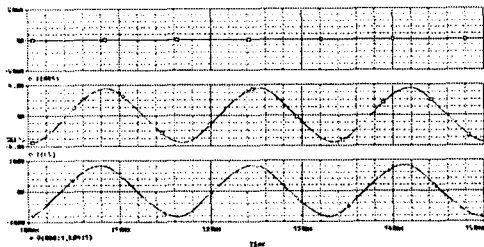


(b) 제안된 방법

그림 8 출력 파형의 FFT 분석



(a) 일반적인 방법



(b) 제안된 방법

그림 7 PWM 인버터의 출력 파형

IV. 결론

부유 용량을 고려한 전동기 모델의 각 정수를 구하여, 제안된 방법을 Pspice로 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 방법이 출력 누설 전류의 억제 효과면에서 매우 우수하였으며, FFT 분석을 통해 고조파의 저감 특성을 확인 할 수 있었다.

본 논문은 한국해양대학교 학술진흥재단의 연구 지원 사업의 지원에 따라 수행되었음

참고문헌

- [1] 小笠原, 藤田, 赤木, “電圧形PWMインバータが発生する高周波漏れ電流のモデリングと理論解析”, 電學論D, 115巻1号, p.77-83(平7)
- [2] 青水, 木村, 広瀬, “トランジスタモジュールの浮遊静電容量に起因する高周波漏洩電流の解析とその制御法”, 電學論D, 116巻7号, p.758-766(平8)

- [3] E. Zhong, T. A. Lipo, "Improvements in EMC Performance of Inverter-Fed Motor Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 6, pp.1247-1256 (Nov./Dec. 1995)
- [4] 土屋, 内尾, 山川, "電圧形インバータ波形による低圧絶縁の複合劣化", 東洋電機技報, 第86号, p.13-19(平5)
- [5] 小形, 高橋, "インバータ負荷のアクティブ漏れ電流補償回路", 電気学会全国大会, p.207(平8)
- [6] 小笠原, 綾野, 赤木, "PWMインバータを用いた交流電動機駆動システムが発生するEMIの測定とその低減法", 電学論D, 116巻12号, p.1211-1219(平8)
- [7] 小笠原, 綾野, 赤木, "電圧形 PWMインバータが発生するコモンモード電圧のアクティブキャンセレーション", 電学論D, 117巻5号, p.565-571(平9)
- [8] 中江, 金丸, 雨宮, "系統連系形太陽光発電システムの単相PWMの一方式", 電学論D, 118巻9号, p.981-985(平10)