

PWM 인버터로 구동되는 유도 전동기의 고주파 누설전류 모델링 및 억제에 관한 연구

이재호*, 전진희*, 홍정표*, 강필순*, 박성준**, 김철우*
부산대학교*, 거제전문대**

A Study on Modeling and Damping of High-Frequency Leakage Currents
in PWM Inverter Feeding an Induction Motor

Jae-Ho Lee*, Jin-Hee Jun*, Jeng-Pyo Hong*, Feel-Soon kang, Sung-Jun Park**,
Cheul-U Kim*

Pusan National University*, Koeje college**

Abstract

A PWM inverter with an induction motor often has a problem with a high frequency leakage current that flows through stray capacitors between stator windings and a motor frame to ground.

This paper presents an equivalent circuit for high frequency leakage currents in PWM inverter feeding an induction motor, which forms an LCR series resonant circuit. A conventional common mode choke or reactor in series between the ac terminals of a PWM inverter and those of an ac motor is not effective to reduce the rms and average values of the leakage current, but effective to reduce the peak value.

Furthermore, this paper proposes a leakage current damper which is different in damping principle from the conventional common mode choke. It is shown theoretically and experimentally that the leakage current damper is able to reduce the rms value of the leakage current to 25 %, where the core used in the leakage current damper is smaller than that of the conventional common-mode choke.

1. 서 론

오늘날 모터드라이브 제어기술 개발로 유도전동기가 산업용으로 널리 보급되고 있으며 이 유도전동기를 고효율로 제어하기 위해 PWM 인버터가 사용되고 있다.

이러한 PWM 인버터의 캐리어 주파수 증가는 무시할 수 없는 양의 고주파 누설전류(high frequency leakage current)를 발생시킨다. 이 고주파 누설전류는 커먼 모드 전압(common mode voltage)이 $\frac{E_{dc}}{3}$ 크기로 스텝상 형태로

변화하기 때문에 모터 프레임과 고정자 권선사이의 부유용량(stray capacitors)과 접지를 통해 흐른다.

일반적으로 이러한 고주파 누설전류를 억제시키기 위해서 PWM 인버터 3상 출력 측과 모터 3상 입력단자 사이에 커먼 모드 쇼크(common mode chock)를 직렬로 연결하여 사용하는 연구결과가 나와 있다.[1]-[4] 그러나 이는 고주파 누설전류의 최대치를 일부 감소시키는 데는 효과가 있지만, 실효치 및 평균치는 감소시키지는 못한다.

따라서 본 논문에서는 LCR 직렬 공진회로 형태인 등가 회로를 PWM 인버터로 구동되는 유도전동기 시스템에서의 고주파 누설전류에 대한 모델로 제안하였고 그 유효성에 대해서도 이론 및 실험을 통해 입증하였다.

그리고 이러한 등가회로를 기초로 하여 커먼 모드 쇼크에 비해 고주파 누설전류를 효율적으로 억제시킬 수 있을 뿐만 아니라 부피도 적고 설계, 제작 면에서도 간단한 누설전류 감쇄기(leakage current damper)를 또한 제안하였고 실험을 통하여 고주파 누설전류의 최대치 뿐만 아니라 실효치 및 평균치도 상당부분 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

2. 누설전류에 대한 해석 및 모델링

2.1 커먼 모드 전압

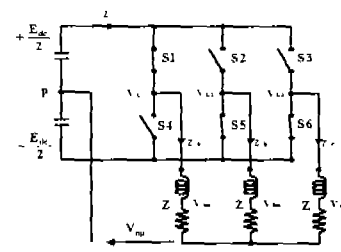


그림 1. 3상 전압형 인버터

그림 1은 3개의 인덕턴스와 저항으로 표현된 모터에 연결된 3상 전압형 인버터를 나타내고 있다.

여기서 V_{L1}, V_{L2}, V_{L3} : 인버터 출력 상전압

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : 부하 상전압

V_{np} : 커먼 모드 전압

부하 중성점 n을 기준으로 3상 전류의 합은 0 이므로 커먼 모드 전압 V_{np} 은 식 (1)과 같다.

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

$$\frac{V_{L1} - V_{np}}{Z} + \frac{V_{L2} - V_{np}}{Z} + \frac{V_{L3} - V_{np}}{Z} = 0$$

$$\therefore V_{np} = \frac{1}{3} (V_{L1} + V_{L2} + V_{L3}) \quad (1)$$

식 (1)은 단지 스위칭 상태가 부하 임피던스와 상관 없이 커먼 모드 전압을 결정함을 보여주고 있고 커먼 모드 전압은 인버터에서 스위칭 할 때 마다 $\frac{E_{dc}}{3}$ 만큼 크기를 가지고 스텝상으로 변화한다.

2.2 누설전류의 모델링

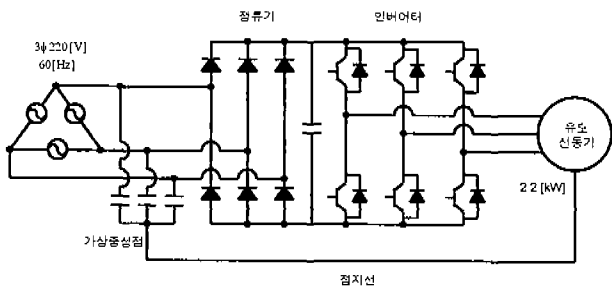


그림 2. 누설전류를 측정하기 위한 시스템

그림 2는 고주파 누설전류를 측정하기 위한 실험 시스템이고 가상 중성점(virtual grounding point)은 실제 접지점(actual grounding point)과 스위치 보드 상의 어스 터미널 사이의 내부 임피던스의 영향을 피하기 위해 사용되었으며 모터 고정자 권선과 프레임 사이의 부유용량 보다 훨씬 큰 3개의 캐패시터(3.4 $[\mu F]$)를 정류기 3상 입력단자에 연결하였으며, 어스 터미널의 상부 내부 인덕턴스는 실험에 의해 본 논문에서 제안한 고주파 누설전류에 대한 등가회로상의 케이블 인덕턴스 L에 비해 무시할 정도로 매우 적은 것으로 추정되었다.

표 1은 실험에 사용된 PWM 인버터와 모터에 대한 정수를 나타내고 있고 그림 3과 같이 측정된 누설전류 파형이 LCR 직렬 공진회로에 스텝 전압이 인가되어진 뒤의 감쇄 진동하는 전류파형과 비슷하기

PWM 인버터	PWM 방식	Space Vector PWM	
	IGBT	3	ea
	Collector-Emitter 전압	600	V
	Collector 전류	50(연속)	A
		100(순간 1[ms])	A
	스위칭주파수	2.5	kHz
모터	전압	220/380	V
	전류	8.8/5.1	A
	정격출력	2.2 (3[HP])	kW
	회전수	1735	rpm
	극수	4	

표 1. 인버터 및 모터 파라미터

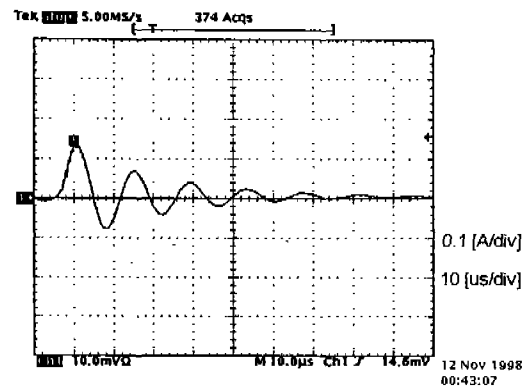


그림 3. 측정된 누설전류

때문에 본 논문에서는 그림 4와 같이 누설전류에 대한 LCR 직렬공진회로 형태의 등가회로를 제안하였으며 PSpice로 시뮬레이션한 결과 그림 2에서 측정된 누설전류 파형과 거의 일치하였다.

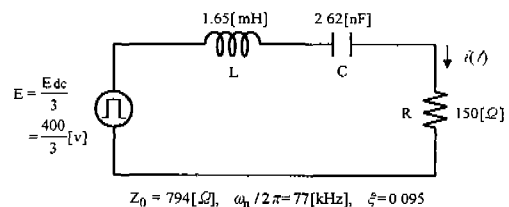


그림 4. 누설전류에 대한 등가회로

그림 4와 같이 LCR 직렬 공진회로에 스텝 전압이 인가되고 $1 \gg \zeta^2$ 인 경우 흐르는 전류 $i(t)$ 는 식 (2)와 같이 된다.

$$i(t) \approx \frac{E}{Z_0} e^{-\zeta \omega_n t} \sin \omega_n t \quad (2)$$

여기서 ω_n 은 공진주파수, ζ 는 damping factor, Z_0 는 특성임피던스이고, 특성임피던스 Z_0 가 누설전류의 최대치를 결정한다.

2.3 등가회로 정수

케이블 인덕턴스 및 모터 프레임과 서로 연결된 고정자 권선간의 임피던스(캐패시터와 직렬 저항)를 측정 한 결과 그림 4의 등가회로 상의 L, C, R 값과 거의 일치하였다. 따라서 등가회로 상의 인덕턴스는 모터와 인버터 사이의 케이블 인덕턴스를 의미하고 캐패시터와 저항은 모터의 프레임과 서로 연결된 고정자 권선 간의 부유용량과 직렬저항을 각각 의미함을 알게되었고 모터의 인덕턴스 및 권선저항은 누설 전류에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

3. 커먼 모드 초크에 의한 누설전류 억제

3.1 이론적 해석

커먼 모드 초크는 누설전류를 억제하기 위해 모터와 인버터 사이에 연결된다. 커먼 모드 초크의 삽입은 그림 4의 등가회로에서 인덕턴스 L의 증가를 의미하며 저항 R 역시 커먼 모드 초크에서의 추가적인 손실 때문에 증가한다.

커먼 모드 초크의 삽입으로 인해 인덕턴스와 저항이 그림 4의 누설전류 등가회로에서의 L, R에 비해 각각 n, m 배로 증가했다고 가정하고 감쇄정수가 충분히 적다면 이 경우의 누설전류 $i'(t)$ 는 식 (3)와 같다.

$$i'(t) = \frac{E}{\sqrt{n}Z_0} \cdot e^{-m\zeta\omega_n t/n} \cdot \sin \frac{\omega_n}{\sqrt{n}} t \quad (3)$$

따라서 진폭은 $\frac{1}{\sqrt{n}}$, 감쇄시간은 $\frac{n}{m}$, 공진 주파수는 $\frac{1}{\sqrt{n}}$, 실효치는 $\frac{1}{\sqrt{m}}$, 평균치는 $\frac{\sqrt{n}}{m}$ 배로 변하게 된다.

3.2 실험 결과

그림 5는 커먼 모드 초크 부착시의 누설전류 파형 및 등가회로를 나타내고 있다. 그림 4와 비교하면 누설전류의 최대치는 140[mA]에서 65[mA]로, 실효치는 대략 1/2배로 각각 감소하게 된다. 이는 이론식에 근거한 계산 값과 거의 일치한다.

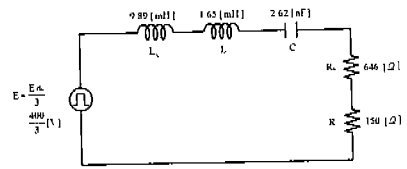
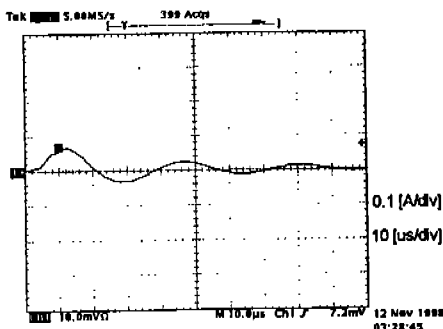


그림 5. 커먼 모드 초크 부착시 누설전류 및 등가회로

4. 누설전류 감쇄기에 의한 누설전류 억제

4.1 이론적 해석

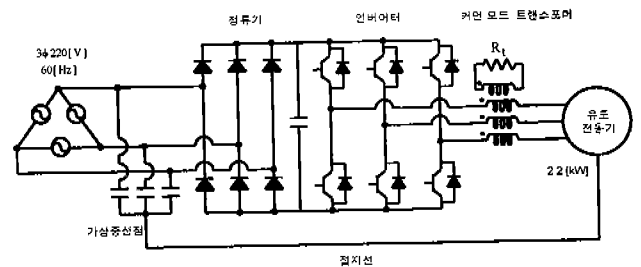
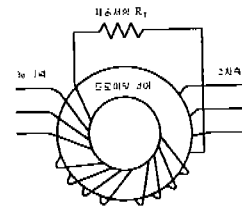


그림 6. 누설전류 감쇄기가 연결된 실험 시스템

그림 6은 모터와 인버터 사이에 누설전류 감쇄기를 부착시킨 실험 시스템을 나타내고 있으며 3상에 흐르는 커먼 모드 전류는 코어에서 자속을 발생시키나 정상 전류는 자속을 발생시키지 않는다. 그러므로 누설전류 감쇄기의 2차측 권선에 연결된 저항 R₁은 오직 커먼 모드 전류 즉, 누설전류에 대해서만 제동 저항으로써 동작한다.

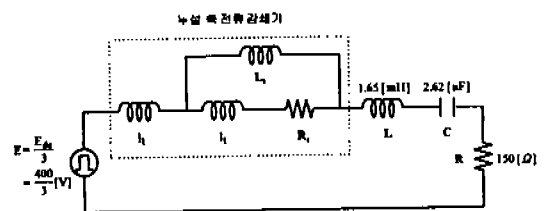


그림 7. 누설전류 감쇄기를 포함한 등가회로

그림 7은 누설전류 감쇄기를 부착했을 때 누설전류에 대한 등가회로를 나타내고 있으며 L₁와 L₂는 누설전류 감쇄기의 여기 인덕턴스와 누설 인덕턴스를

의미하고 식 (4)는 누설전류의 라플라스 변환식을 나타내고 있다. 단 l_t 와 R은 L_t 와 R_t 보다 훨씬 적기 때문에 무시한다고 가정하였다.

$$I(s) = \frac{C(sL_t + R_t)E}{s^3L_tLC + s^2(L_t + L)CR_t + sL_t + R_t} \quad (4)$$

그림 8은 R_t 를 하나의 파라메타로 한 누설전류의 근계적도를 나타내고 있다.

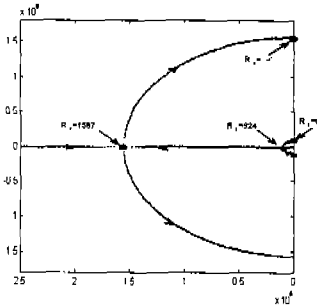


그림 8. 근 계적도 ($L_t = 8.95mH$)

만약 $R_t = 0 - 924[\Omega]$ 이라면 한 개의 실근과 두 개의 공액 복소근을 가지므로 누설전류는 진동하는 파형이 되고 $R_t = 924 - 1587[\Omega]$ 이면 3개의 실근이 존재한다. 따라서 누설전류는 RC 직렬회로에 스텝 전압이 인가된 것과 같은 비 주기적 감쇄 파형을 가진다. $R_t = 1587 - \infty[\Omega]$ 면, $I(s)$ 는 한 개의 실근과 두 개의 공액 복소근을 가진다. 따라서 누설전류 공진주파수는 누설전류 감쇄기의 인덕턴스 L_t 가 케이블 인덕턴스 L 보다 크기 때문에 누설전류 감쇄기 부착 이전의 경우 보다도 낮아진다. 그러나 누설전류 감쇄기의 인덕턴스로 인해 누설전류 공진주파수가 늘어짐으로써 누설전류 최대치는 어느 정도 감소하나 평균치 및 실효치는 감소하지는 않는다.

따라서 누설전류의 최대치와 실효치를 모두 줄이기 위해서는 $I(s)$ 가 3개의 실근을 가져야 되므로 R_t 의 값이 결정되어야만 한다는 결론을 얻게 되었다. 그러므로 근들이 하나의 분기점(Breakaway Point) 상에 오게 하기 위해 R_t 의 값을 유도해보면, 식 (4)에서 분모와 일치하는 특성방정식은 식 (5)와 같다

$$s^3L_tLC + s^2(L_t + L)CR_t + sL_t + R_t = 0 \quad (5)$$

Cardan's 공식의 판별식 D[5]와, $L_t \gg L$ 라 가정하면 R_t 는 식 (6)과 같이 된다.

$$2Z_{00} \leq R_t \leq \frac{1}{2} Z_{\infty} \quad (6)$$

$$\text{여기서 } Z_{00} = \sqrt{\frac{L_t}{C}}, Z_{\infty} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

4.2 누설전류 감쇄기 설계

누설전류가 L_t 을 통하는 것 보다는 주로 제동저항 R_t 를 통해 흐르기 때문에 3개의 실근을 가지는 등가 회로는 RC 직렬회로와 거의 같다. 이 경우 누설전류는 식 (7)과 같이 근사 된다.

$$i(t) = \frac{E}{R_t} e^{-t/CR_t} \quad (7)$$

시정수가 스위칭 주기보다 훨씬 적다고 가정하면 누설전류의 실효값이 식 (8)과 같고 선형구간에서 동작하는 동안 커먼 모드 전압의 스위칭은 PWM 스위칭주파수의 6배가 된다. 따라서 R_t 와 P_{Rt} 는 식 (9), (10)과 같고 식 (6)으로부터 L_t 와 Φ_{max} 는 식 (11), (12)와 같다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{6}{T} \int_0^{\infty} i(t)^2 dt} = E \sqrt{\frac{3C}{R_t T}} \quad (8)$$

$$R_t = \frac{3CE^2 f_{sw}}{I_{rms}^2} \quad (9)$$

$$P_{Rt} = 6 \cdot \frac{1}{2} CE^2 f_{sw} \quad (10)$$

$$L_t = 4 R_t^2 C = \frac{36C^3 E^4 f_{sw}^2}{I_{rms}^4} \quad (11)$$

$$\Phi_{max} = 3CR_t E = 9 \frac{C^2 E^3 f_{sw}}{I_{rms}^2} \quad (12)$$

상기와 같이 누설전류 감쇄기 인덕턴스 L_t , 최대 쇄교자속 Φ_{max} , 제동저항 R_t , 제동저항 전력손실 P_t 는 누설전류 감쇄기의 코어를 설계하는데 중요한 파라메타가 된다.

4.3 실험 및 결과

표 2는 페라이트 코어 사양을 나타내고 있다. 누전 보호계전기 (3ϕ 3[W], 220[V], 30[A])의 감도가 30[mA] 이므로, 누설전류의 실효치 I_{rms} 를 20 [mA]로 정하고 식 (9) - (12)에 따라 계산해 보면 결과적으로 R_t 는 869 [Ω], P_{Rt} 는 0.35 [W], L_t 는 7.91 [mH], Φ_{max} 는 908 [μWb]로 된다.

따라서 트로이달 페라이트 코어의 회전수 N은 트로이달 페라이트 코어의 AL값에 의해 계산되어 질 수 있으므로 식 (13)과 같고 최대 포화 자속 밀도는

식(14)와 같다.

모델명	ZW-47313-TC	MAGNETICS
A_e	212	mm^2
l_e	165	mm
AL	$16.28 \pm 20\%$	$\mu H/N^2$
W_t	177	g
B_s	430(25°C에서)	mT
	250(100°C에서)	mT

표 2. 트로이달 페라이트 코어

$$N = \sqrt{\frac{L_t}{AL}} = 22 \quad (13)$$

$$B_{max} = \frac{\Phi_{max}}{N A_e} = 195mT \quad (14)$$

그림 9는 실험에 사용된 누설전류 감쇄기의 사진이고 제동저항 및 제동저항의 전력 손실이 각각 869 [Ω], 0.35[W]로 계산 되었기 때문에 1[kΩ], 5[W]의 제동저항을 2차 권선의 양 단자에 연결하였다.

결과적으로 누설전류 감쇄기를 연결한 경우의 누설전류 파형은 그림 10에 나타나 있고 시뮬레이션 결과와도 일치 하였다.

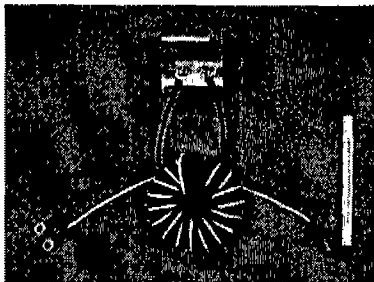


그림 9. 실험에 사용된 누설전류 감쇄기 사진

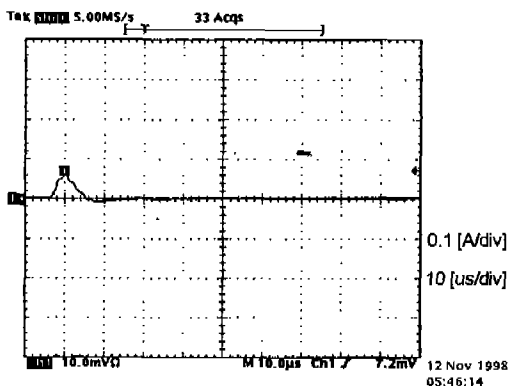


그림 10. 누설전류 감쇄기를 부착했을 경우의 누설전류

5. 결 론

본 논문에서, 전압형 PWM 인버터로 구동되는 유도전동기의 고주파 누설전류에 대하여 자세하게 언급하였다. 그리고 본문에서 언급된 이론적 해석과 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 누설전류에 대한 등가회로는 LCR직렬 공진회로로 표현되어 진다.
- 2) 등가회로에서 C는 고정자 권선과 모터 프레임간의 부유용량이고 L은 케이블의 인덕턴스이며 거의 모든 저항 성분은 케이블 보다는 모터에 있다.
- 3) 유도전동기의 인덕턴스 및 권선저항은 누설전류에 영향을 주지 못한다.
- 4) 일반적인 커먼 모드 초크들은 누설전류의 실효치 및 평균치를 감소시키는데 효과는 없으나, 최대치는 어느 정도 줄일 수 있다.
- 5) 본 논문에서 제안한 누설전류 감쇄기는 누설전류를 효율적으로 억제시켰으며 실효치를 $\approx 1/4$, 최대치를 $\approx 1/2$ 로 각각 감소시켰다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Murai, T. Kubota, and Y. Kawase, "Leakage current reduction for a high-frequency carrier inverter feeding an induction motor." IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 28, PP.858-863, July/Aug. 1992.
- [2] M. A. Jabbar and M. Azizur Rahman, "Radio frequency interference of electric motor and associated controls," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 27, pp. 27-31. Jan./Feb. 1991.
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications and Design. New York: Wiley, 1989.
- [4] E. Zhong, S. Chen, and T. A. Lipo, "Improvement in EMI performance of inverter-fed motor drives," in APEC 94 Conf. Rec., vol. 2, pp. 608-614, 1994.
- [5] Murray R. Spiegel "Mathematical handbook of formulas and tables", McGraw-Hill, 1968.
- [6] I. Suzuki, O. Aizawa, and F. Ishibashi, "Inverter driven variable speed induction motor," Toshiba Rev., vol. 37, no. 3, PP 246-250, 1982.