

동력 집중식 철도차량의 전력변환장치 전력품질 향상연구

A Study on Power Quality Improvement of Power Conversion System in Centralized-Power Type Electric Railway Vehicle

김재문[†] · 윤차중¹ · 이을재²

Jae-Moon Kim · Cha-Jung Yun · Eul-Jae Lee

Abstract This paper proposes an advanced filter design to improve power quality of a head electric power (HEP) as a power conversion unit in centralized-power type electric railway vehicle. First of all, we have measured waveform of output power of transformer connected HEP to design the filter. Throughout experiment and simulation results, it is estimated that switching technique used HEP is advanced selected harmonic elimination PWM (SHEPWM) and the applied switching frequency is about 300Hz. In this paper, a filter to improve power quality considering estimated parameters is designed. As a result, the reduction of the magnitude of the overall harmonic is achieved and confirmed through simulations.

Keywords : Filter design, Head electric power (HEP), Selected harmonic elimination PWM (SHEPWM), Cut-off frequency

초 록 본 논문은 동력 집중식 철도차량에서 전력변환장치로서 객차용 전원공급장치의 전력품질을 향상시키기 위해 보완된 필터설계를 제안한다. 먼저, 필터설계를 위해 객차용 전원공급장치와 연결된 변압기의 출력전력 파형을 측정하였다. 실험 및 시뮬레이션 결과를 통해 스위칭 기법은 개선된 특정고조파 소거 펄스폭 변조이고 스위칭 주파수는 300Hz임을 추정하였다. 따라서 추정된 파라미터를 바탕으로 전력품질을 향상시키기 위해 필터를 설계하였다. 시뮬레이션 결과 전체적으로 고조파의 크기가 감소함을 확인하였다.

주요어 : 필터 설계, 객차용 전원공급장치, 특정고조파소거 펄스폭변조, 차단주파수

1. 서 론

국내 철도산업은 최근 침체를 벗어나 '04년 경부선 고속철도차량(KTX) 상업운행과 더불어 대도시 및 지방자치단체를 중심으로 친환경 교통수단으로서 관심이 증대되고 있다. 또한 화석연료 사용에 따른 환경오염 발생과 연료비 상승에 따른 운영비용이 증가하면서 기존의 디젤엔진을 이용한 철도차량에서 전기를 이용한 전기 동력식 철도차량으로 대체되고 있으며, 이에 따른 전기차량 급전을 위해 전철화가 지속적으로 증가되고 있다. 그러나 중앙선 등 국내 산업선인 경우 전철화 정책에 의해 해외에서 도입하여 운영 중인 전기기관차는 세부적인 자료가 거의 없어 전문지식을 갖춘 전문가와 철도차량 운영기관들이 운영경험에 의해 개량화 및 유지보수가 이루어지고 있다.

전력용 소자로 위상제어 사이리스터(Thyristor)를 사용하여 건인회로를 구성하고 있는 동력 집중식 전기기관차인 경우 제어방식의 특성상 입력 역률이 낮아 변전소의 부담이 크며 직류전동기를 건인 전동기로 사용하여 잦은 고장이 문제점으로 대두되고 있다. 이에 대한 개선방안으로 도입된 신형

전기기관차는 GTO(Gate Turn-Off)를 채용한 V/F 제어방식에 의한 유도전동기를 구동하여 운행하고 있으며, 객차용 전원공급장치(Head Electric Power: HEP)가 장착되어 객차에 직접 전원공급을 하고 있다. 그러나 주회로의 건인장치가 주된 문제점으로 도출되었던 기존과는 달리 객실에 공급되는 전원 이상으로 인한 문제점이 주로 대두되고 있다. 특히 출력전압의 품질저하로 추정되는 신호장치 간섭현상과 냉방장치의 이상동작 현상이 증가되고 있어 여객수송의 목적으로 전기기관차를 운행하는 경우 발전차량을 별도로 건인하여 객실전원을 공급하고 있는 형편이다[1-4].

본 논문에서는 신형 전기기관차의 객차용 전원공급장치에 대한 출력전원의 품질을 분석하기 위해 현차시험을 수행하여 취득된 데이터를 근간으로 전력변환장치의 스위칭 기법을 추정하였다. 추정된 스위칭 기법이 현차시험을 통해 얻은 파형과 일치함을 확인하였으며, 시뮬레이션을 통해 출력전원 품질을 향상시키기 위한 방법을 제시하였다.

2. 전력품질 분석 및 PWM기법 추정

2.1 객차용 전원공급장치 특성

신형 전기기관차에는 그림 1과 같이 2대의 객차용 전원공급장치(HEP-1, HEP-2)가 설치되어 있으며 입력측 커패시터 양단의 직류전압 2.8kV를 펄스폭 변조(PWM) 제어를 적용

[†]교신저자 : 한국철도대학 철도차량전기과
E-mail : goldmoon@krc.ac.kr

¹한국철도공사

²이경산전(주)

하여 3상 440V 교류전원을 생성한다. 회로는 주 스위칭 소자로 전류구동형 GTO를 사용하고 2 레벨 스위칭을 하는 인버터로 구성되어 있으며, 정상상태에서 1대만 동작하다가 고장이 발생할 경우 예비상태로 대기중인 나머지 1대가 자동으로 절체된다. 주변압기 탱크 내부에 설치된 독립적인 2개의 변압기를 사용하여 절연 및 강압을 수행하며 변압기의 2차측 출력은 병렬로 연결되어 있고 변압기 내부의 누설 인덕턴스와 델타(Δ)로 연결된 3개의 독립된 커패시터에 의해 회로를 구성한다[2,3].

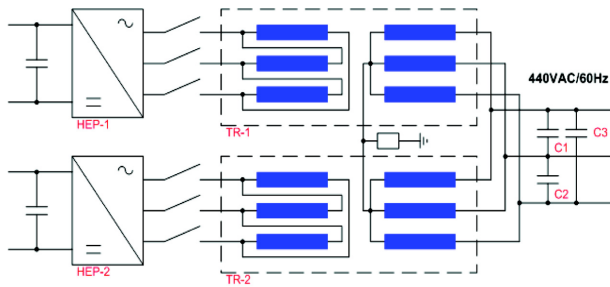


Fig. 1 HEP and circuit of transformer

Table 1 Specification of transformer on HEP

파라미터	사양
형식	Delta-Star
동작 주파수	60Hz
2차측 출력전압	440V ± 3%
변압기 1차측 전류	247A
권선비	2.2:1
1차측 누설 인덕턴스	365μH

Table 2 Specifications of filter circuit on output side

구분	사양
형식	3상 LC 필터
커패시터	1.77mF
커패시터 정격	129.2kVar/440Vac

2.2 현차시험을 통한 전원품질 분석 및 PWM기법 추정

객차용 전원공급장치(HEP)의 출력 전력의 품질분석을 위해 그림 2와 같이 변압기의 2차측 단자(필터 커패시터 연결부)에 전력분석기 CA8334를 구성하고 현차시험을 하였다. 신형기관차를 대상으로 청량리-영주 구간을 왕복 운행하면서 냉방장치가 자동절체가 이루어지도록 설정한 후 기본파를 포함한 50차까지 고조파분석을 하였다.

그림 3(a)는 각 상에 대한 출력전압 파형이고 그림 3(b)는 한 상의 THD 분석결과를 보여준다. 부하조건은 자동으로 동작되는 냉방기가 연결되어 있으며 측정하는 동안 30A~80A 부하 변화가 측정되었다. 연속된 출력 전압파형의 측정 결과, 고조파 왜율이 약 8.5~12% 사이에서 변동하고 있었으며 비주기적으로 10% 이상의 출력전압 변동이 측정되었다.

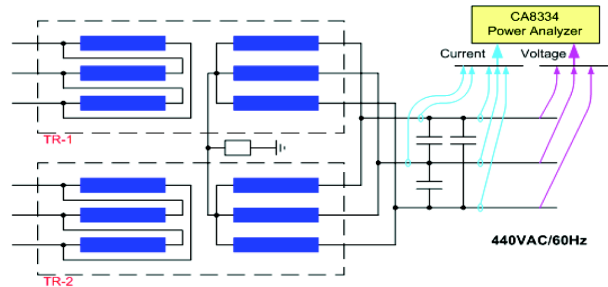
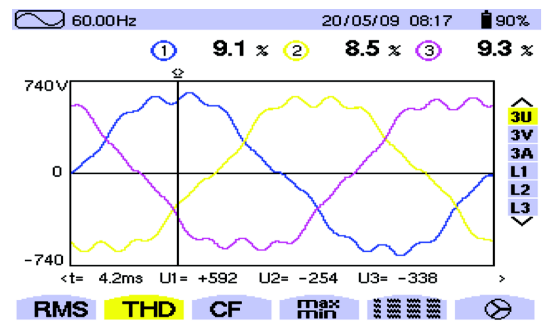
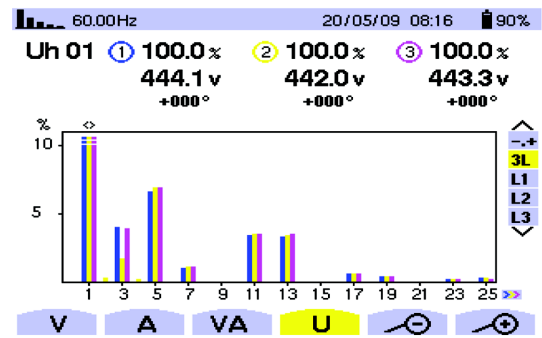


Fig. 2 The measuring circuit to analysis output power of HEP



(a) Output voltage waveform



(b) THD of output voltage

Fig. 3 The Output voltage waveform and THD analysis

측정된 결과를 바탕으로 고조파 분석을 하면, 일반적으로 전력용 반도체 소자를 사용하고 PWM기법을 적용한 인버터에서는 3의 배수차 고조파가 발생하지 않도록 하거나 최소화가 되도록 동기식 PWM과 적절한 캐리어 주파수를 선택한다. 하지만 그림 3(b)에 보듯이 3차 고조파를 포함한 저차 고조파가 상당히 크게 발생하고 있는데 이것은 인버터 후단 필터의 설계상수가 적절하지 않거나 부하가 필터에 영향을 주는 것으로 추정된다.

한편 그림 4는 측정된 변압기의 2차측 출력전류로 그림 4(a)에 흐르는 전류가 351.6A정도 흐르고 있는 반면 실제 부하전류가 흐르는 그림 4(b)의 경우 37.6A로 측정되었다. 이는 저차 고조파 제거를 위해 사용된 필터용 커패시터의 값이 매우 커서 부하전류의 약 5~10배에 해당하는 무효전류가 흐르고 있음을 의미한다.

필터회로의 차단주파수 계산을 위해 객차용 전원공급장치의 출력측 PWM 전압을 측정하고자 하였으나 차상에서 측

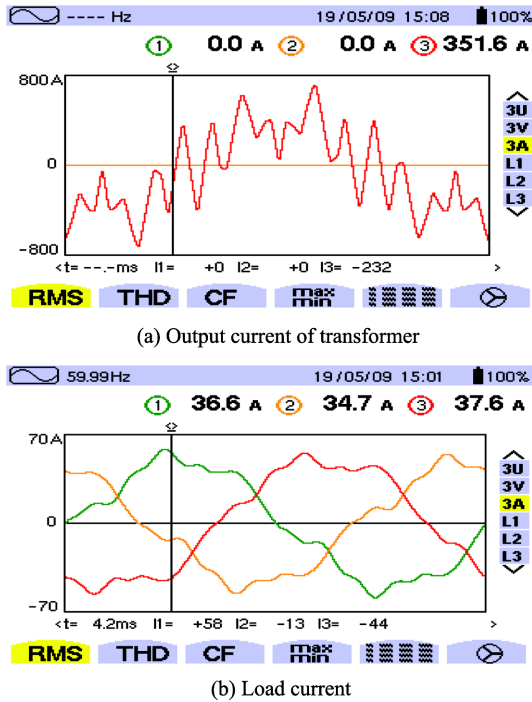


Fig. 4 The Output current waveform of transformer

정이 용이하지 않아 변압기 2차측 출력전압 및 전류를 측정하였다. 따라서 2차측 출력전류에는 부하전류와 필터 커패시터의 무효전류가 포함되어 있으므로 전류의 고조파 형태와 출력전압의 왜곡정도를 측정하여 PWM 주파수의 추정이 가능하다. 짝수 고조파를 제거하기 위해 홀수의 변조 주파수를 사용해야 하므로 조건에 만족하는 주파수 변조지수 (m_f)는 5, 7, 9 중의 하나가 된다. 따라서 식 (1)에 의해 객차용 전원공급장치에 적용된 PWM 주파수는 300Hz, 420Hz, 540Hz 중에 있다[5].

$$f_s = m_f \times f_1 \quad (1)$$

여기서 f_s 는 스위칭 주파수, f_1 는 기본파 주파수, m_f 는 주파수 변조지수

한편 입력전압에 대한 출력 선간전압 V_{LL} 은 선형 변조영역($m_a \leq 1.0$)에서 식 (2)와 같고, 이를 통해 전압 변조지수를 구할 수 있다.

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \hat{V}_{AN} = 0.612 m_a \cdot V_{dc} \quad (2)$$

여기서 V_{dc} 는 입력전압, \hat{V}_{AN} 은 상전압, m_a 는 전압 변조지수
특정 고조파 제거(SHEPWM) 방식은 노치(Notch)라고 부르는 미리 계산된 스위칭 각(Angle)을 반 주기동안 사용하여 특정 고조파를 제거함과 동시에 전압의 크기를 제어할 수 있다. 일반적인 비정현 주기 전압파형의 푸리에 급수 전개는 아래와 같다[6-8].

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3)$$

여기서 a_0 는 직류성분,

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \cos n\omega t \, d\omega t, \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \sin n\omega t \, d\omega t$$

식 (3)에서 변압기 출력 전압파형은 1/4 주기 대칭이므로 기수(Odd) 고조파만으로 충분하다. 그리고 $v(t)$ 가 단위크기, 즉 $v(t) = \pm 1$ 라고 가정하면 b_n 은 식 (4)와 같이 표현되는데, k 개의 α 각을 사용하여 기본파를 제외하고 총 $k-1$ 개의 고조파를 제거할 수 있음을 의미하며, 고조파 제거를 위한 방법은 참고문헌[3]에 자세히 언급하고 있다.

$$b_n = \frac{4}{n\pi} [1 + 2(-\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 - \dots - \cos \alpha_{k-1} + \cos \alpha_k)]$$

$$= \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^K (-1)^k \cos n\alpha_k \right] \quad (4)$$

표 3은 현차시험을 통해 얻은 출력전압 파형과 상기의 가정을 조합하여 시뮬레이션을 반복적으로 수행하면서 측정된 파형과 가장 유사한 경우의 파라미터를 추정한 값이다. 특히 현차시험에서 부하가 자동으로 투입되어 출력전류의 변동률이 많았던 점과 전원공급장치의 GTO 소자로 구성되어 있어 출력전력이 최소한 100kVA를 초과한다고 가정하여 부하전류를 120A로 하였다. 그림 5와 같이 PSpice를 이용하여 전압 및 전류 파형에 대하여 시뮬레이션을 실시하였으며, 스위칭 각의 계산과 고조파분석에 사용된 시뮬레이션 도구는 식 (4)을 이용하여 자체 제작된 프로그램이다.

그림 6은 시뮬레이션 각 부의 파형으로 반 주기동안 펄스의 수는 5가 되며 스위칭 주파수는 300Hz가 된다. 그림 6(a),

Table 3 Simulation parameters

항 목	설정값	항 목	설정값
PWM 방식	SHEPWM	주파수 변조 (m_f)	5
입력전압(V_{dc})	1,273	출력전압(V_{LL})	440
변조전압(m_a)	0.51	필터 인덕턴스	180 μ H
부하전류	120A	필터 커패시터	1.77mF

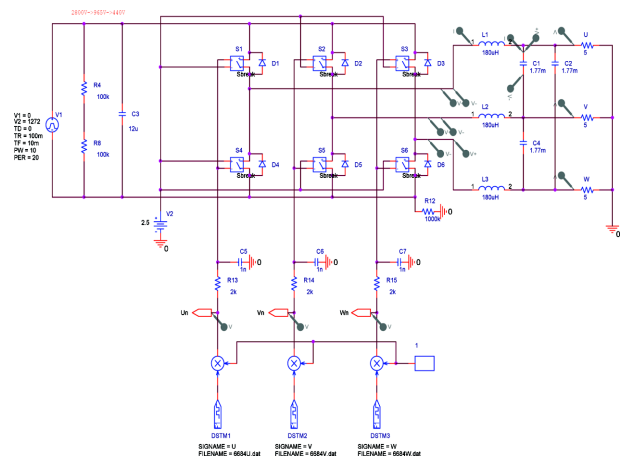


Fig. 5 The Pspice circuit for simulation

(b), (c)는 스위칭 소자의 게이트 신호들이며 그림 6(d), (e), (f)는 필터 전의 선간전압 파형을 보여준다. 주목할 점은 PWM에 사용된 스위칭 각이 일반적인 SHEPWM에서 구해지는 값이 아니라 전체적으로 고조파의 크기를 최소화하는

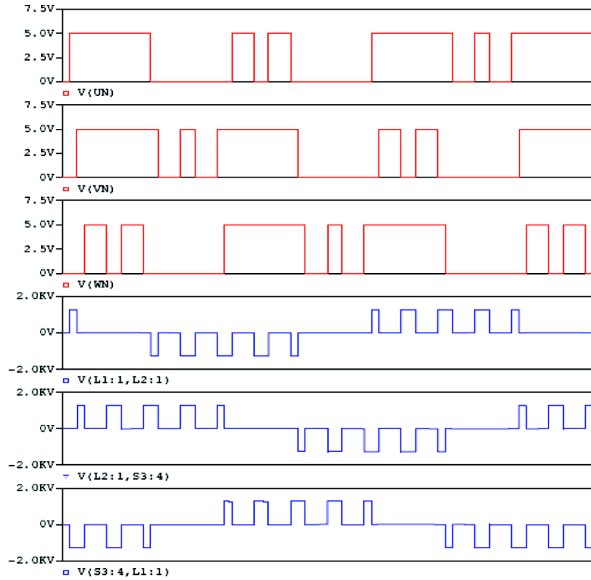


Fig. 6 Waveforms on gate signal and line-to-line voltage

최소 리플전류 PWM (Minimum Ripple Current PWM) 방식에 근사한 점이다. 그림 7(a)는 시뮬레이션을 통해 구해진 출력 전압파형이며 그림 7(b)의 현차시험을 통해 측정된 전압 파형과 유사함을 보여준다. 그림 7(c)는 변압기 2차측에 흐르는 출력전류를 시뮬레이션 한 파형으로 7(d)의 측정된 실제 전류와 매우 유사함을 알 수 있다.

현차시험은 파형 형태와 고조파 분포 등을 관측하는 것으로 파형분석에 따른 FFT 결과 표 4와 같이 나타났으며, 이를 토대로 고조파 최소화 기법에 근사한 SHEPWM 기법을 사용하고 있으며 스위칭 주파수는 300Hz임을 알 수 있다. 또한 변압기 결선방식이 델타-스타 방식이므로 1차측 임피던스를 2차측으로 환산하여 시뮬레이션에서 현차시험을 통해 얻은 파형을 근사화한 결과 2차측 필터 인덕턴스는 약 160~200 μ H정도로 추정되어 시뮬레이션에서 180 μ H를 적용하였다.

3. 제안된 전력품질 개선방법

3.1 기존 필터의 특성

인버터 출력파형은 적절한 필터회로를 통과함으로써 고차의 고조파가 제거된 매끄러운 형태의 사인파로 변환된다. 일반적으로 전원장치와 부하장치 사이에 직렬로 삽입되는 L

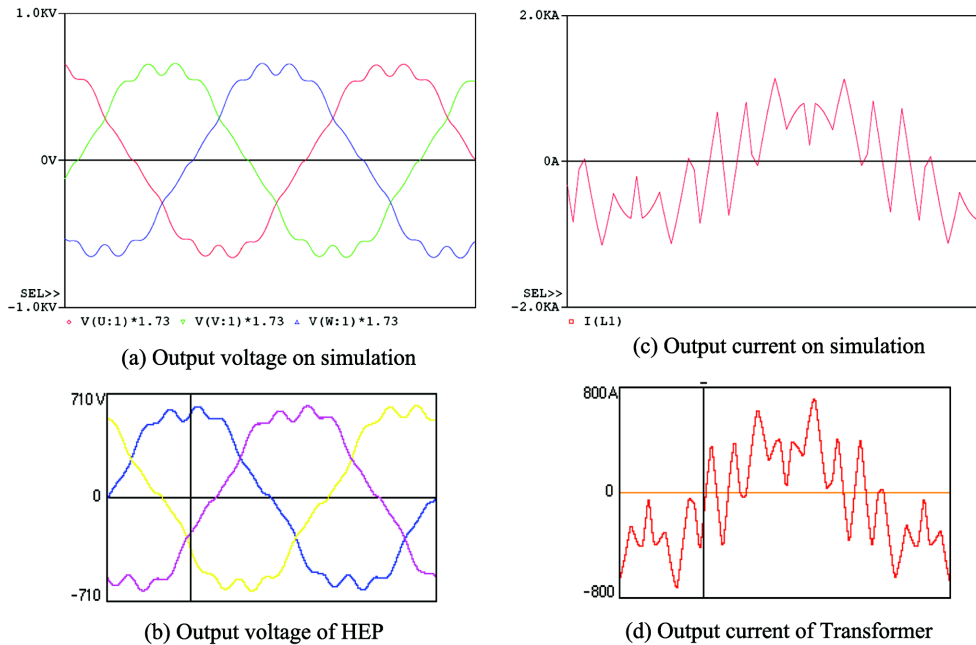


Fig. 7 Comparison on results between simulation and field test

Table 4 THD distribution on field test and simulation result(%)

구분	1차	3차	5차	7차	9차	11차	13차	15차	17차	19차
현차시험	100	3.77	6.9	1.05	0	3.5	3.5	0	0.64	0.47
시뮬레이션	100	3.12	5.26	0.75	0	3.6	3.5	0	0.72	0.47

필터, LC 필터, LC 필터 이후 부하측과 직렬로 인덕터를 추가로 연결하는 방식인 LCL 필터, 특정고조파를 저감시키는 노치 필터(또는 Tuned 필터) 등 4 가지 형식으로 분류가 가능하다. 기존 출력측 필터 파라미터로부터 식 (5)와 같이 3상 LC 필터의 차단주파수가 계산된다[5,9].

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{3L_F C_F}} = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{3} \times 180E-6 \times 1.77E-3} = 162.8\text{Hz} \quad (5)$$

한편 필터의 특성 임피던스 및 병렬부하에서의 Q_p(Quality factor at parallel loads)값은 식 (6)과 식 (7)를 통해 구해진다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_F}{C_F}} = 0.319 \quad (6)$$

$$Q_p = \frac{R_L}{Z_0} = 10.5 \quad (7)$$

식 (5)에서 보듯이 인버터의 출력주파수가 60Hz이므로 필터의 공진점은 3고조파인 180Hz에 근접하여 있음을 알 수 있다. 또한 식 (7)에서 Q값이 10 이상이므로 필터회로는 상당히 첨예한 차단주파수 특성을 갖는다. 이것은 약간의 불평형이 존재하게 되면 출력전압에는 3고조파가 나타날 수 있

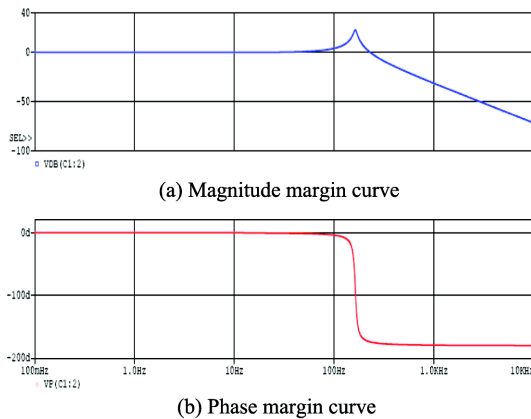


Fig. 8 The frequency characteristic of filter

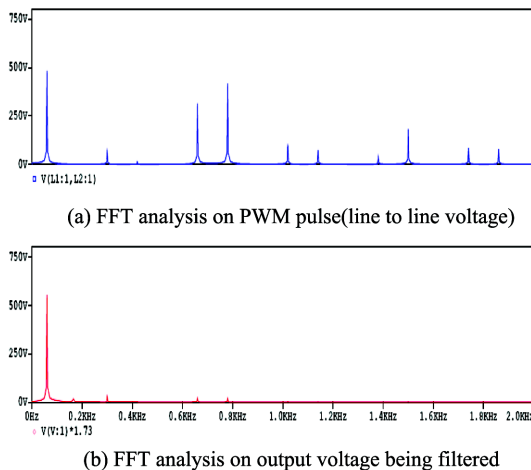


Fig. 9 Harmonic distribution by FFT analysis (Simulation)

음을 의미한다. 그림 8은 출력필터의 이득과 위상특성이며 그림 9는 FFT 변환을 통해 시뮬레이션 상에서 얻어진 PWM 파형 및 필터통과 후의 파형에 대한 고조파 분포를 나타낸다

이와 같이 현차시험과 시뮬레이션을 통해 출력전원을 고찰하면, 주로 5차 이상의 고조파에 의한 파형의 왜곡이 나타나고 있으며 이를 감쇄하기 위해 필터를 사용하고 있다. 그러나 필터의 차단주파수가 3차 고조파 부근에 위치하고 있어 부하 변동이나 전압변환 순간에 3차 고조파가 심하게 발생할 수 있으므로 정밀한 필터 설계가 필요하다.

3.2 제안된 필터회로

운행되고 있는 철도차량의 HEP 장치에서 인버터의 출력 전압 PWM파형 개선은 설치환경을 고려할 때 필터회로 보완을 통해서만 가능하다. 따라서 필터회로의 기본구조는 LC 필터형식이므로 식 (5)을 이용하여 차단주파수를 낮추도록 인덕턴스 L을 증가시키거나 커패시턴스 C를 증가시킨다. 그러나 커패시턴스는 기존에 상당히 큰 값이 사용되고 있어 무효전류가 커져 커패시턴스 C는 감소시키고 인덕턴스 L을 증가시켜야 한다. 인덕턴스는 변압기의 기생 인덕턴스를 이용하고 있어 외부에 추가적인 인덕터의 삽입이 요구된다. 그림 3(b)에서 보듯이 현차시험에서 5고조파가 가장 크고 3고조파, 11고조파 및 13고조파가 다음으로 크게 나타난다. 3고조파는 부하의 불평형이나 인버터의 피드백 전압조정 과정에서 발생하는 미세한 불평형으로 인하여 발생할 수도 있으므로 필터의 조정으로 완전히 제거를 하는 것은 매우 어렵다. 하지만 5차 이후의 고조파는 필터의 개선으로 제거 혹은 크기를 줄이는 것이 가능하다. 5차 고조파 이후에 대하여 고조파 저감하는 것을 목표로 하여 필요한 인덕턴스의 크기를 구하는 식은 식 (8)과 같다.

$$V_{o5} = \frac{1}{n\omega C_F} V_{i5} = \frac{1}{(n\omega)^2 L_F C_F - 1} V_{i15} \quad (8)$$

여기서 V_{o5} 는 출력에 포함된 5차 고조파의 크기, V_{i5} 는 입력에 포함된 5차 고조파의 크기

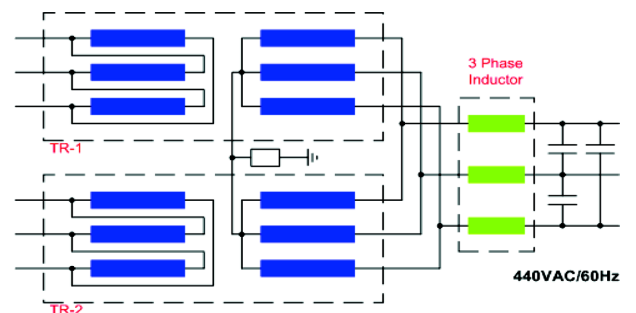


Fig. 10 The proposed filter circuit in case of inserted inductor

그림 10에서 3상 인덕터 100μH를 추가한 경우 식 (8)에 의하면 기존보다 약 17%의 크기로 작아지며 필터의 차단주

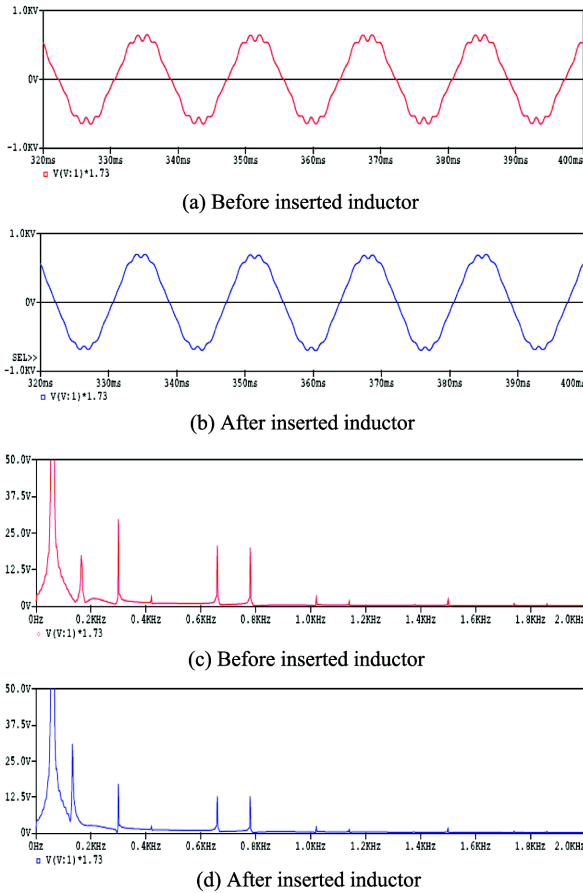


Fig. 11 Voltage waveform and FFT analysis in case of inserted inductor or not

파수는 식 (5)에 의해 130.5Hz가 된다. 그림 11은 그림 5와 같이 Pspice 회로도를 구성한 후 인버터 후단에 LC필터를 삽입한 시뮬레이션을 수행했을 경우 인덕터 삽입 전 후의 출력전압의 파형과 FFT 분석을 비교한 것이다. 인덕터를 삽입했을 경우 THD는 약 5~6%를 보였으며, 기존의 10% 전후를 보인 점에 비추어볼 때 개선되었음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문은 동력 집중식 신형 전기기관차의 전력변환장치인 HEP의 전력품질을 분석하기 위해 현차시험을 하였다. 이를 통해 인버터 PWM 스위칭 기법 및 스위칭 주파수 등을 유추해 내었으며 인버터의 출력전압 개선을 위해 필터회로의 개선안을 제시하였다. 필터측 커패시터의 크기를 조정하는 방법도 있을 수 있지만, 기존의 스위칭 기법이나 수동소자 등은 그대로 둔 채 추가적인 인덕터를 삽입하는 방법을 택하였다. 시뮬레이션을 통해 FFT 분석결과 3상 인덕터

100 μ H를 삽입했을 경우 THD는 약 5~6%를 보였으며, 기존의 10% 전후를 보인 점에 비추어볼 때 개선되었음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 지원에 의하여 이루어진 미래철도기술개발사업의 “R&D/10PRTD - C051915 - 02” 연구과제로 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D.S. Kim, K.R. Lee, et al. (2010) The THD measurement of HEP equipment power installed on 8200 series Electric locomotive, *The Spring Conference on the Korean Society for Railway, Changwon, Korea*. pp. 555-560.
- [2] C.J. Yun, E.J. Lee, et al. (2009) HEP equipment output Power quality in new model electric locomotive, *The Autumn Conference on the Korean Society for Railway, Jeju, Korea*. pp. 1108-1114.
- [3] J.M. Kim, E.J. Lee, C.J. Yun, et al. (2010) The Estimation on Switching Technique via Output Power Source Analysis of Power Conversion System in an Electric Railway Vehicle, *KIEE*, 59P(2), pp. 185-190.
- [4] S.H. Jeong, et al. (2007) A characteristic test of Auxiliary power supply for High Speed Rolling stock 350 experimental (HSR-350x), *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(1), pp. 84-87.
- [5] M.H. Rashid (2004) *Power Electronic Circuits, Devices, and Applications (3rd Edition)*, Prentice Hall.
- [6] A. Zuckerberger, A. Alexandrovitz (1986) Determination of Commutation Sequence with a View to Eliminating Harmonics in Microprocessor-Controlled PWM Voltage Inverter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IE-33(3), pp. 262-270.
- [7] S.R. Bowes, P.R. Clark (1992) Transputer Based Optimal PWM Control of Inverter Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 28(1), pp. 81-88.
- [8] S.R. Bowes, P.R. Clark (1992) Simple Microprocessor Implementation of New Regular-Sampled Harmonic Elimination PWM Techniques, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 28(1), pp. 89-95.
- [9] S.V. Araújo, A. Engler, B. Sahan, F. Antunes (2007) LCL filter design for grid-connected NPC inverter in offshore wind turbines, *The 7th International Conference on Power Electronics, Daegu, Korea*. pp. 1133-1138.

접수일(2010년 8월 17일), 수정일(2010년 11월 4일), 게재확정일(2010년 11월 25일)