

철도차량내의 전력변환장치 출력전원 분석을 통한 스위칭 기법 추정

논문
59P-2-10

The Estimation on Switching Technique via Output Power Source Analysis of Power Conversion System in an Electric Railway Vehicle

김재문[†] · 이을재^{*} · 윤차중^{**} · 김양수^{***}
(Jae-Moon Kim · Eul-Jae Lee · Cha-Jung Yun · Yang-Su Kim)

Abstract - This paper presents the estimation on switching technique via output power source analysis of power conversion unit in electric railway vehicle. The focus of this study suggested an alternative on critical problems by using head electric power(HEP). To achieve this, we have measured output power of HEP, and measurement devices set up at output of transformer connected HEP to analysis quality on output power source of head electric power(HEP) unit in electric railway vehicle. Using results of measurement of it, parameters are assumed for simulation to confirm estimation on switching technique. It is confirmed that switching technique is Selected Harmonic Elimination PWM(SHEPWM) and inverter switching frequency is less than 500[Hz].

Throughout experiment and simulation, it is estimated that switching technique used HEP is advanced SHEPWM and switching frequency is about 300[Hz]. Also leakage inductance in transformer is about 180[μH] less than 365[μH] known.

Key Words : Switching Technique, Head Electric Power(HEP), Selected Harmonic Elimination PWM(SHEPWM)

1. 서 론

화석연료 사용에 따른 환경오염과 연료비 상승에 따른 운영비용이 증가하면서 국내 철도분야에 전기를 이용한 전기동력식 철도차량이 지속적으로 도입되면서 전철화율이 증가되고 있다. 석탄 등 지하자원을 운송하는 국내 산업선인 경우 전철화 정책에 의해 도입된 전기기관차는 해외에서 철도차량을 도입되어 운영하고 있다. 그러나 해외에서 도입된 철도차량인 경우 원천제작사가 해외 회사인 관계로 공개된 기술 자료가 거의 없다. 따라서 대부분 기술이전이나 유지보수에 따른 기술적 사항이 제대로 이루어지지 않아 국내 전문가들이 전문적 지식과 철도차량 운영기관들이 운영경험에 의해 개량화 및 유지보수가 이루어지고 있는 실정이다[1-4].

국내 산업선에 운행 중인 신형 전기기관차인 경우 사이리스터(Thyristor)를 주회로 스위칭 소자로 사용하고 위상제어 정류방식을 사용하여 견인회로를 구성하고 있다. 하지만 제어방식의 특성상 입력측의 역률이 매우 낮아 변전소의 부담이 크며 직류전동기를 사용하므로 견인 전동기의 잦은 고장이 문제점으로 대두되고 있다. 이에 대한 개선방안으로 도입된 신형 전기기관차는 주회로 스위칭 소자로서 GTO(Gate Turn-Off)를 채용하고 VVVF 제어방식에 의한 유도전동기

를 구동함으로써 최고속도 150[km/h]의 고속운전이 가능하게 되었다. 신형 전기기관차에는 객차 전원 공급장치(Head Electric Power : HEP)가 탑재되어 발전차의 도움 없이도 객차에 직접 전원을 공급할 수 있다[4,5].

그러나 산업선에 운행 중인 철도차량인 경우 기존에는 주회로의 견인장치가 주된 문제점으로 도출되었으나 최근에는 객실에 공급되는 전원의 이상으로 인한 서비스측면의 문제점이 주로 대두되고 있다. 특히 출력전압의 품질저하로 추정되는 신호장치 간섭현상과 냉방장치의 이상동작 증가가 심각하여 여객수송의 목적으로 전기기관차를 운행하는 경우에는 탑재된 객차 전원 공급장치를 이용하기보다 발전차량을 별도로 견인하여 객실전원을 공급하고 있는 형편이다.

본 논문은 신형 전기기관차의 객차 전원 공급장치에 대한 출력전원의 품질을 분석하기 위해 출력회로에 대해 현차시험을 수행하였다. 취득된 실험파형 데이터를 근거로 하여 시뮬레이션을 통한 연역적 추론의 방법을 사용하여 철도차량내의 전력변환장치의 스위칭 기법을 추정하였다. 추정된 스위칭 기법이 현차시험을 통해 얻은 파형과 일치함을 확인하였다. 이를 통해 출력전압 품질저하에 따른 내부기의 오동작 발생을 추정하고 스위칭 동작에 따른 특정 고조파에 의한 간섭 가능성을 추정하여 현안 문제점에 대한 효과적인 기술적, 경제적 개선방법을 기대할 수 있다.

2. 객차 전원 공급장치 및 현차시험 고찰

2.1 객차 전원 공급장치

신형 전기기관차에는 그림 1과 같이 2대의 객차 전원 공급장치(HEP-1, HEP-2)가 설치되어 있으며 견인장치의 주회로 직류필터 회로단의 2.8[kV] 전압을 PWM(Pulse Width

[†] 교신저자, 중신회원 : 한국철도대학 철도차량전기와 조교수 · 공박
E-mail : goldmoon@krc.ac.kr

^{*} 정 회 원 : 이경산전(주) 대표이사 · 공박

^{**} 정 회 원 : 한국철도공사 책임연구원

^{***} 중신회원 : 한국철도대학 철도차량전기와 부교수 · 공박

접수일자 : 2010년 1월 7일

최종완료 : 2010년 3월 30일

Modulation) 제어하여 객실에 필요한 3상 440Vac 교류전원을 생성한다. 회로구성은 2 레벨 스위칭을 하는 인버터로 구성되어 있으며 주 권회로에서와 마찬가지로 GTO 소자가 사용되었다. 객차 전원 공급장치는 정상상태에서 1대만 동작하며 나머지 1대는 예비상태로 대기하다가 고장시에 자동으로 절체된다. 주변압기 탱크 내부에 설치된 독립적인 2개의 변압기를 사용하여 절연 및 감압을 수행하며 변압기의 2차측 출력은 병렬로 연결되어 있고 변압기 내부의 누설 인덕턴스와 델타(Δ)로 연결된 3개의 독립된 커패시터에 의하여 평활회로를 구성한다[4,5].

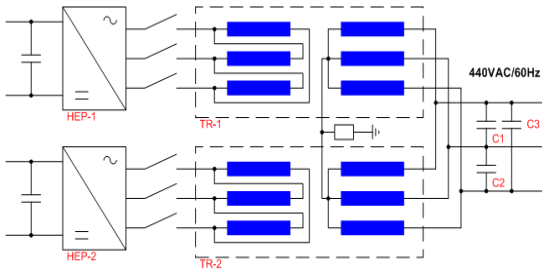


그림 1 객차 전원 공급장치와 출력변압기의 회로
Fig. 1 HEP and Circuit of Transformer

표 1 객차 전원 공급장치 출력변압기의 사양
Table 1 Specifications of Transformer on HEP

파라미터	사양
형식	Delta-Star
동작 주파수	60[Hz] \pm 1[Hz]
2차측 출력전압	440[V] \pm 3%
변압기 1차측 전류	247[A]
1-2차간(968V:440V) 전압비	2.2 :1
1차측 누설 인덕턴스(800[Hz] 이하)	0.365[mH] \pm 10%
최대전력	415[kVA]

표 2 출력측 필터회로 사양
Table 2 Specifications of filter circuit on output side

항목	내용
형식	3상 LC 필터
커패시턴스	1.77[mF]
커패시터 정격	129.2[kVar]/440[Vac]

2.2 현차시험을 통한 객차 전원 공급장치 전원 품질분석
2.2.1 출력전압 파형

객차 전원 공급장치의 출력측 전력의 품질분석을 위해 그림 2와 같이 계측회로를 구성하였다. 측정위치는 객차 전원 공급장치의 출력 변압기의 2차측 단자(출력 필터 커패시터 연결부)이고 사용된 계측장치는 CHAUVIN-ARNOUX사의 전력품질분석기 CA8334이다. 품질분석을 위해 기본파를 포함하여 50차까지의 고조파분석을 실시하였다.

현차 시험을 위해 청량리-영주 구간을 왕복운행하면서 8230호, 8231호 기관차를 대상으로 하였으며 시험조건은 냉방장치 자동운전이 될 수 있도록 하였다.

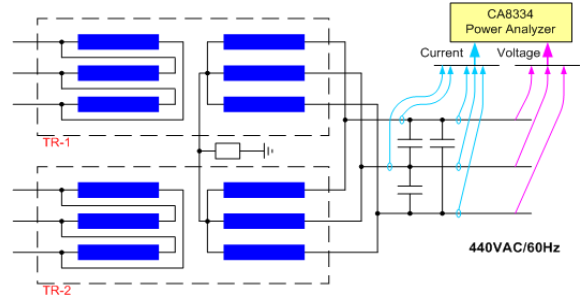


그림 2 출력전원을 분석하기 위한 계측 회로
Fig. 2 The measuring circuit to analysis on output power source

그림 3과 4, 그리고 표 3과 4는 객차 전원 공급장치를 연결한 후 측정된 출력전압과 THD 측정결과를 보여준다. 부하조건은 자동으로 동작되는 냉방기가 연결되어 있었으며 측정하는 동안 30A~80A 사이의 부하량 변화가 관측되었다.

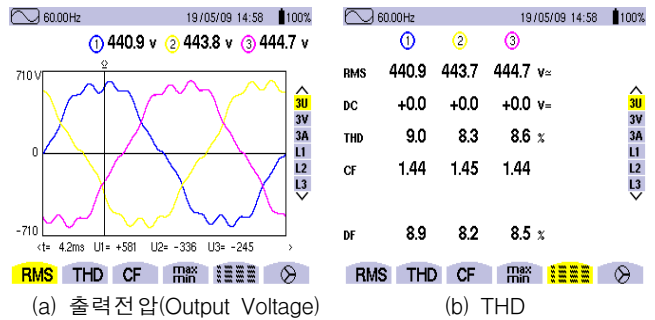


그림 3 8230호 출력전원 측정
Fig. 3 The measurement of output power source for 8230 locomotive

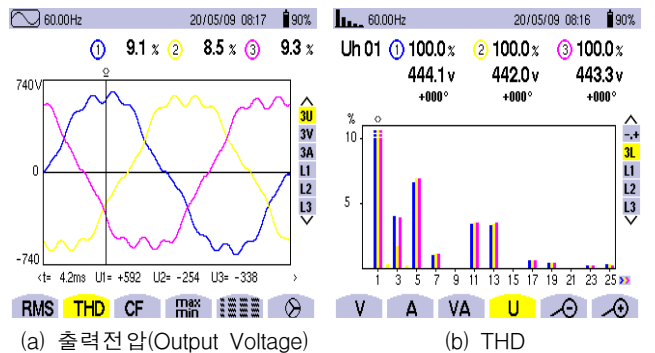


그림 4 8231호 전기 기관차의 HEP 출력전압
Fig. 4 Output voltage of HEP for 8231 electric locomotive

표 3 8230호 객차 전원 공급장치 출력전압 및 THD
Table 3 Output voltage and THD of HEP for 8230 locomotive

	U상	V상	W상	비고
전압[V]	441	444	448	정상
THD[%]	9.0	8.3	8.6	약간 높음
주파수[Hz]	60.00			정상

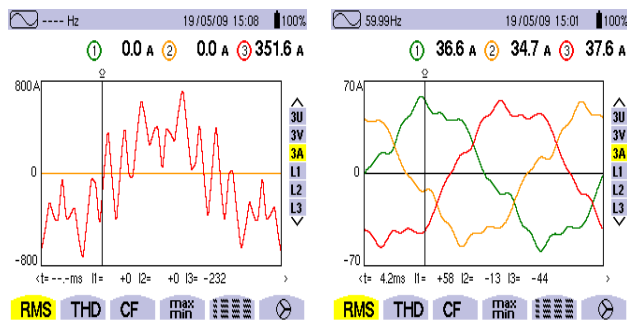
표 4 8231호 객차 전원 공급장치 출력전압 및 THD
Table 4 Output voltage and THD of HEP for 8231 locomotive

	U상	V상	W상	비 고
전압[V]	441	442	443	정상
THD[%]	9.1	8.5	9.3	약간 높음
주파수[Hz]	60.00			정상

2.2.2 출력 전원 분석

현차시험 대상차량에서 거의 유사한 출력전압 파형이 측정되었으며 출력전압은 기준값 440[Vrms]로 양호하게 제어되고 있다. 하지만 연속된 출력의 파형의 측정에서 출력파형에 포함된 고조파 왜율이 약 8.5~12% 이고 비주기적으로 10% 이상의 출력전압 변동이 측정되었다.

측정 결과를 토대로 고조파 분석을 하면, 일반적으로 전력용 스위칭 소자를 사용하고 PWM기법을 적용한 인버터 장치에서는 3의 배수차 고조파가 발생하지 않도록 하거나 최소화가 되도록 동기식 PWM과 적절한 캐리어 주파수를 선택한다. 이런 경우 정상적인 제어가 이루어졌다고 가정하면 기본파를 제외한 다음의 고조파로부터 캐리어 주파수까지의 사이에는 고조파가 거의 발생하지 않는다. 만약 중성점을 사용하지 않고 부하를 결선하는 경우 이론적으로는 3의 배수차 고조파가 발생하지 않거나 매우 작아야 한다.



(a) 변압기 출력전류 (b) 부하전류
(a) Transformer output current (b) Load current

그림 5 8230호 전기 기관차 출력전류
Fig. 5 Output current of HEP for 8230 electric locomotive

그러나 그림 4에 보듯이 고조파 분석에서 3차 고조파를 포함한 저차 고조파가 상당히 크게 발생하고 있는데 이것은 인버터 이후에 연결된 필터부의 설계상수가 적절하지 않거나 부하단이 필터에 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. 한편 변압기의 2차측 출력전류를 측정하였다. 그림 5에서 보듯이 2차측 출력전류에는 필터링을 위해 사용되는 커패시터의 무효전류도 포함되어 있는데 저차 고조파 제거를 위해 사용된 필터 커패시턴스의 값이 매우 커서 부하전류의 약 5~10배에 해당하는 무효전류가 흐르고 있다.

3. PWM 기법 추정 및 시뮬레이션

3.1 객차 전원 공급장치의 PWM 기법 추정

PWM 주파수는 필터의 차단주파수 계산을 위해 필요하

다. 정확한 PWM 동작주파수의 검출을 위해 객차 전원 공급장치의 출력측 PWM 전압(변압기 1차측 전압)을 측정하고자 하였으나 차상에서 측정이 용이하지 않아 변압기 2차측 출력전압 및 전류를 측정하였다. 2차측 출력전류에는 부하전류 뿐만 아니라 필터 커패시터의 무효전류가 포함되어 있으므로 전류의 고조파 형태와 출력전압의 왜곡정도를 측정하여 PWM 주파수의 추정이 가능하다.

상기에서 언급하듯이 객차 전원 공급장치는 GTO 소자를 사용하므로 스위칭 주파수는 500Hz 미만으로 추정된다. 저속의 스위칭 주파수를 이용한다면 동기식 PWM을 사용했을 것이며 GTO 인버터에서 많이 사용되는 특정 고조파 제거(Selected Harmonic Elimination) 알고리즘을 사용했을 가능성이 높다. 변조 주파수 지수값을 알면 PWM 주파수를 알 수 있으므로 표 5와 같이 가정을 하였다.

표 5 객차 전원 공급장치의 PWM 기법 추정
Table 5 The estimation on PWM technique of HEP

항 목	추 정 내 역	비 고
PWM 방법	Sine PWM	전통적인 방법임. 구현이 간단하지만 저속 PWM에는 적합하지 않음
	특정고조파제거 (SHEPWM : Selected Harmonic Elimination PWM) 알고리즘	저속의 인버터에 최적
PWM 형식	동기식 PWM	저속의 인버터에 필수
동작주파수 범위	500Hz 내외	GTO 소자의 스위칭 한계
변조 주파수 선형방법	3의 배수이면서 홀수이어야 함 (짝수고조파 제거)	$m_f = \{ 5, 7, 9, 15, \dots \}$

짝수 고조파를 제거하기 위해 홀수의 변조 주파수를 사용하여야 한다. 평형 3상의 출력을 발생시키기 위해 3의 배수차 변조 주파수가 필요하지만 6은 짝수이므로 사용하지 않는다[4,5]. 위의 모든 조건에 만족하는 변조 주파수 지수값을 구하면 5, 7, 9가 가장 유력한 값이 된다. 따라서 가능한 PWM 주파수는 다음 식과 같다.

$$f_s = f_1 \times 5 = 60 \times 5 = 300Hz, m_f = 5인 \text{ 경우} \quad (1)$$

$$f_s = f_1 \times 7 = 60 \times 7 = 420Hz, m_f = 7인 \text{ 경우} \quad (2)$$

$$f_s = f_1 \times 9 = 60 \times 9 = 540Hz, m_f = 9인 \text{ 경우} \quad (3)$$

여기서 f_s 는 스위칭 주파수, f_1 은 기본파 주파수, 그리고 m_f 는 변조 주파수 지수값이다.

한편 입력전압에 대한 출력전압은 선형 변조영역 ($m_a \leq 1.0$)에서 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 상전압 \widehat{V}_{AN} 에 대한 지수값은 식 (4)로 표현된다.

$$\widehat{V}_{AN} = m_a \cdot \frac{V_{dc}}{2} \quad (4)$$

따라서 식 (4)으로부터 선간전압 V_{LL} 은 식 (5)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} V_{LL} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \widehat{V}_{AN} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a \cdot V_{dc} \quad (m_a \leq 1.0) \\ &\approx 0.612 m_a \cdot V_{dc} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 V_{dc} 는 입력측 직류전압, m_a 는 변조 전압 지수값 표 1에서 객차 전원 공급장치 후단에 설치된 출력 변압기의 입출력 전압비율은 2.2:1이므로 입력측 직류전압이 2.8[kV] 이므로 계산상 편의를 위해 변압기 2차측 전압으로 환산하면 1.273[kV]가 된다. 따라서 식 (5)를 이용하여 전압 변조율을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_a &= \frac{V_{LL}}{0.612 \cdot V_{dc}} \\ &= \frac{440}{0.612 \cdot 1273} = 0.564 \end{aligned} \quad (6)$$

한편 객차 전원 공급장치에 적용될 것으로 예상되는 특정 고조파 제거(SHEPWM) 방식에 살펴보면, 노치(Notch)라고 부르는 미리 계산된 스위칭 각(Angle)을 반주기동안 사용하여 특정 고조파를 제거함과 동시에 전압의 크기를 제어할 수 있다. 일반적인 비정현 주기파의 푸리에 급수 전개는 아래와 같다[6-9].

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (7)$$

여기서 a_0 는 직류성분

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \cos n\omega t dt \quad (8)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \sin n\omega t dt \quad (9)$$

파형은 1/4 주기를 대칭으로 하여야 하므로 기수(Odd) 고조파만으로 충분하다. 따라서 식 (7)은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며, b_n 은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$v(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad (10)$$

$$b_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} v(t) \sin n\omega t dt \quad (11)$$

$v(t)$ 가 단위크기, 즉 $v(t) = \pm 1$ 이라고 가정하면 b_n 은 식 (12)와 같이 전개되며, 일반화시키면 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{4}{\pi} \left[\int_0^{\alpha_1} (+1) \sin n\omega t dt + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (-1) \sin n\omega t dt \right. \\ &\quad + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} (+1) \sin n\omega t dt + \dots + \int_{\alpha_{K-1}}^{\alpha_K} (-1)^{K-1} \sin n\omega t dt \\ &\quad \left. + \int_{\alpha_K}^{\pi/2} (-1)^K \sin n\omega t dt \right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{4}{n\pi} [1 + 2(-\cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_2 - \dots + (-1)^K \cos n\alpha_K)] \quad (13) \\ &= \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^K (-1)^k \cos n\alpha_k \right] \end{aligned}$$

식 (13)은 K 개의 α 각을 사용하여 기본파를 제외하고 총 $K-1$ 개의 고조파를 제거할 수 있음을 나타낸다. 그림 6은 전형적인 SHEPWM의 펄스파형의 형태를 나타낸 것으로 2개의 α 각을 사용하여 5펄스 PWM을 수행하고 있다.

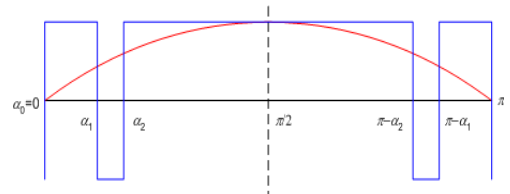


그림 6 SHEPWM 기법에서 스위칭 파형
Fig. 6 Switching waveform on SHEPWM technique

3.2 시뮬레이션

현차시험을 통해 얻은 출력전압 파형과 상기의 가정을 조합하여 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 표 6은 시뮬레이션을 반복적으로 수행하면서 측정된 파형과 가장 유사한 경우의 파라미터를 추정된 값이다. 시뮬레이션 툴은 PSpice를 이용하여 전압 및 전류에 대하여 시뮬레이션을 실시하였으며, PWM 스위칭 각의 계산과 고조파분석에 사용된 시뮬레이션 툴은 식 (13)을 이용하여 자체 제작된 프로그램이다.

표 6 시뮬레이션을 위한 파라미터
Table 6 Parameters for simulation

항 목	설정값	항목	설정값
PWM 방식	SHEPWM	주파수 배율(m_f)	5
입력전압(V_{dc})	1,273	출력전압(V_{LL})	440
변조전압(m_a)	0.51	누설 인덕턴스	180[μH]
부하전류	120[A]	필터 커패시턴스	1.77[mF]

그림 7은 시뮬레이션 각 부의 파형을 나타낸다. $\pi/2$ 까지 두 개의 스위칭 각이 사용되어 반주기동안 펄스의 수는 5가 되며 스위칭 주파수는 300[Hz]가 된다. 그림 7(a),(b),(c)는 스위칭 소자의 게이트 신호들이며 그림 7(d),(e),(f)는 필터 전의 선간전압 파형을 보여준다.

주목할 점은 PWM에 사용된 스위칭 각이 일반적인 SHEPWM에서 사용되는 방식으로 구하여진 값이 아니라 고조파의 크기를 전체적으로 최소화하는 최소리플전류 PWM (Minimum Ripple Current PWM) 방식에 근사한 점이다. SHEPWM의 단점은 제거된 고조파의 다음에 나오는 고조파의 크기가 매우 커서 필터를 정교하게 사용하지 않는 경우 고조파 손실이 커지는데 반하여 이 방식은 전체적으로 고조파가 최소화 되도록 스위칭 각을 설정하므로 전동기를 제어하는 경우 고조파에 의한 철손을 효과적으로 줄일 수 있는 장점이 있다. 하지만 크기가 작더라도 저차 고조파 성분이 남아있는 경우가 있으므로 필터의 사용이 필수적인 전원장치에는 적합하지 못하다.

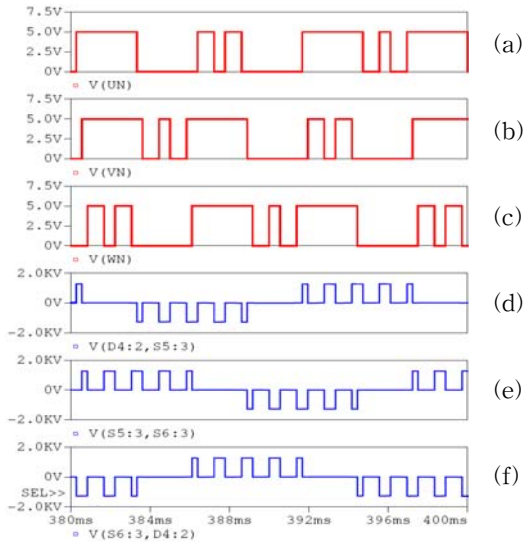


그림 7 게이트 신호 및 선간전압 파형
Fig. 7 Waveforms on gate signal and line-to-line voltage

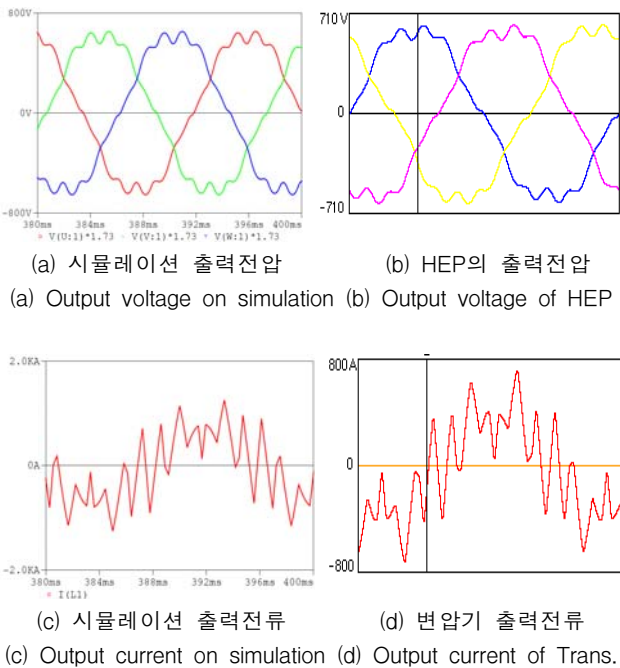


그림 8 시뮬레이션과 현차시험 결과 파형 비교
Fig. 8 Comparison on results between simulation and field test

그림 8(a)는 시뮬레이션을 통해 구해진 출력 전압파형이며 그림 8(b)의 현차시험을 통해 측정된 전압 파형과 유사함을 보여준다. 그림 8(c)는 객차 전원 공급장치의 변압기 2차측에 흐르는 출력전류를 시뮬레이션 한 파형으로 8(d)의 측정된 실제 전류와 매우 유사함을 알 수 있다.

그림 9는 일반적인 특정고조파제거 알고리즘에 의한 PWM 출력파형의 시뮬레이션 결과이다. 기본파의 크기는 단위 값으로 0.5이며 $\pi/2$ 주기 동안 2개의 스위칭 각이 사용되었다. 이때 기본파의 크기를 만족하며 5차 고조파를 제거하기 위하여 사용된 스위칭 각은 각각 16.84° 와 49.3° 이다. 이 방식에서는 5차 고조파가 완전히 제거되었으나 7차 고조파의 크기가 기본파보

다 큰 단점이 있다. 반면 그림 10의 객차 전원 공급장치에서 사용된 알고리즘에서는 각각 66.0° 및 84.0° 의 스위칭 각이 사용되었으며 5차 고조파가 완전히 제거되지 않는 7차 고조파가 작아 필터의 차단주파수 선정이 비교적 유리하다.

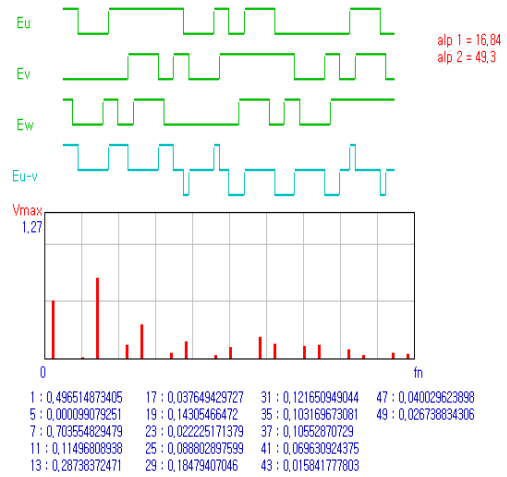


그림 9 일반적인 SHEPWM 기법의 출력결과
Fig. 9 Output result of typical SHEPWM technique

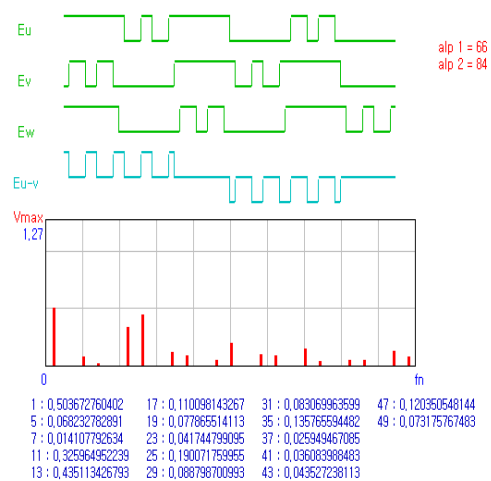


그림 10 HEP 장치의 SHEPWM 알고리즘 출력결과
Fig. 10 Output result of SHEPWM technique on HEP

현차 시험을 통해 측정된 데이터를 기준파형으로 놓은 후 시뮬레이션 상에서 여러 가지 방식으로 PWM 알고리즘을 적용하여 출력된 파형을 분석한 결과 객차 전원 공급장치는 특정고조파제거 PWM(SHEPWM) 알고리즘을 적용하고 있다고 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과를 종합적으로 정리하면, 특정고조파 제거 알고리즘, 고조파 최소화 기법에 근사한 SHEPWM 기법을 사용하고 있으며, 스위칭 주파수는 300[Hz]이다. 또한 변압기 결선방식이 델타-스타 방식이므로 1차측 임피던스를 2차측으로 환산하면 1/3이 되어야 한다. 변압기에 포함된 누설 인덕턴스는 변압기 1차측을 기준으로 365[μ H]로 알려져 있으나 이 경우 2차측은 130[μ H]도 되지 않는다. 하지만 시뮬레이션에서 현차시험을 통해 얻은 파형을 근사화한 결과 2차측 필터 인덕턴스는 약 160~200

[μ H]정도로 추정되어 시뮬레이션에서는 180[μ H]를 적용하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 확인된 커패시터의 무효전류는 현차시험을 통해 측정한 값과 유사함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 신형 전기기관차 운행 중에 자주 발생하고 있는 차량의 냉방장치의 오동작 등을 규명하기 위해 객차 전원 공급장치 출력전원 품질을 분석하였다. 이를 위해 현차 시험을 통해 변압기 출력전압과 출력전류를 측정하여 시뮬레이션에서 PWM 기법, 스위칭 주파수, 전압-전류파형 등을 실제와 거의 동일하게 구현하여 미지의 값들을 추정하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

객차 전원 공급장치의 인버터는 300[Hz]의 스위칭 주파수를 사용하여 출력 PWM 파형을 발생시키고 있음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 현차시험을 통해 측정된 출력전압의 THD는 평균적으로 9~10[%] 정도이며, 인버터 스위칭 주파수는 300[Hz]에 불과하므로 5차 이상의 고조파(5, 7, 11 및 13차)에 의한 파형의 왜곡이 나타나고 있다. 적용된 PWM 기법으로는 특정고조파제거방식을 사용하고 있으며 반복된 시뮬레이션 파형과 실제 측정 파형 간의 비교조사를 통해 약간의 5차고조파 및 7차고조파를 허용하는 수정된 PWM 방법을 사용함으로써 파형의 개선을 시도한 것으로 추정된다.

향후 시뮬레이션 결과를 토대로 객차부하에 미치는 영향 감소를 위해 필터의 차단주파수를 조정하거나 무효전류를 감소하는 방안에 대해 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 지원에 의하여 이루어진 미래철도기술개발사업의 "R&D/10PRTD-C051915-02 연구과제로서, 관계 부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 강길형, 고속철도차량 유지보수론, 삼성종합출판, 2009.
- [2] 김재문, 김양수, 장진영, "고속전철 주행시 이선현상 모델링 방법에 따른 전도성 노이즈 해석", 대한전기학회 2008년도 추계학술대회 전기설비전문위원회, pp.72-75, 2008.
- [3] 최성균, 유양하, 윤차중, 김재문 외 4인, "최신 반도체소자를 이용한 고속철도 차량용 추진제어 기술개발", 미래철도기술개발사업 기획연구 최종보고서, 2008.
- [4] 이을재, "신형 전기기관차 HEP장치 인버터 출력전원 개선방안 검토", 코레일 자문보고서, 2009.
- [5] 철도인재개발원, 전기기관차의 구조 및 기능, 삼성종합인쇄, 2006.
- [6] M. H. RASHID, Power Electronic Circuits, Devices, and Applications (3rd Edition), Prentice Hall, 2004.
- [7] B. K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, 2002.
- [8] S. R. Bowes and P. R. Clark, "Simple Microprocessor Implementation of New Regular-Sampled Harmonic

Elimination PWM Techniques", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 28, No.1, pp. 89-95, Feb. 1992.

- [9] A. Zuckerberger and A. Alexandrovitz, "Determination of Commutation Sequence with a View to Eliminating Harmonics in Microprocessor-Controlled PWM Voltage Inverter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-33, No.3, pp. 262-270, Aug. 1986.

저 자 소 개



김재문 (金才文)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토해양부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국철도대 철도차량전기과 조교수
Tel : 031-460-4612
Fax : 031-461-2944
E-mail : goldmoon@krc.ac.kr



이을재 (李乙宰)

1989년 호서대 전자공학과 졸업, 1991년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사), 2001년 인하대 전기공학과 졸업(공학), 1997년~현재 이경산전(주) 대표이사
Tel : 031-234-1730
Fax : 031-234-1737
E-mail : euljae@e-kyoung.com



윤차중 (尹次重)

2007년 한밭대 전자공학과 졸업, 2009년 충남대 대학원 기계시스템공학과 졸업(석사), 1995년~현재 한국철도공사 차장 (책임연구원)
Tel : 042-615-4701
Fax : 02-361-8542
E-mail : korea@korail.com



김양수 (金陽洙)

2004년 고려대 대학원(공학). 1971년 1월~2002년 3월 철도청 근무, 1999년 11월 전기철도 기술사, 2008년 1월~ 현재 국토해양부 철도건설 심의위원, 2008년 1월~ 현재 항공철도사고조사 위원회 철도분야 자문위원, 2002년 3월~ 현재 한국철도대학 철도차량전기과 부교수
Tel : 031-460-4442
E-mail : kysrail@dreamwiz.com