8200대 신형 전기기관차 HEP 장치 고조파 왜율 측정

The THD measurement of HEP equipment power installed on 8200 series Electric locomotive

김대성* 이경락** 안홍관*** 박종천★

Kim, Dae-Sung Lee, Kyung-Rac Ahn, Hong-Goan Park, Jong-Chun

ABSTRACT

8100 series Electric locomotive was imported from SIEMENS of Germany on 2001. 8100 series model is modified from BR152 model to be complied with national environment. After 8100 series Electric locomotive carried out main line test for long time, 8200 series Electric locomotive produced in 10 locomotives with improvement and supplement on some parts. the one of supplement is to install the HEP equipment. In paper, about total harmonic distortion of HEP equipment power, it compares the result of combination with the result of actual measurement. It checks whether the measurement meets the specification of design or not. And it describes international standard about total harmonic distortion of supply system.

국문요약

2001년 KORAIL에 도입된 8100대 신형 전기기관차는 독일 SIEMENS사의 BR152 모델을 국내 설정에 맞도록 들어와 부분 수정 및 보완 통하여, 2003년 8200대 신형 전기기관차를 탄생하도록 한 PROTOTYPE 이다. 8100대 신형전기기관차와 8200대 신형 전기기관차는 유사하지만, 일부 수정되고 개선된 부분 중의 하나가 객차 전원 공급(이하'HEP) 장치이다. 이에 본 논문은 8200대 신형 전기기관차의 HEP 장치에서 무궁화호 객차로 공급되는 HEP 전원의 고조파 왜율에 대하여 원제작사의 조합시험 결과를 바탕으로 현재 운용중인 KORAIL 8200대 신형 전기기관차의 HEP 전원의 고조파 왜율을 실측하여 상호 비교하고, 전원 공급 장치의 고조파 왜율에 대한 국제규격 및 현황을 설명하고자 한다.

1. 서론

전원계통의 정현파 전압에 비선형 저항특성을 갖는 전기기기가 접속되면 이 기기에 흐르는 전류는 왜형파가 된다. 그 전류는 정격 주파수의 기본파와 기본 주파수의 정수배가 되는 주파수 성분, 즉 고조파 성분으로 분해된다. 이러한 비선형 저항을 가지는 기기는 고조파 전류 발생원으로 생각할 수 있다. 이 같은 고조파 발생원이 회로에 접속되어 있으면 거기에서 유출하는 고조파 전류는 가선전압을 통하여 변전소 측에 유입된다. 고조파 전압은 기본파 전압에 중첩하여 전압파형을 왜형파로 만든다. 이러한 왜형파 전압은 회로에 접속된 모든 전기기기에 다시 유입되어 기기의 파손, 오동작을 유발할 수 있다.

따라서 본 논문은 고조파 왜율을 정의한 국제규격을 조사하고, 8200대 신형 전기기관차 객차에 공급되는 3상 AC 440V 고조파 왜율에 대하여 HEP 장치에 대한 조합시험 결과와 현차 시험 조사결과를 바탕하여 8200대 신형 전기기관차 HEP 장치의 고조파 왜율이 국제 규격 사양과 비교하고자 한다.

Hyundai Rotem 기술연구소(singkleir@hyundai-rotem.co.kr)

* 김대성, 연구원(저자)

*** 이경락, 선임연구원

**** 안홍관, 책임연구원

★ 박종천, 수석연구원

2. 본론

2.1 용어의 정의

O 고조파: 기본 주파수의 n배의 주파수. 어느 일정한 주기성을 갖는 파를 분해해 보면 가장 낮은 주파수(기본 주파수 또는 기본파)와 이 주파수의 2배, 3배, …, n배의 주파수를 포함하고 있는데, 그 n배의 주파수를 고조파(harmonic frequency)라고 한다.

O 왜율 : 입력에 어떤 신호를 넣었는데 내부의 회로망에 의해 그 신호에 대한 고조파 (Harmonics)성분이 생기는데 이 성분과 신호와는 비율을 고조파 왜율(Total harmonic distortion, THD)이라 한다.

O 왜형파: 고조파 전압이 기본파 전압과 중첩되어 생성되는 전압 파형

O FRA : 미 연방철도청(Federal Railroad Administration)

O HEP : 객차 전원 공급장치(Head End Power)를 말한다.

O PWM : 펄스폭변조(Pulse Width Modulation)

2.2. 고조파 왜율의 국제 규격 조사

1) 입력 전압에 대한 고조파 왜곡의 허용범위

(관련자료: as per British Recommended standard 65/3, 1976)

Supply system Voltage(kV)	THD(V) %	THD(V)% for Odd and Even Harmonics	
		Odd(홀수)	Even(짝수)
0.400	5%	4%	2%
3.3; 6.6; 11	4%	3%	1.75%
12.6; 24; 33	3%	2%	1%
110; 160	1.5%	1%	0.5%

표 1 입력전압에 대한 THD(V) 허용범위

2) THD(V)% 저전압 왜곡율의 한계

Special Applications	General System	Dedicated System
3%	5%	10%

표 2 저전압 분류와 왜곡율의 한계 (관련자료: as per IEEE Standard 519-1992)

※ FRA Regulation(selection 408): Total Harmonic distortion is 6% maximum

3) 입력전류에 대한 고조파 왜곡의 허용범위

(관련자료: as per British Recommended standard 65/3, 1976)

Supply system Voltage(kV)	h=no, current harmonic a In(RMS A Current value)																	
h/kV	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
3.3; 6.6; 11	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
12.6; 24; 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
110; 160	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

표 3 입력전압에 대한 전류 고조파 한계의 허용범위

2.3 8200대 신형 전기기관차 주회로도 전원 계통도

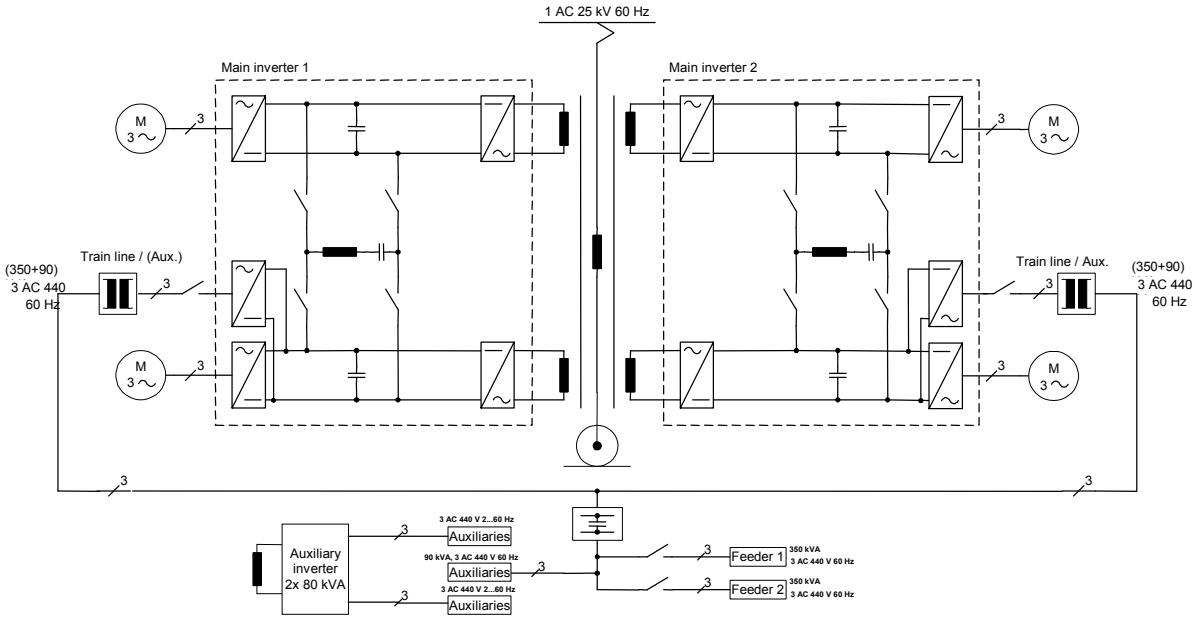


그림 1 신형전기기관차 주 회로도

- O 주변압기는 기관차 하부의 대차사이에 설치되어 있으며, 판토그라프와 주 차단기를 통해 가선으로부터 전력을 공급받는다.
- O 추진제어장치에는 각 대차에 대해서 주변압기를 통해 전력을 공급받는 4대의 4상한 제어장치(4QS)가 설치되어 있다. 이 장치는 직류 전압 중계회로(DC Link)에 전력을 공급하며, 각각의 대차에 설치된 직류 전압 중계회로는 2대의 병렬 인버터 및 HEP 인버터에 전력을 공급한다.
- O 각 인버터는 적정 전압과 주파수에서 3상 교류의 법칙에 따라 자체 내의 견인 전동기 및 객차 전원에 전력을 공급한다. 또한 기관차 보조장치의 전력공급을 위한 보조전원장치가 설치되어 있다.
- O 객차 전원 공급용 HEP 인버터는 3상 모듈로 구성된 펄스폭 변조 방식이다. 3상 AC 440V 출력 신호는 고정전압/주파수인 사인파 펄스폭 변조신호와 대응되며, 클럭 주파수는 300Hz이다(GTO 전력소자 사용)
- O 출력전압은 평활화된 사인파 전압이 아니라 DC 링크전압으로부터 HEP PWM에 의해 발생된 전압블록이다. 따라서 HEP 변압기 내부 상호인덕턴스와 외부의 필터 커패시터를 이용하여 LC 필터를 구성하여 사인파에 가까운 파형을 만드는 방식이다.

2.4 발전차

2.4.1 전원 계통도

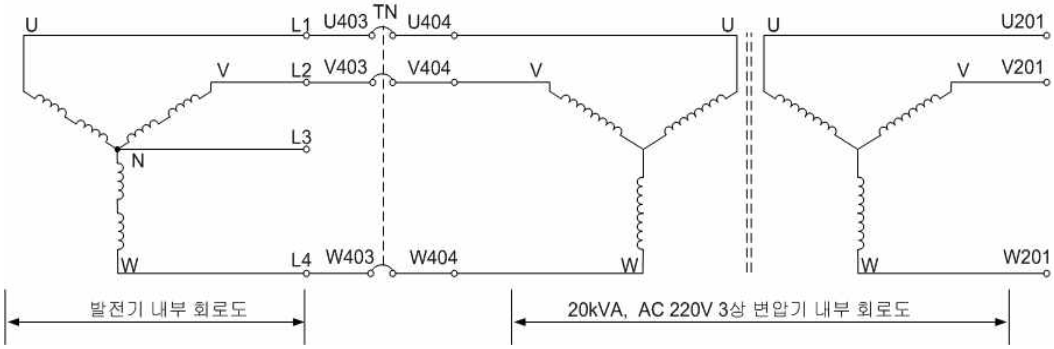


그림 2 발전차의 발전기 출력 전원 계통도

O 회전자계에 의해 정현파가 생성되고, 이 정현파 신호를 오차 범위에서 제어하기 위해 별도의 자동전압조정기(automatic voltage regulator, AVR)를 사용하기 때문에 부하 변동에 능동적으로 적응할 수 있다.

2.4.2 회로전압 및 주요 부하

O AC 440V 회로 : 냉난방장치, 부속실 난방기, 배기 팬

O AC 220V 회로 : 조명장치, 오물처리장치, 보온장치(자기조정 히터), 상용등, 방송장치, 예어 커튼

O DC 24V 회로 : 승강대 자동문, 활주방지장치, 오물처리장치, 비상등, 호령장치, 장애인용 승강기 장치, 독서등

2.4.3 객차 전원 공급장치 사양 비교

표 4 객차 전원 공급장치 사양

항 목	8200대 신형전기기관차	발전차	
		200kW	300kW
제작사/기종	SIEMENS	NEWAGE/HCI434C2	NEWAGE/HCI434C2
방 식	PWM 인버터제어	3상교류, 회전계자형	3상교류, 회전계자형
상수-선수	3상-3선	3상-3선	3상-3선
용 량	2*350KVA (2*315KW)	250kVA(200kW)	375kVA(300kW)
정격전압	440V±3%	440V±5%	440V±5%
정격전류	-	328A	492A
정격주파수	60Hz±1Hz	60Hz±1Hz	60Hz±1Hz
역 율	0.9	0.8	0.8
효 율	95.5%	92.8%	93.2%
스위칭 주파수	300Hz	-	-
전력소자	GTO	-	-
왜율	10% 이내	-	-

2.5 HEP 출력전압 조합시험 결과(자료: 조합시험, 지멘스)

표 5 단위(전압: V, 전류: A, 주파수: Hz, 왜율: %)

구 분	측정값								비고
	U_1	I_1	U_2	I_2	U_3	I_3	F_{U1}	왜율	
Section 5.3.1: 무부하	445.3	0	444.6	0	0	0	59.9	7.9	그림 3(a)
Section 5.3.2: Load 1	444.6	46.29	443.7	46.51	0	0	60.0	8.0	그림 3(b)
Section 5.3.3: Load 3	445.7	238.9	444.1	238.4	0	0	59.9	7.9	그림 3(c)
Section 5.3.4: Load 4	445.4	416.7	444.0	416.7	0	0	59.9	7.8	그림 3(d)
Section 5.3.5: Load 5	446.7	845.2	445.6	847.1	0	0	59.9	8.1	그림 3(e)

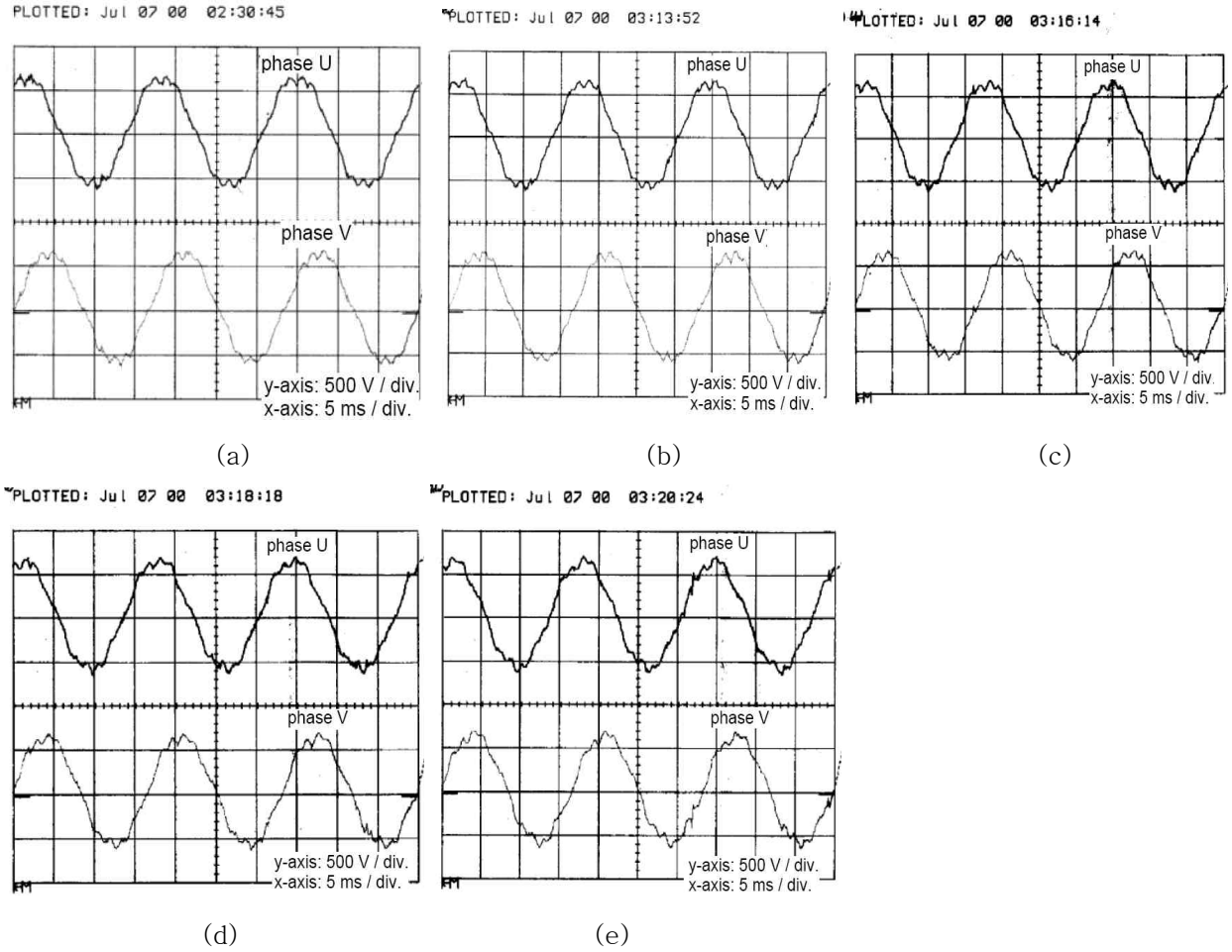


그림 3 HEP 출력전압에 대한 조합시험 파형

2.6 HEP 출력 특성 현차시험

2.6.1 측정 장비 설치도

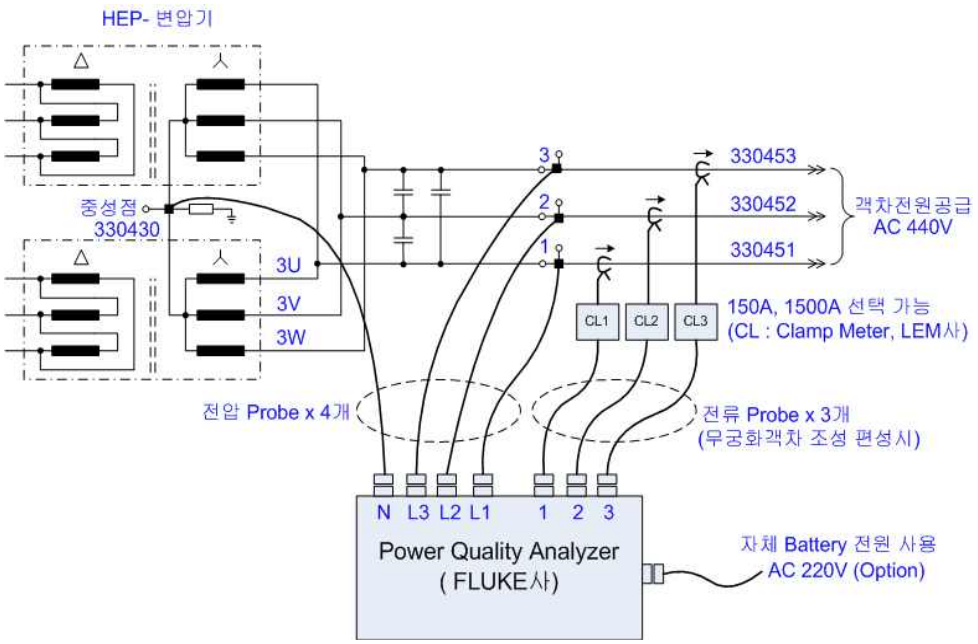


그림 4 측정 장비 설치도

2.6.2 환경 설정

O 연결방법 : 3상 Star 결선(중성점 연결)

O 측정전압 : AC 440V

O 주파수 : 60 Hz

O 표시정보 : 스코프 파형 및 위상기, 전압/전류/주파수, 고조파

O 기록방법 : 장비 내 Memory에 저장, 디지털카메라 촬영

2.6.3 측정파형 사진

1) HEP 출력 특성 측정(신형전기기관차 단독)

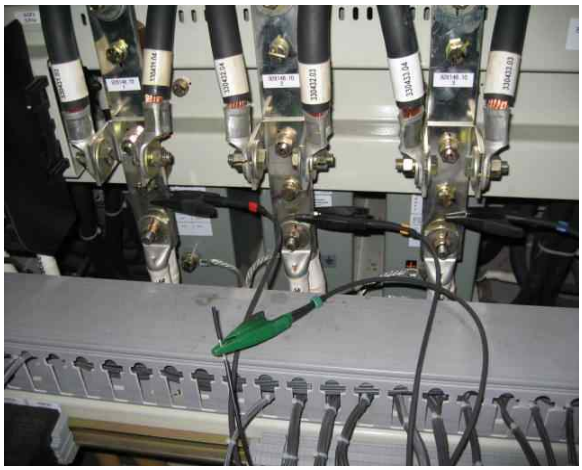
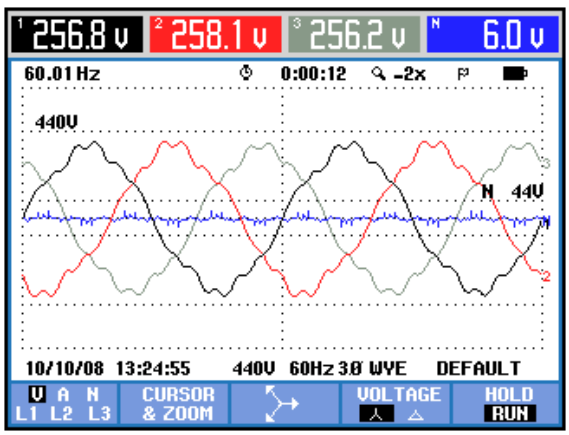
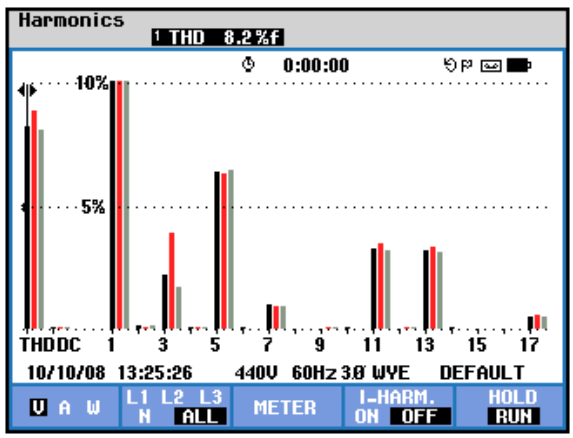
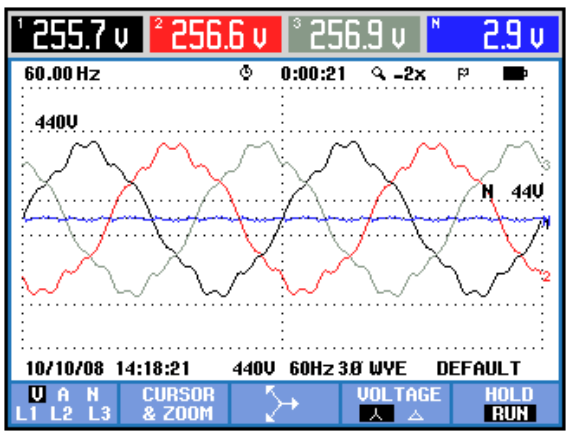
<table>
<tr><td>
</td><td>  </td></tr>
<tr><td>< 시험차량: 8244호 ></td><td>< 측정 Probe 위치 ></td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>< HEP 출력전압, 주파수 파형 ></td><td>< HEP 출력전압 고조파 왜율 ></td></tr>
<tr><td colspan="2">-. 전압 : U상: 444.8 V(256.8 V), V상: 447.1 V(258.1 V), W상: 443.8 V(256.2 V)
※ ( )안은 중성점을 기준으로 측정된 각 상전압(V_p)의 RMS값 임,
선간전압(V_l)의 크기: $V_l = \sqrt{3}\, V_p$
-. 주파수: 60 Hz
-. 고조파 왜율(THD): 8.2%(rms 값)</td></tr>
</table>

표 6 신형전기기관차 단독 시, HEP 출력 특성 측정

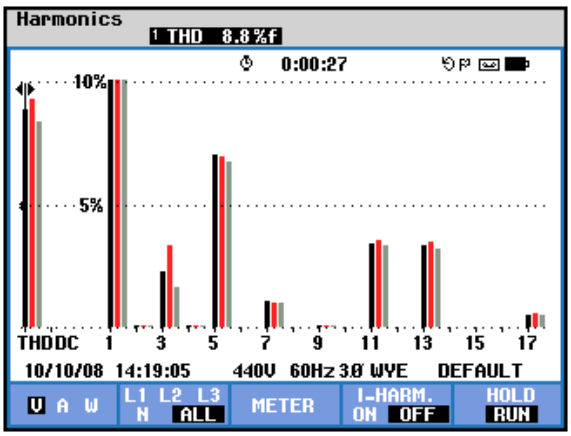
2) HEP 출력 특성 측정(신형전기기관차+구형무궁화객차 8량 조성)

< 시험차량: 8217호 >

< 측정 Probe 위치 >



< HEP 출력전압, 주파수 파형 >



< HEP 출력전압 고조파 왜율 >

-. 전압 : U상: 442.9 V(255.7 V), V상: 444.5 V(256.6 V), W상: 445.0 V(256.9 V)

※ ( )안은 중성점을 기준으로 측정된 각 상전압(V_p)의 RMS값 임,

선간전압(V_l)의 크기: $V_l = \sqrt{3}\, V_p$

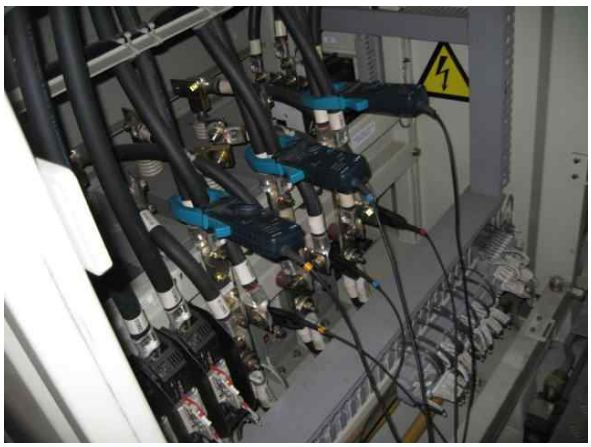
-. 주파수: 60 Hz

-. 고조파 왜율(THD): 8.8%(rms 값)

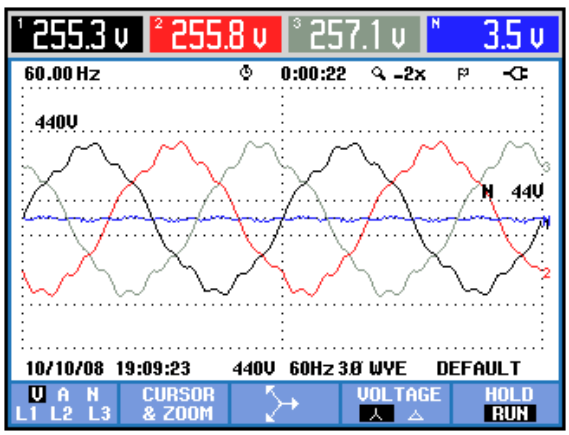
표 7 신형전기기관차+구형무궁화객차 조성 시, HEP 출력 특성 측정

3) HEP 출력 특성 측정(신형전기기관차+신형무궁화객차 8량 조성)

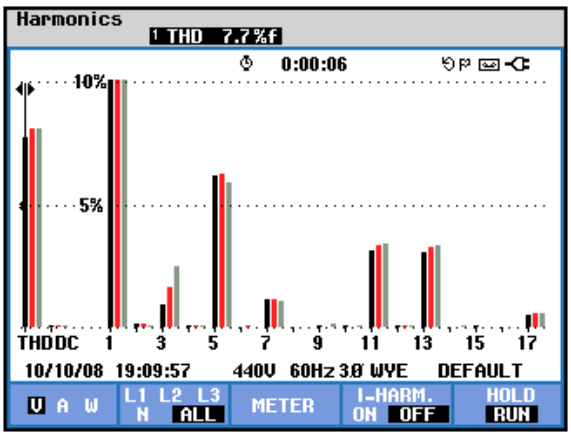
< 시험차량: 8243호 >



< 측정 Probe 위치 >



< HEP 출력전압, 주파수 파형 >



< HEP 출력전압 고조파 왜율 >

-. 전압 : U상: 442.2 V(255.3 V), V상: 443.1 V(255.8 V), W상: 445.3 V(257.1 V)

※ ( )안은 중성점을 기준으로 측정된 각 상전압(V_p)의 RMS값 임,

선간전압(V_l)의 크기: $V_l = \sqrt{3}\, V_p$

-. 주파수: 60 Hz

-. 고조파 왜율(THD): 7.7%(rms 값)

표 8 신형전기기관차+신형무궁화 객차 조성 시, HEP 출력 특성 측정

4) 측정 파형 결과값 정리

표 9 ( )안은 중성점을 기준으로 측정된 각 상전압의 RMS값 임.

구 분	측정값					부하조건
	U	V	W	주파수	왜율	
신형전기기관차 단독	444.8 V (256.8 V)	447.1 V (258.1 V)	443.8 V (256.2 V)	60.0 Hz	8.2%	무부하
신형전기기관차+ 구형무궁화객차 조성	442.9 V (255.7 V)	444.5 V (256.6 V)	445.0 V (256.9 V)	60.0 Hz	8.8%	운행 중 정거장 정차시
신형전기기관차+ 신형무궁화 객차 조성	442.2 V (255.3 V)	443.1 V (255.8 V)	445.3 V (257.1 V)	59.9 Hz	7.7%	

※ 신형전기기관차 고조파 왜율 기준값(조합시험 성적서 참조): 10% 이내

2.7 조합시험 대비 현차의 실측값 비교

표 10 단위(전압: V, 전류: A, 주파수: Hz, 왜율: %)

구 분	조합시험 시 고조파 왜율 측정값								실측값
	U	I_1	V	I_2	W	I_3	F	왜율	왜율
Section 5.3.1: 무부하	445.3	0	444.6	0	0	0	59.9	7.9	8.2%
Section 5.3.2: Load 1	444.6	46.29	443.7	46.51	0	0	60.0	8.0	7.7~ 8.8%
Section 5.3.3: Load 3	445.7	238.9	444.1	238.4	0	0	59.9	7.9	
Section 5.3.4: Load 4	445.4	416.7	444.0	416.7	0	0	59.9	7.8	
Section 5.3.5: Load 5	446.7	845.2	445.6	847.1	0	0	59.9	8.1	

O 구형 및 신형무궁화 객차 조성 편성시 실측값 비교
고조파 왜율은 부하조건 및 전원 선로의 임피던스에 따라 변화할 수 있지만, 유사 조건에서 측정된 고조파 왜율은 다음과 같이 신형무궁화 객차 조성 편성시에 다소적게 나타났다.

O 신형전기기관차+ 구형무궁화객차 조성 편성시 고조파 왜율: 8.8%
O 신형전기기관차+ 신형무궁화 객차 조성 편성시 고조파 왜율: 7.7%

3. 결론

O HEP 장치에서 공급되는 전원의 고조파 왜율은 부하조건 및 전원 선로의 임피던스에 따라 왜율이 변동될 가능성이 있으므로, KORAIL에서 운용 중인 8200대 신형 전기기관차의 영업 운행 객차 조성 중, 그 빈도가 가장 높은 8량 편성에 대하여, 조합시험의 결과를 바탕으로 현차에서 얼마만큼의 유사성을 보이는지 가늠할 수 있는 척도가 되었다.

O 신형전기기관차의 HEP 전원의 품질을 확인하기 위하여 신형전기기관차를 단독 및 무궁화객차(구형/신형)와 편성 조성하여 현차 시험을 확인한 결과, HEP 출력전압은 AC 440V±3% 범위, 출력주파수는 60Hz±1Hz 범위 그리고 출력전압의 고조파 왜율은 10% 이내의 기준치를 각각 만족함을 알 수 있다.

O 고조파 왜율은 근소하게 변화할 수 있지만, 조합시험시 유사 부하조건에서 측정된 고조파 왜율 편차는 기준값 범위를 벗어나지 않았다.

O 보조 전원 장치에 대한 규격은 IEEE Standard에서 Dedicated system인 경우, 10%로 규정하고 있고, 미 연방 철도청의 경우에는 6%인 Standard가 존재한다. 그러나, 국내 철도차량과 관련하여, 전원공급 장치의 고조파 왜율에 대한 규격이 전무한 실정이며, 고조파의 악영향과 회로에 미치는 부정적인 요소에 대해서는 여러 자료가 많으나, 고조파 왜율의 적정 값에 대한 구체적은 연구결과가 없어, 이와 관련된 연구활동과 고조파와 이에 영향을 미치는 각종기기에 대한 활발한 연구를 통하여 고조파 왜율에 대한 정확안 정의가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. KORAIL 8200대 신형 전기기관차 제작 사양서
2. IEEE Standard 519-1992
3. British Recommended standard 65/3, 1976