

전력변환장치 연계에 따른 계통전원에 고조파 및 역률이 미치는 영향

김재문*, 김양수*, 장진영**
한국철도대*, 중앙대학교**

The influence on harmonic and power factor with power source connected power conversion unit

Jae-Moon Kim*, Yang-Soo Kim*, Chin-Young Chang**
Korea National Railroad College*, Chung-Ang University**

Abstract - 전기철도에서 사용되는 전원은 한진 계통을 통해 유입되고 별도의 전원 계통을 구축하여 운영한다. 따라서 한진 계통과의 인터페이스에 따른 국내의 기준을 만족하여 전기철도 계통전원 시스템을 구축하여야 한다. 본 논문에서는 철도차량 사업소 구축시 중수선, 종합 관리동 등의 부하특성에 따른 부하역률 변화 및 전력변환장치를 연계되었을 때 계통전원에 미치는 고조파 영향을 연구하였다. 시뮬레이션을 통해 철도차량 사업소내의 계통전원이 국내의 기준에 적합할 수 있도록 제시하였다.

1. 서 론

전기 에너지를 이용한 전기철도는 고속성, 고효율, 환경친화성의 이유로 경부고속전철을 포함하여 기존의 디젤엔진 차량을 대신하여 열차의 주 견인원(Traction Source)으로 철도 시스템을 대체하고 있는 추세이다. 철도의 진철화는 전기를 견인동력으로 하여 열차를 운행할 수 있도록 하는 전기시설물을 의미하며 전력을 공급받는 송전선로, 변전설비, 전차선로 및 제반설비 등이 있다. 따라서 한진 전력 계통과 매우 유사한 요소를 갖추고 있어 전력 계통에서 발생할 수 있는 전력품질의 문제점이 전기철도에도 나타날 수 있는데, 전기철도 시스템은 각 선로 정수 및 변압기, 부하단의 부하특성에 따라 전압과 전류의 위상이 차이가 발생한다. 또한 견인 전동기 구동으로 부하의 변동이 심하고 전력변환장치를 사용하는 전기 철도 시스템의 특성으로 인해 고조파가 발생한다. 이러한 문제점은 통신유도장해, 신호회로에 미치는 악영향, 보호계전기의 오작동, 형광등 안경기의 소음, 배전용 차단기의 오작동 등 많은 영향을 미칠 수 있다.[1-2]

한편 교류전철화에서는 한국 전력으로부터 3상 전력을 공급받아 스코트 변압기를 통해 단상전력으로 변환한 전기에너지를 공급받기 때문에 3상 전압 불평형의 문제가 발생할 수 있다. 일반적으로 급전거리가 길고 열차 급전하여 운용할 때는 부하의 증대에 따라 전압강하가 크게 되어 변전소의 공급전압을 상승시켜야 하는 경우가 있다. 특히 전원계통이 작고 변전소의 임피던스가 작을 때는 이와 같은 문제가 발생된다. 이러한 문제점을 발생시킬 우려가 있는 부하의 경우 전력품질 보상설비의 시설을 요구하고 있으며 전자파(EMI), 고조파 및 역률 등 전력품질의 규제를 강화하고 있어 전기철도에서의 전력품질 향상 대책을 강구하고 있다.

국내 전기철도 계통과 더불어 철도차량을 유지보수하고 검수하는 차량기지내에 대한 전력품질도 보장받아야 한다. 본 논문은 철도차량기지 구축시 부하특성에 따른 부하역률 변화 및 전력변환장치를 연계되었을 때 계통전원에 미치는 고조파 영향 등을 정상 운전시 부하단 부하특성에 따른 전압, 전류의 위상과 비상 운전시 부하역률 변화를 연구하였다.

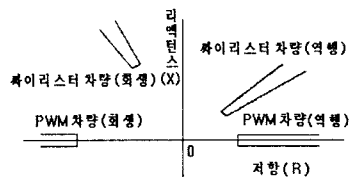
2. 관련 이론

2.1 철도부하의 특성[1]

급전계통의 부하인 철도차량은 특성상 시동 정지가 빈번하게 반복적으로 이루어지고 큰 견인력으로 주행해야 하므로 대용량의 부하전력이 요구되고 크기는 시간적, 공간적으로 급변한다. 또한 전철급전 계통은 주로 3상 전력계통으로부터 단상의 전력으로 변환하여 급전 받고 있으므로, 3상 전원계통의 각 상 전류는 더 이상 평형을 유지하지 않고 3상 전압의 불평형을 초래할 수 있으며, 결과적으로 계통의 전력 품질을 저해하여 관련된 다른

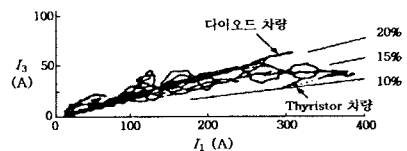
설비의 운전에도 영향을 끼친다. 차량기지내에서 부하로 사용하고 자 하는 부하 특성을 살펴보기로 한다. 최근의 고속철도 구동시스템은 전력변환장치인 컨버터와 인버터를 내재하고 있으며 전력변환장치는 위상제어 및 펄스폭 변조방식에 의하여 제어되기 때문에 고조파를 발생시킨다.

고속철도차량은 전력전자 기술의 발달과 고속대용량 반도체 소자의 발달 및 마이크로프로세서 기술발달에 의해 경량화에 따른 고속화 및 유지보수에 장점을 갖춘 RL부하인 교류 유도전동기 및 동기전동기의 사용을 적극 채택하고 있다. 한편 교류 전기 철도차량은 전력변환방식에 따라 위상제어 차량과 PWM제어 차량으로 구분되는데 그림 1과 같은 부하특성을 갖는다.

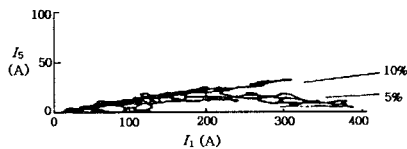


〈그림 1〉 각종 철도차량의 부하영역 특성

부하전류의 저차 고조파 특성을 살펴보면 그림 2에서 보듯이 위상제어 차량인 교류전기차에서는 단상전력을 직류로 변환시키기 때문에 교류측 전류에 고조파를 함유되어 있다. 기본파의 증가에 대한 고조파의 변화는 사이리스터 제어차량인 경우 위상제어이므로 복잡하게 변화하지만 다이오드 차에서는 직선적이다. 즉 고조파 함유율(최대 기본파에 대한 최대 고조파 비율)은 3차조파로 20~25%, 5차고조파 10~15% 정도이다. 한편 PWM 제어차량은 그림 3에서 보듯이 저차고조파의 함유율은 위상제어 차량보다 작은 4~8%으로 기본파 전류에 대하여 거의 일정하며 회생시가 역률 시 보다 약간 크다.

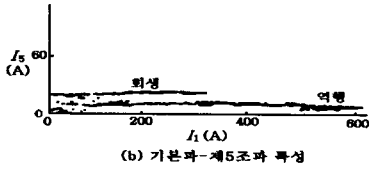
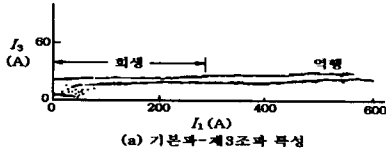


(a) 기본파-제3조파 특성



(b) 기본파-제5조파 특성

〈그림 2〉 위상제어차량의 저차고조파 특성



〈그림 3〉 PWM제어차량의 저차고조파 특성

2.2 전기철도에서의 전벽품질

일반적으로 교류전기철도의 문제점은 크게 불평형 및 고조파, 부하변동으로 나눌 수 있는데 철도차량은 단상 대용량이므로 이러한 중대한 문제점을 갖고 있다. 철도차량 기지에서도 전기철도 급전 시스템과 마찬가지로 철도차량이 운행되므로 상기와 같은 문제점을 고려하여 계통을 구축해야 한다.

2.2.1 불평형률과 전압변동률

불평형 상태를 나타내는 합리적인 방법은 Charles L. Fortescue에 의해 제안된 대칭좌표법에 의해 정역상분의 비율 갖고 정의하는 방법이다. 일반적으로 3상 전압, 3상 전류는 각 상의 전압, 전류의 값이 같으며 위상은 120°인 상태가 평형상태이지만, 어떤 원인에 의해 평형상태가 흐트러져 각 상의 전압 또는 전류의 값이 같지 않게 되어 위상이 120°를 유지하지 못하는 경우를 의미한다. 여기서 전압 불평형율을 K, 전류 불평형율을 U라고 하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{V_N}{V_P} \quad (1)$$

$$U = \frac{I_N}{I_P} \quad (2)$$

단, V_P, I_P 는 전압, 전류의 정상분 V_N, I_N 는 전압, 전류의 역상분

한편 전압 변동률을 대칭좌표법에 의한 표시, 즉 Voltage Dip로 나타내면 아래와 같다.

$$\alpha(pos) = \frac{-\Delta u}{u_0} \quad (3)$$

$$\lambda(neg) = \frac{\Delta u_1}{u_0 - \Delta u} \quad (4)$$

단, Δu : 정상분 전압강하, u_0 : 무부하 정상분 전압, Δu_1 : 역상분 전압

2.2.2 전벽품질에 따른 국내외 기준[2]

전철 급전계통에서 3상 계통의 불평형을 초래하고 이러한 전압 불평형은 결과적으로 계통의 전력품질을 저해하여 관련된 다른 설비의 운전에도 영향을 끼치게 된다. 이에 전기설비 기술 기준령 제 275조, 통상산업부 고시 51조에서는 전압 불평형률의 규제를 기존의 1시간 평균 3%에서 10분 평균 1%로 강화하고 있고 점차적으로 유럽규격과 동일한 규제를 적용하도록 강화하고 있다.

한편 전기철도 시스템은 견인 전동기를 구동시키기 위하여 많은 전력변환장치를 사용함. 수도권 1호선의 경우 다이오드 정류기, 산업선 구간에서는 세미브릿지형 정류기, 과천/안산선의 경우 PWM 컨버터와 VVVF 인버터를 이용하여 견인전동기의 속도 제어를 수행함. 이러한 전력변환장치의 사용으로 인한 고조파 발생이 큰 문제가 되고 있다. 이러한 전기철도 시스템에서 발생된 고조파는 통신유도장해, 신호회로에 미치는 악영향, 보호계전기의 오동작, 병렬 커패시터로의 과전류, 고조파 공진현상 초래, 형광등 안정기의 소손, 과전류 계전기 코일의 소손, 배전용 차단기의 오동작 등 많은 악영향을 준다. 따라서 국내의 전기설비기준

법령뿐만 아니라 해외의 IEEE, IEC 규격 등에서도 이를 규제하는 규정을 제정하고 있다. 전기공급 규정 41조의 경우 고조파, 전압 불평형, 플리커 장애를 발생시키거나 그러한 우려가 있는 부하에 대하여 조정장치 시설을 요구하고 있다.

역률기준은 국내인 경우 한전 입입점에서 본 계통전체의 역률은 어떠한 운전조건에 대하여도 0.9 이상이어야 한다. 또한 고조파에 대한 기준은 고조파 왜형률(THD)을 통해 규정되는데, 전고조파 왜형률(THD)은 고조파 전압의 실효값과 기본파 전압 실효값의 비로서 식 (5)와 같이 나타내며 고조파 발생의 정도를 나타내는데 많이 사용된다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100 (\%) \quad (5)$$

여기서, V_1 : 기본파 전압, V_n : 각 차수의 고조파 전압
고조파에 대한 제한규정은 한전인 경우 전기공급 기준으로 표 1과 같이 정의하고 있고 표 2와 표 3에서는 IEEE 519 고조파 전압기준 및 고조파 전류기준을 적용하고 있다.

〈표 1〉 한전 전기공급기준

전압	구분	지중선로가 있는 S/S에서 공급		가공선로만 있는 S/S에서 공급	
		전압왜형률 (%)	등가방해 전류(A)	전압왜형률 (%)	등가방해 전류(A)
66kV 이하		3	-	3	-
154kV 이하		1.5	3.8	1.5	-

〈표 2〉 IEEE 519 고조파 전압기준

전압	각 고조파성분의 왜곡	(단위 : %)	
		THD	
69kV 이하	3.0	5.0	
69kV ~ 161kV	1.5	2.5	
161kV 이상	1.0	1.5	

〈표 3〉 IEEE 519 고조파 전류기준

SCR = I_{SC} / I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	THD
20 이하	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20~50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50~100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100~1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
1000이상	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

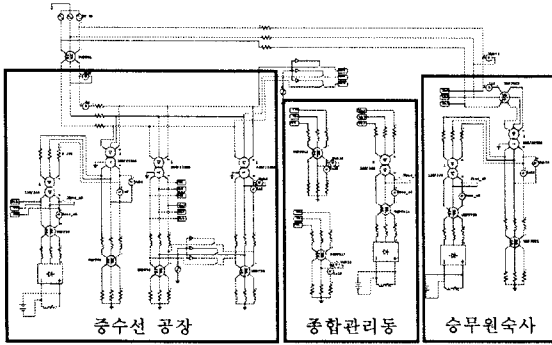
단, 여기서 SCR : Short Circuit Ratio, I_{SC} : 측정지점에서 최대 단락전류, I_L : 측정지점에서 최대부하전류

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 철도차량기지내에서 전력변환장치 연계에 따른 전력계통전원이 역률과 고조파에 미치는 영향을 살펴보기 위해 그림 4, 표 4와 같이 일반적인 계통도를 기준으로 살펴보았다.

〈표 4〉 사용된 계통전원 파라미터값

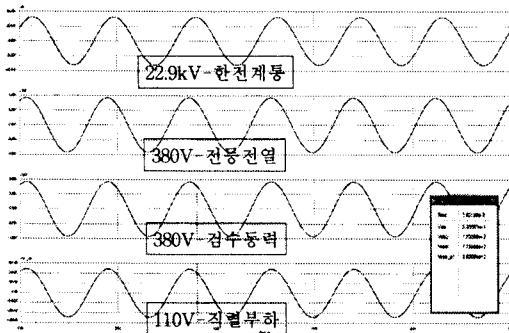
구분	변압기 1차/2차	비고
중수선	22.9kV/380V-220V	전동전열/검수동력
	380V/110V	직류부하
종합관리동	중수선 연강선	전동전열, 일반동력
	380V/110V	직류부하
승무원숙사	22.9kV/380V-220V	전동전열, 동력용
	380V/110V	직류부하



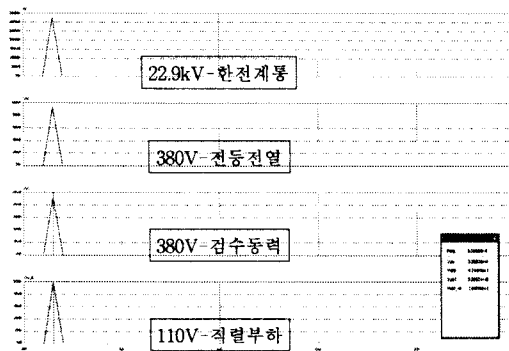
〈그림 4〉 전력계통 시스템 구성도

3.1 고조파 분석

그림 5의 파형은 중수선 공장내의 전력계통 전원을 보여준다. 한전 계통라인을 통해 22.9kV의 교류전원을 공급받아 Δ-Y변압기를 통해 22.9kV/380V-220V으로 변환된다. 그리고 계통도에서 380V로 강압된 교류전원은 Δ-Δ 변압기를 통해 380V/110V로 변환되어 삼상 정류기(Three Phase Rectifier)와 연결된다. 계통상 각 부의 순시전압이 22.9kV/380V/110V의 교류전압이 변압기를 통해 강압되어 부하에 인가되는 파형을 보여준다.



〈그림 5〉 각 부의 계통전원

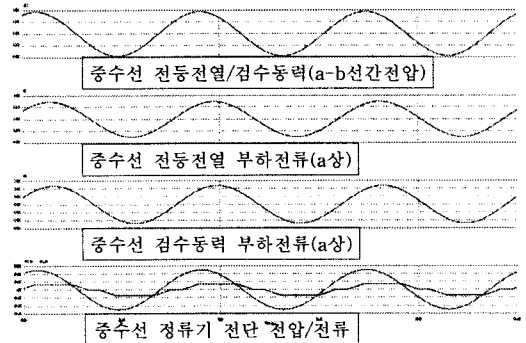


〈그림 6〉 그림 5에 대한 각 부의 FFT 분석파형

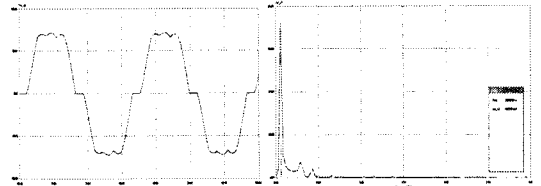
그림 6은 계통전원에 대한 고조파 분석(FFT) 결과를 나타낸 파형으로 기본파 성분 60Hz 만이 존재함을 확인할 수 있다. 그림 7은 한전 계통전원에서 중수선까지의 케이블 선로정수를 상기에서 선정한 값을 적용하여 분석한 결과 각 부의 전압과 전류값을 나타낸 파형이다.

그림 7의 파형을 보면 선간전압과 선전류의 위상차를 갖는 Δ-Y 변압기 특성상 전압이 전류보다 위상이 앞섬을 확인할 수 있었고, 중수선 전원계통내 직류를 필요로 하는 부하에 흐

르는 전류는 저차 고조파가 포함되어 전류가 왜곡되고 있음을 알 수 있다. 이에 따라 직류부하측 정류기 전단(Δ-Δ변압기 2차측)에 변압기 2차 선로정수와 인덕터를 선정하여 시뮬레이션을 하였다.



〈그림 7〉 중수선 전력계통 연계시 전압, 전류파형



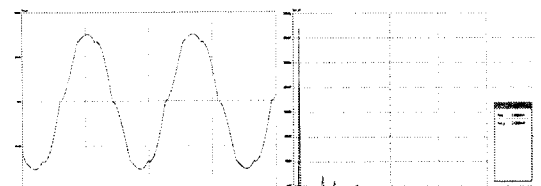
〈그림 8〉 정류기 부하전류 및 고조파 분석

그림 8은 변압기 2차 선로정수 1Ω, 0.3mH로 선정하여 시뮬레이션을 수행하여 정류기 부하전류 및 고조파를 분석한 것으로 고조파 함유율을 살펴보면 표 다음과 같다.

〈표 5〉 고조파 함유율

고조파 차수	전류값(A)	상대적 크기(%)
1	66.2	100
5	5.8	8.8
7	4.0	6.0
11	1.1	1.7
13	0.4	0.6
17	0.47	0.7
19	0.62	0.9

고조파 함유율을 보면 5차, 7차 고조파가 고조파 차수의 왜형률 기준(3.0%)을 초과하고 있으며, 또한 전고조파 왜형률(THD)은 10.85%로 IEEE 519 기준(5.0%) 초과로 인해 규제 기준을 벗어나고 있다.



〈그림 9〉 정류기 부하전류 및 고조파 분석

그림 9는 변압기 2차 선로정수 0.2Ω, 0.3mH로 선정하여 시뮬레이션을 수행하여 정류기 부하전류 및 고조파를 분석한 것

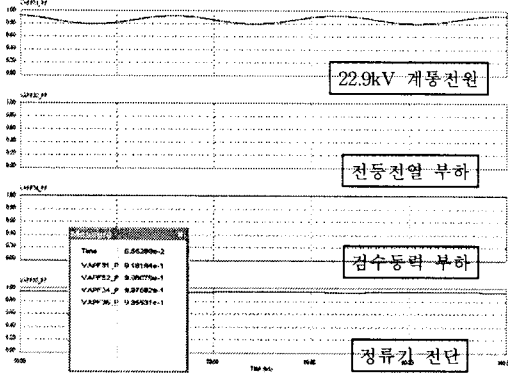
으로 전고조파가 고조파 차수의 왜형률 기준(3.0%)을 만족하고 있고 전고조파 왜형률(THD)은 4.04%로 IEEE 519 기준(5.0%)을 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

〈표 6〉 고조파 함유율

고조파 차수	전류값(A)	상대적 크기(%)
1	313	100
5	9.1	2.9
7	7.8	2.5
11	3.2	1.0
13	2.1	0.6
17	1.3	0.4
19	0.4	0.1

3.2 역률 분석

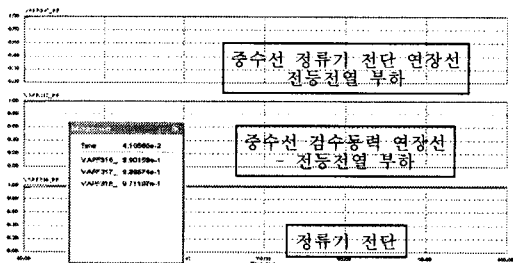
그림 10은 중수선 공장내의 전력계통 전원에 각 부의 역률을 순시적으로 보여준다. 역률을 측정한 각 부분은 제천차량 사업소의 중수선 22.9kV라인, 중수선 전동전열 부하측(Δ-Y변압기 2차측) 라인, 중수선 검수동력 부하측(Δ-Y변압기 2차측) 라인, 정류기 전단(Δ-Δ변압기 2차측)라인으로 이에 대해 분석한 결과는 표 7과 같고 계산 기준값(90%)을 만족한다.



〈그림 10〉 중수선 공장 역률 분석

〈표 7〉 중수선 공장 역률 분석

측정부	역률값(%)	비고
중수선 22.9kV라인	91.8	계통 전원선
전동전열 부하 (Δ-Y변압기 2차측) 라인	99.8	저항 부하
검수동력 부하측 (Δ-Y변압기 2차측) 라인	99.7	R-L부하
정류기 전단 (Δ-Δ변압기 2차측) 라인	93.6	R-L부하



〈그림 11〉 종합관리동 역률 분석

〈표 8〉 종합관리동 역률분석

측정부	역률값(%)	비고
전동전열 부하	99.1	계통전원 연장선
전동전열 부하	98.9	검수동력 연장선
정류기 전단	97.1	R-L부하

그림 11의 파형은 종합관리동 내의 전력계통 전원에 각 부의 역률을 순시적으로 보여준다. 역률을 측정한 각 부분은 제천차량 사업소의 22.9kV(Δ-Y변압기 1차측)라인, 종합관리동 전동전열 부하측(Δ-Y변압기 2차측) 라인, 종합관리동 일반동력 부하측(Δ-Y변압기 2차측) 라인, 정류기 전단(Δ-Δ변압기 2차측)라인으로 이에 대해 분석한 결과는 표 8과 같고 계산 기준값(90%)을 만족한다.

4. 결 론

본 논문에서는 전기철도 시스템에서 전력변환장치 연계에 따른 계통전원에 고조파 및 역률이 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 철도차량사업소 내 구축된 중수선 공장, 종합관리동, 승무원숙사 파라미터를 산정한 후 시스템을 모델링하고 이에 따른 고조파 및 역률을 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 중수선 공장인 경우 전력용 반도체 소자를 포함하는 전력변환장치가 사용된다. 여기서, 전압 및 전류에 대한 왜형률을 미칠 수 있는 장치는 삼상전원을 직류전원으로 변환시켜주는 정류기(Rectifier)이다. 시뮬레이션 결과 전압인 경우 기본파 성분인 60Hz만이 존재한다. 반면 전류인 경우 정류기 사용으로 인해 고조파 성분이 존재하고 왜형률을 초래한다.

- IEEE 519 기준을 만족하려면 정류기 전단에 0.2[Ω], 0.3[mH]인 리액터를 설치해야 한다. 리액터의 인덕턴스가 작은 경우 전고조파 왜형률(THD)이 IEEE 519 기준을 초과하게 되고 너무 크게 되면 정류기 계통뿐만 아니라 전체 계통전원의 역률이 낮아진다.

- 역률은 22.9kV에서 91.8%로 최소값을 보였으며, 전동전열 및 검수동력을 사용하는 부하인 경우 99% 이상의 역률값을 갖는다. 또한 직류부하를 사용하는 정류기 전단의 역률은 비선형 부하특성으로 93% 정도이지만 90% 이상을 만족한다.

2) 종합관리동인 경우 전동전열, 직류부하 등의 부하에 공급한다. 사용되는 부하는 저항(R)만이 부하이거나 RL부하이더라도 중수선 공장에 비해 경우이다. 시뮬레이션 결과 전압인 경우 기본파 성분인 60Hz만이 존재한다. 반면 전류인 경우 전력용 반도체소자를 사용하는 정류기 사용으로 인해 고조파 성분이 존재하고 이로 인해 왜형률을 초래한다.

- IEEE 519 기준을 만족하려면 정류기 전단에 0.2[Ω], 0.3[mH]인 리액터를 설치해야 한다. 리액터를 사용하지 않는다고 가정하여 시뮬레이션을 수행한 결과 IEEE 519 기준을 만족시키지 못하였다.

- 역률은 정류기 전단에서 97.1%로 최소값을 보였는데 이는 리액터 설치에 따른 고조파 상쇄와 직결되며, 기준인 90% 이상이다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 한국철도공사, “고속철도 운영효율화 기술개발 기획”, 미래철도기술 개발사업 제1차년도 중간보고서, 국토해양부, 2008
- [2] 김양수, “전기철도공학”, 동일출판사, 2000