

고속전철 변전소의 고조파 분석과 대책에 관한 연구

(A Study on Harmonic Analysis and Countermeasure at the High Speed Railway Substation)

김재철* · 박수만 · 강창원

(Jae-Chul Kim · Soo-Man Park · Chang-Won Kang)

요 약

본 논문은 고속전철 차량에서부터 변전소까지의 고조파에 대해서 분석하였으며, 수동필터를 이용한 고조파 저감 방법을 제시한다. 고속전철 변전소가 공급하는 열차구간에 있어서 운행 열차의 수에 따라 고조파의 파급 특성을 살펴 보았다. 고조파는 변압기 과열과 통신유도장해 등 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 고조파에 의한 손상을 줄이기 위하여 본 논문은 고조파 저감방법을 제시하였다. 제안된 방법은 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션에 의해 증명되었다.

Abstract

This paper analyzed harmonics from high speed railway traction to high speed railway substation and provide a reduction method of harmonics using the passive filter. A substation supplies the electric power to a train or can supply the electric power to several trains. According to the number of trains covered by a substation, characteristics of harmonics are investigated. These harmonics affect transformer heating and inductive interference. In order to get rid of the damage from the harmonics, this paper presented minimizing method of harmonics. The proposed method is verified in simulation using the PSCAD/EMTDC.

Key Words : Harmonic, Passive filter, Electrical traction

1. 서 론

최근 우리나라는 도로 교통의 한계 등 교통의 공간적 제약과 산업의 고도화에 따른 배기가스 및 소음 등 환경 공해 문제가 심각해지고 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 대체교통 수단으로써 전기철도가 부각되고 있으며, 특히 경부고속전철의 건설이

그 대표적인 예라 할 수 있다. 고속철도는 수송력이 월등히 높고 안정성과 신속성은 물론 환경적인 요소와 에너지 이용 측면에서도 매우 유리하여 교통문제를 해결할 최선의 대안으로 새롭게 제시되고 있다 [1].

전기철도에 대한 국내 현황을 살펴보면 지금까지는 주로 산업전철화와 도심지 지하철 건설에 치중하여 왔으나, 현재는 2004년 4월에 경부고속전철이 개통 되었다. 미래의 교통수단으로 주목을 받고 있는 경부고속전철이 개통된 지금 현재 해당기관과 협력업체들이 고속전철 급전계통에서 발생하는 문제점을 발견하고, 그에 대한 해결책 및 고속전철 운행상

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 교수
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
접수일자 : 2004년 4월 21일
1차심사 : 2004년 4월 26일
심사완료 : 2004년 5월 25일

의 점검을 위해 많은 노력을 하고 있는 실정이다. 국내에 전기철도에 관한 많은 논문들이 발표되었으나, 대부분이 기존의 단상교류급전 전기철도와 직류급전 전기철도에 대해서만 언급되어있다[2,3].

본 논문에서는 고속전철 변전소에서 문제시 되고 있는 고조파를 분석하고, 이에 상응하는 고조파 저감 대책을 세워 고조파에 대한 개선 효과를 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 통하여 입증하였다. 이러한 고조파는 2004년 4월 운행이 시작된 고속전철 열차의 인버터/컨버터 부분에서 발생하는데 그 발생원인은 SCR을 이용하여 위상제어를 하기 때문이다. 고조파 해석 시뮬레이션을 하기 위하여 기존의 전철계통 모델을 이용하여 PSCAD/EMTDC로 계통을 구성 하였다. 선로모델에서는 급전선-전차선, 전차선-레일, 급전선-레일간의 정전용량 값을 추가하였다. 이 정전용량의 값은 EMTP를 이용하여 산출하였다.

고속 전철용 변전소가 공급하는 구간에 열차를 배치시키고 열차의 구성량에 따라 열차에서 발생한 고조파가 고속 전철용 변전소로 전파 되어 가는 특성을 보기 위해 시뮬레이션 하였다.

이와 같이 철도차량에서 발생한 고조파를 최소화 하기 위한 방법으로 수동필터를 이용하였으며, 수동필터를 이용한 제안된 방법을 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

2. 고조파의 발생

2.1 고조파 전류 발생 메카니즘

본 논문에서는 언급할 고조파 전류의 발생 메카니즘은 그림 1과 같다. 실제 전기철도 시스템은 인버터/컨버터를 사용하고 있으며, 이러한 컨버터/인버터 부분을 사용하는 이유는 팬터그래프에서 단상교류를 수전 받아 3상 유도전동기를 구동하기 위함이다. 실제 이러한 컨버터/인버터 부분에 있어서 SCR을 통한 위상제어를 할 때 그 문제는 심각성을 더한다고 할 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 고속전철 시스템은 스코트 변압기(Scott Transformer)에서 단상 교류를 수전 받아 직류로 변환 후에 다시 3상 교류를 만들어 3상 유도전동기에 전력을 공급한다.

이러한 과정에서 DC/AC 인버터 부분에서 많은 양의 고조파가 발생한다. M좌(Main)의 유도전동기 구동방식은 T좌(Teaser)와 동일하기 때문에 생략하였다. 또한 주변압기를 스코트 변압기로 사용하는 이유는 3상을 2개의 단상으로 바꾸는 과정에서 주변압기 2차측에서 발생하는 불평형을 최소화하기 위함이다.

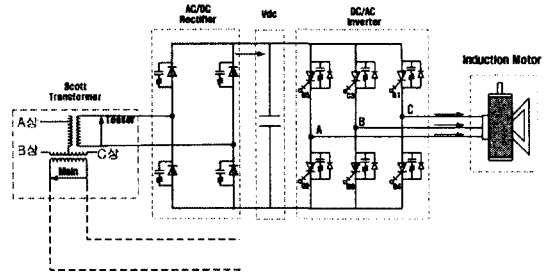


그림 1. 고속전철 차량의 컨버터/인버터의 구성도
Fig. 1. The configuration of inverter/converter for high speed railway traction

그리고 그림 1의 컨버터/인버터 부분에서 발생한 고조파 전류의 파형을 PSCAD/EMTDC 측정파형으로 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 고조파 전류파형은 열차의 소비전력이 6[MVA] 일때의 실측 데이터를 바탕으로 한 것이다. 열차의 모델은 정전력 부하 모델을 사용하였다. 그림 2를 보면 알 수 있듯이 정상적인 정현파 파형보다 많이 일그러져 있음을 볼 수 있다. 고속전철 급전계통은 3상 교류를 두개의 단상으로 변환하여 사용한다. 그림 2에 나타낸 전류 파형은 스코트 변압기 2차측의 단상 전류파형이다.

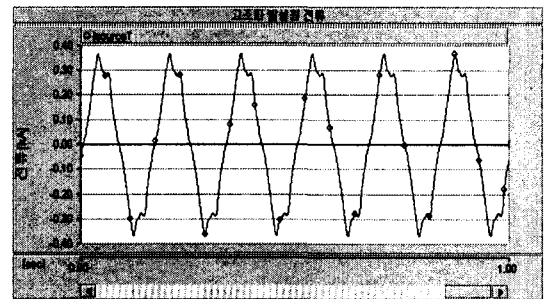


그림 2. 고조파 발생원의 전류파형
Fig. 2. The current wave form of harmonic source

2.2 고조파 전류의 변전소로의 유입

고속전철 급전용 변전소에는 MVA급 대용량 정류기 부하가 계통에 접속되어 있기 때문에 이것이 고조파 발생원이 되어 많은 고조파 전류가 흐를 가능성이 있다는 것을 이미 앞 절에서 살펴보았다. 이러한 고조파가 변전소에 여러 가지 영향을 미칠 수 있는데 그 중에서도 변압기 부하손실과 통신유도 장애가 있다. 본 논문에서는 변압기 손실에 대해서만 언급하도록 하겠다. 고조파가 포함된 변압기의 부하손실은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[4,5,6]. 그림 2의 고조파 발생원의 TDD(Total Demand Distortion)는 25.73%이다. 여기서 TDD란 최대 부하전류에 대한 전류의 왜형율을 나타낸 것이다[8].

$$W = I_1^2 R \left[(1 + \beta) + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 (1 + \beta n^m) \right] \quad (1)$$

여기서, n : 고조파 차수

β : 표류손실계수

I_1 : 기본파 전류

$$\alpha_n = \frac{I_n}{I_1} : \text{고조파 왜형율}$$

즉, 변압기의 용량에 여유가 없는 경우는 고조파 전류의 유입 시 부하 전류를 부하 손실만큼 줄여서 사용해야 한다. 따라서 변압기 용량을 검토할 경우에는 고조파 전류의 유무 및 크기 등에 대한 사전검토가 충분히 이루어져야 한다.

3. 변전소에서의 고조파 분석

3.1 고속전철 급전계통 모델

고속전철 급전계통의 등가 구성도는 그림 3과 같다. 고속전철용 변전소에서는 154[kV] 3상 전압을 수전 받아 스코트변압기를 통해서 55[kV] 두개의 단상으로 변환한다. 이때 두개의 단상을 T좌와 M좌라 칭하며, T좌와 M좌는 90° 위상차를 가지게 된다. 스코트변압기 T좌의 1차 측은 전체 권선의 0.866되는 점에 A상을 연결하고 있는데 이것은 T좌 M좌에 평형부하가 존재할 경우 3상평형을 맞추주기 위함이다.

다. 스코트변압기 2차 측은 정격전압은 50[kV]인데 급전구간의 전압강하를 고려하여 55[kV]로 설정되어져 있다. 스코트변압기 2차 측은 평균 10[km] 구간마다 AT(Auto Transformer)를 통해서 접지를 하게 된다. 본 논문에서는 하나의 변전소가 급전하는 구간에 최대 4대의 열차가 운행한다고 가정하고 시뮬레이션 하였다. 등가 전원 및 각 기기들에 대한 파라미터는 기존의 일반적인 전철계통의 파라미터 값을 고속철도용으로 변환하여 사용하였다[1].

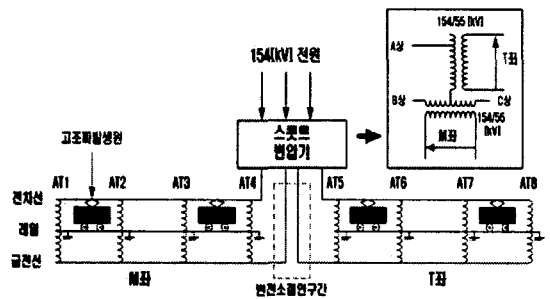


그림 3. 고속전철 급전계통의 구성도
Fig. 3. The configuration of high speed railway feeding system

3.2 변전소에서의 고조파 분석 결과

그림 3의 열차의 구성량에 따른 스코트변압기 1차 측 전류의 TDD가 어떻게 변화하는지를 살펴보았다 [7]. 열차 구성량으로는 T좌 측에 열차가 1대 운행할 때, M좌에 열차가 1대 운행할 때, T좌 및 M좌에 각각 1대씩 운행할 때, T좌 및 M좌에 각각 2대씩 운행할 때를 시뮬레이션 하였다. 고조파 발생원으로 사용한 전류원의 데이터는 표 1과 같으며 본 데이터는 철도청에서 측정한 데이터를 기반으로 하였다.

표 1. 고조파 발생원 파라미터
Table 1. The parameters of harmonic source

구분	기본파	3조파	5조파	7조파	9조파	11조파	13조파
RMS전류 [A]	230	13	21	9.46	1.53	4.67	2.64
T좌위상 [deg]	347	177	74	185	332	275	44
M좌위상 [deg]	257	87	344	95	242	185	314

그리고 열차의 구성량이 평형 부하로 되어 있을 경우 전원측의 전류를 평형으로 만들어주기 위하여 T좌와 M좌의 위상차를 90[°]로 설정하였다. 단, 모든 열차의 운행조건은 표 1의 고조파 발생원 파라미터에 해당하는 운전조건이라고 가정하였다.

표 1의 고조파 발생원을 열차구성량에 따라 적용한 결과를 표 2에 나타내었다. 여기서 사례연구1은 T좌에 열차가 1대운행할 경우, 사례연구2는 M좌에 열차가 1대운행할 경우, 사례연구3은 T좌 및 M좌에 열차가 1대씩 운행할 경우 그리고 사례연구4는 T좌 및 M좌에 열차가 2대씩 운행할 경우를 각각 나타낸다. 표 2는 각 열차구성량에 대한 전원전류의 RMS 전류와 TDD를 나타내었다.

시뮬레이션을 통해 나타낸 표 2의 TDD는 IEEE Std. 519를 만족하지 않는다[8]. 본 논문에서 이용한 시뮬레이션 계통도의 I_{SC}/I_L 는 사례연구에 따라 41.4와 20.6으로 나타났다. 여기서 I_{SC}/I_L 는 계통의 부하전류에 대한 단락전류비를 의미한다. 따라서 본 계통 전원전류의 TDD는 표 3에 의해 8[%]이하

표 2. 필터적용전의 시뮬레이션 결과
Table 2. The results of simulation before filter application

구 분	전원전류					
	RMS 전류[A]			TDD (%)		
	a상	b상	c상	a상	b상	c상
사례연구1	48.8	24.6	24.3	11.7	11.8	11.6
사례연구2	0.2	39.9	40.1	30.3	11.8	11.6
사례연구3	48.8	48.2	45.5	11.7	11.0	12.6
사례연구4	97.5	96.2	90.7	11.7	11.0	12.7

표 3. IEEE Std. 519
Table 3. IEEE Std. 519

I_{SC}/I_{LOAD}	Harmonic order					TDD
	<11	11-16	17-22	23-24	>35	
<20	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
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

로 제한되어야 한다. 그러나 표 2에서는 모든 전류의 TDD가 8[%]를 초과한 것으로 나타났다. 따라서 적절한 대책을 세워 TDD를 낮춰야 하며, 본 논문에서는 TDD를 8[%] 이내로 낮추기 위해 수동필터를 이용하였다. 표 3은 IEEE Std. 519를 나타내고 있다[7].

4. 수동필터

4.1 수동필터 용량산정 알고리즘

본 논문에서는 고조파 저감을 위하여 수동필터를 이용하였다. 수동필터를 사용하기 위해서는 무엇보다도 중요한 것은 필터의 용량을 산정하는 부분이다. 이러한 필터의 용량 산정은 그림 4와 같은 알고리즘을 통하여 산정하였다.

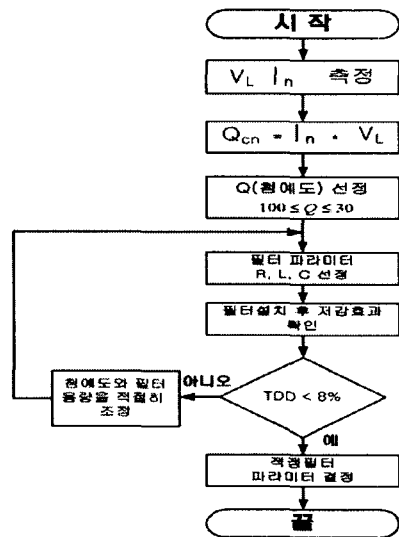


그림 4. 필터용량 산정을 위한 알고리즘
Fig. 4. The algorithm for filter capacity calculation

본 알고리즘은 필터 설치위치의 부하 전류와 전압 값의 곱으로 필터의 용량을 설정하고 적절한 첨예도를 결정한다. 이렇게 산정한 필터 파라미터를 적용하여 TDD가 8[%]이내로 만족되지 않을 경우 필터의 용량을 적절히 변화 시켜 가며 규정치 이내로 낮출 수 있도록 필터의 용량을 산정한다. 일반적으로 첨예도는 100~30에 해당하는 값을 많이 사용한다 [7]. 필터용량 산정 알고리즘을 통해 산정한 적정 필

고속전철 변전소의 고조파 분석과 대책에 관한 연구

터의 용량과 파라미터는 표 4와 같다.

표 4. 수동필터 파라미터
Table 4. The passive filter parameter

	필터용량 [MVAR]	R[Ω]	L[H]	C[μF]
3조파 필터	0.755	13.36	1.18	0.66
5조파 필터	1.216	4.97	0.26	1.07
7조파 필터	0.547	7.90	0.30	0.48
9조파 필터	0.088	38.20	1.13	0.08
11조파 필터	0.271	10.15	0.24	0.24
13조파 필터	0.153	15.21	0.31	0.13

표 4의 수동필터 파라미터를 이용하여 PSCAD/EMTDC 상에서 설계한 수동필터는 그림 5와 같다. 수동필터의 설치 위치는 그림 5와 같이 스코트 변압기 2차측의 전차선과 급전선 사이에 설치하였다.

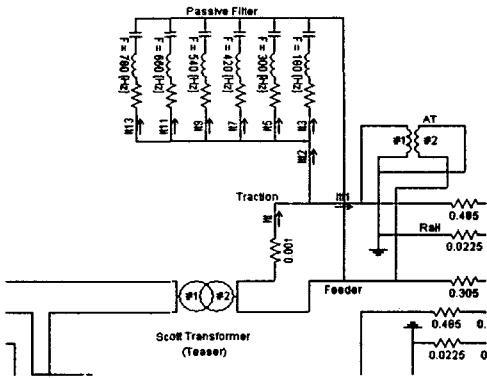


그림 5. 설계된 수동필터
Fig. 5. The designed passive filter

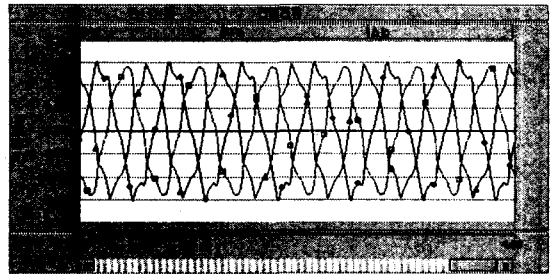
4.2 수동필터를 이용한 고조파 저감효과

수동필터를 이용한 TDD의 저감효과와 개선된 파형을 표 5와 그림 6에 나타내었다. 표 4에서 구한 수동필터 파라미터를 적용 시뮬레이션한 결과를 표 5에서 나타내었다. 표 5를 살펴보면 필터 적용후의 모든 사례연구에 있어서 모든 전원 전류의 TDD가 8[%] 이내로 제한됨을 볼 수 있다. 따라서 표 4의 수동파라미터 값은 적절하다고 말할 수 있다.

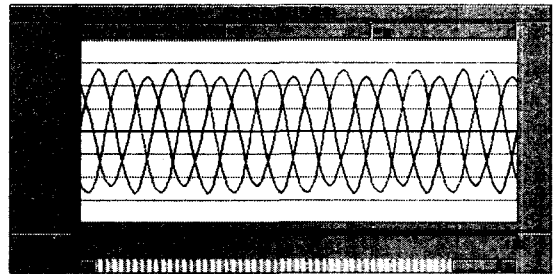
표 5. 필터적용후의 시뮬레이션 결과
Table 5. The results of simulation after filter application

구 분	필터적용 후					
	RMS 전류[A]			TDD [%]		
	a상	b상	c상	a상	b상	c상
사례연구1	46.8	7.0	43.5	2.2	7.8	1.1
사례연구2	24.2	51.6	27.6	0.1	2.8	5.3
사례연구3	46.8	46.8	45.1	2.2	3.0	3.8
사례연구4	92.8	92.4	91.4	2.3	2.9	3.9

그리고 그림 6를 살펴보면 필터 적용 전후의 사례연구4에 해당하는 전원전류를 나타내고 있다. 그림 6의 (a)는 필터적용전의 전원전류의 파형을 나타내고 (b)는 필터적용후의 전원전류 파형을 나타내고 있다. 두 그림을 비교해 보았을 때 필터적용후의 파형이 필터 적용전보다 훨씬 더 개선되었음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.



(a) 필터적용 전



(b) 필터적용 후

그림 6. 전원전류 파형
Fig. 6. The source current wave form

5. 결 론

본 논문에서는 고속전철 변전소에서 문제시 되고 있는 고조파를 분석하고, 이에 상응하는 고조파 저감 대책 즉, 수동필터(단일동조필터)를 이용한 고조파에 대한 저감대책을 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

고속전철용 변전소가 급전하는 구간에 여러대의 열차를 배치시키고 고조파의 전파 특성을 살펴보았다. 철도차량에서 발생한 고조파를 전원 측에서 살펴본 결과 상쇄되지 않고 그대로 남아 있는 것을 시뮬레이션을 통해 살펴 볼 수 있었다. 이러한 고조파가 전원 측으로 유입되면 여러 가지 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 논문에서는 고조파의 영향을 최소화하기 위해 고조파에 대한 저감대책을 기술하고, 기존에 선행되지 않았던 고속전철의 시스템을 이용하였으며, PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 통하여 고조파의 저감효과를 입증하였다.

본 논문에서 수동필터를 이용한 고조파 저감효과를 살펴봄으로써 고속철도 급전계통 뿐만 아니라 일반 계통에서도 수동필터를 이용한 고조파 전류 저감효과가 필요할 경우 참고 자료로써 그 이용도가 기대된다. 또한 본 논문에서 언급한 고조파를 저감하기 위한 수동필터의 적용은 발생하는 고조파의 전형적인 경우에 대해서만 다루어진 것이며, 실시간으로 변화하는 고조파에 대해서는 능동필터나 가변형 수동필터를 사용해야 될 것으로 사료된다.

본 연구는 송실대학교 지원에 의해 수행된 연구임.

- (4) 전기원, "배전계통의 고조파 저감에 관한 연구", 홍익대학교 대학원, 박사학위논문, 2002. 12.
- (5) 김정환, "수동·능동 필터를 이용한 고조파 저감대책에 관한연구", 홍익대학교대학원, 석사학위논문, 2001. 12.
- (6) 박한중, 고조파 억제용 수동필터의 현장 적용화연구, 전기안전시험연구원.
- (7) George J. Wakileh, Power Systems Harmonics, Saladruck Berlin, 2001.
- (8) IEEE Std 519, "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power system" pp.79, 1992.

◇ 저자소개 ◇

김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 송실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 송실대학교 전기공학과 교수.

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

박수만 (朴修萬)

1977년 10월 1일생. 2002년 송실대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).

E-mail : powersys77@hotmail.com

강창원 (姜昌蓮)

1956년 4월 15일생. 2000년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2002년 홍익대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 송실대학교 대학원 전기공학과 박사과정, (주)피에스디테크 대표이사.

E-mail : kkcwon@psdtech.com

References

- (1) 최준호, 김태수, 김재철, 문승일, 남해근, 정일엽, 박성우, "전기철도계통에 순간전압강하 보상장치 적용에 관한 연구", 한국조명·전기설비학회논문지, Vol. 17, NO. 6, pp. 95~104 November 2003.
- (2) 송진호, 황유모 "지하철 전력계통의 고조파 영향 분석 및 그 대책에 관한연구", Trans. KIEE, Vol. 51B, No. 4, pp. 210~220, 2002. 4.
- (3) 정현수, "전기철도 급전시스템의 해석 및 전압 강하 보상에 관한연구", 한양대학교 대학원, 박사학위논문, 2002. 12.