

고속전철 차량에서 발생한 고조파 파급영향과 그 대책에 관한 연구

박수만, 김재철, 강창원
 *송실대학교

A study on propagation effect and countermeasure of the harmonics generated in high speed traction

S-M. Park*, J-C. Kim*, C-W. Kang*
 *Soongsil- Univ

Abstract - This paper demonstrates an analysis of harmonics at the high speed railway substation and proved on this countermeasure using the PSCAD/EMTDC simulation tool.

First, high speed railway feeding system is composed using PSCAD/EMTDC electrical railway feeding system model in advance.

Second, This paper applications line capacitance values as feeder-trolley, trolley-rail and feeder-rail to analysis harmonics more accuracy in advance did not application. This capacitance values calculate using the EMTP(Electro Magnetic Transient Program).

Third, the tractions are arranged in the section that substation supplies power, and this paper take the simulation each case (tractions composition amount) to see harmonic propagation from traction to substation.

As a result, generated harmonics at traction can confirmed that harmonics did not reduce at utility source. This harmonics have an influence on bulk power system.

Finally, this paper introduces the methods of harmonics effect minimum. This paper proved harmonics reduce effect through the passive filters application.

1. 서 론

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 운행 예정인 TGV 열차의 인버터/컨버터 부분에서 발생하는데 그 발생원인은 SCR을 이용하여 위상제어를 하기 때문이다. 고조파 해석을 위한 시뮬레이션을 하기 위하여 기존의 전철계통 모델을 이용하여 PSCAD/EMTDC로 계통을 구성 하였다[1]. 그리고 보다 정확한 고조파 해석을 하기 위하여 선로정수 모델에서 기존에는 적용하지 않았던 급전선-전차선, 전차선-레일, 급전선-레일간의 정전용량 값을 적용하였다. 이 정전용량의 값은 EMTP(Electrical Magnetic Transient Program)를 이용하여 산출하였다.

열차구성이 T좌, M좌에 동시에 열차가 2대씩 운행할 때 부하 평형이 이루어지므로 전원 측에서는 3상평형 전류가 흐르나, 차량에서 발생한 고조파 성분은 여전히 남아 있어 문제가 된다. 고차성분에서 다소 약간의 불평형이 있을 수 있는데 이것은 스코트변압기의 특성 때문인 것으로 사료된다.

이와 같이 철도차량에서 발생한 고조파는 전원 측에서도 상쇄되지 않고 그대로 남아 있는 것을 시뮬레이션을 통해 살펴 볼 수 있었다. 이러한 고조파가 전원 측으로 유입되면 연계된 계통에 악영향을 미칠 수 있다.

2. 등가모델

2.1 고조파 발생원

고조파 해석을 위해서 신청주 변전소 급전 구간의 철도차량에서 실제 측정된 고조파 전류를 바탕으로 하여 전류원을 이용하여 PSCAD/EMTDC 상에서 모델링 하였다. 전기철도 차량 부하가 10[MW]로 운행할 경우 차량부하를 고조파 발생원으로 모델링 하였다. 고조파 발생원을 전류원으로 모델링한 파라미터 값은 [표1]과 같다.

표 1. 고조파 등가 전류원의 파라미터

구분	기본파	3조파	5조파	7조파	9조파	11조파	13조파
전류 [A]	230	13	21	9.46	1.53	4.67	2.64
위상 [deg]	347	177	74	185	332	275	44

그리고 고조파 발생원의 전류파형은 [그림1]과 같다.

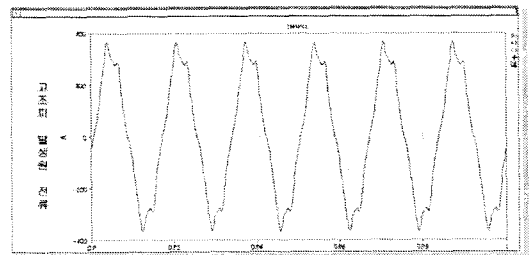


그림 1. 고조파 발생원의 전류파형

2.2 전원모델

고속전철 급전계통의 전철변전소는 154[kV] 변전소에서 수전하여 스코트 변압기에 의해 154[kV] 3상을 50[kV] 단상으로 변환한다. 이때 전압강하를 고려하여 스코트 변압기의 2차측 전압은 55[kV]로 하였다. 전원 모델링은 3상 전압원으로 모델링 하였고 변전소의 파라미터는 고속전철 변전소의 실제 파라미터를 적용하였다.

표 2. 전원파라미터

기준용량	100 MVA
정격전압 (선간전압)	154 kV
기본 주파수	60 Hz
정상임피던스[%]	1.575+j7.88
영상임피던스[%]	4.079+j19.19

2.3 스코트 변압기

3상 교류 전력을 2상으로 변환시키는 변압기의 결선

방법으로 스코트 결선, 메이어 결선 및 우드브리지 결선 방식이 사용되나 전기철도에서는 일반적으로 이용률이 가장 좋은 스코트 결선 방식을 채택하고 있으며 국내의에서 많이 사용되는 결선방식이다. [그림2]는 전형적인 스코트 결선을 나타내고 있다.

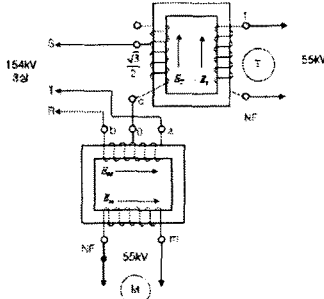


그림 2. 스코트 변압기 결선도

또한 스코트 변압기의 파라미터는 [표3]과 같다.

표 3. 스코트 변압기 파라미터

T좌	자기용량	45 [MVA]
	전압비	154/55 [kV]
	임피던스	10%
M좌	자기용량	45 [MVA]
	전압비	154/55 [kV]
	임피던스	10%

2.4 AT(AutoTransformer) 모델

[그림3]은 전차선과 급전선 사이에 단권변압기의 등가 회로를 나타내고 있다. AT는 2권선 변압기와는 달리 1차 권선과 2차 권선으로 되어 있지 않고, 공통 철심을 이용하여 코일 2개를 감고 이를 직렬로 접속해서 1차와 2차의 단자를 인출함으로써 2권선 변압기와 동일한 변성비를 얻을 수 있다. 실제, PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 과정에서도 AT모델이 없을 경우는 2권선 변압기를 이용하여 AT모델을 만들기도 한다.

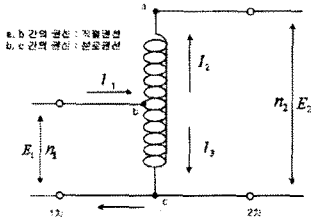


그림 3. AT 등가회로

또한 AT의 파라미터는 [표4]와 같다.

표 4. AT 파라미터

자기용량	10 [MVA]
전압비	55/27.5 [kV]
임피던스	0.45%

2.5 선로모델

본 논문에서는 선로모델을 고속철도용 선로임피던스를 고조파 해석을 하기 위해 R,L 값으로 환산하여 적용하였으며, 보다 정확한 고조파 해석을 하기 위해 급전선-전차선, 전차선-레일, 급전선 레일간의 정전용량을 전자기 과도 해석 프로그램인 EMTF (Electro Magnetic Transient Program)를 이용하여 산출, 적용하였다.

표 5. 선로 파라미터

구분	임피던스 [Ω /km] 및 정전용량 [μ F/km]	환산 R, L
급전선 자기 임피던스	0.122+j0.587	R=0.122[Ω /km] L=0.00156[H/km]
전차선 자기 임피던스	0.194+j0.731	R=0.194[Ω /km] L=0.00194[H/km]
레일 자기 임피던스	0.009+j0.467	R=0.009[Ω /km] L=0.00124[H/km]
급전선-전차선 정전용량	0.00012 [μ F/km]	
급전선-레일 정전용량	0.00018 [μ F/km]	
전차선-레일 정전용량	0.0003292 [μ F/km]	

3. 고조파 해석

3.1 고조파 해석을 위한 열차 구성

고속전철 변전소 급전구간에 있어서 T좌에 2대, M좌에 2대가 존재할 경우이다. AT1~AT2, AT3~AT4, AT5~AT6, AT7~AT8의 각각 중간지점에 열차가 운행하고 있다. 그리고 T좌의 열차는 M좌에 비해 90° 위상이 앞선 고조파 발생원을 적용하였다. 열차의 구성도는 아래의 [그림4]와 같다. 그리고 고조파 발생원에서 발생한 고조파의 파급효과를 살펴보기 위하여 T좌 및 M좌의 전차선 전류와 전원전류를 측정하였다.

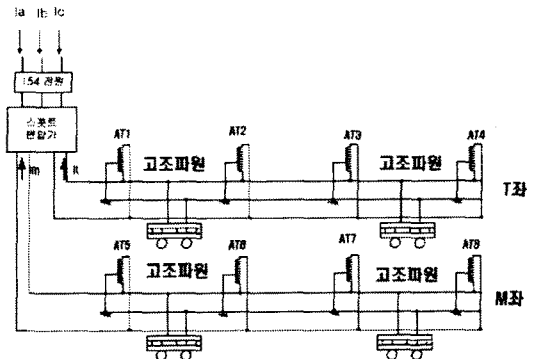


그림 4. 변전소 급전구간의 열차구성량

3.2 시뮬레이션 결과파형 (필터적용 전)

[그림5]와 [그림6]는 필터 적용전의 T좌 및 M좌의 전차선 전류의 시뮬레이션 결과 파형을 나타내고 있다. 이것은 T좌 및 M좌에 각각 열차가 2대 운행할 경우에 대해서 각 구간에 고조파 발생원을 투입하여 시뮬레이션한 결과이다.

열차가 동일하게 2대씩 운행중인 경우 시뮬레이션 결과를 살펴보면 스코트 변압기의 2차측 전류 즉, T좌와 M좌의 전차선전류와 전원측의 전류가 거의 평형을 이루고 있다. 여기서 I_t , I_m 전류는 각각 T좌와 M좌의 전차선 전류를 의미한다. 그리고 전차선 전류와 전원전류의 스펙트럼을 시뮬레이션을 통해 살펴본 결과 대략적으로 11.7~11.8[%]를 보였다.

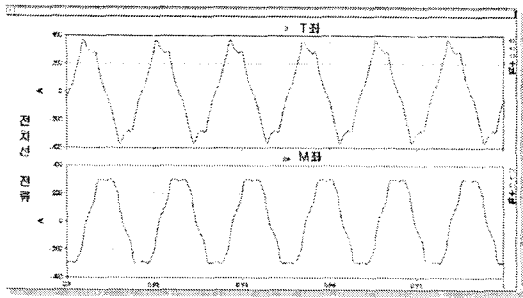


그림 5. T좌 및 M좌의 전차선 전류 (필터적용 전)

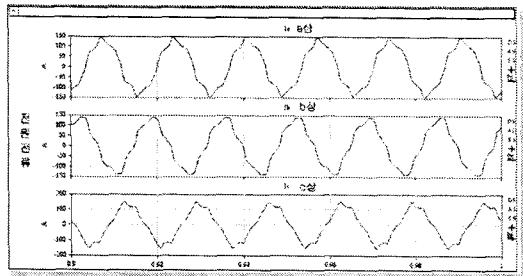


그림 6. 전원전류 (필터적용 전)

투었던 필터를 적용하지 않은 경우의 전차선 전류와 전원전류의 시뮬레이션 결과파형과 필터적용 후의 전차선 전류와 전원전류의 결과 파형을 비교해 보면 필터 적용 후의 결과파형이 개선되었음을 볼 수 있다.

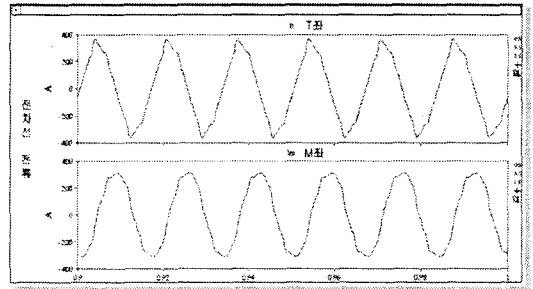


그림 7. T좌 및 M좌의 전차선 전류 (필터적용 후)

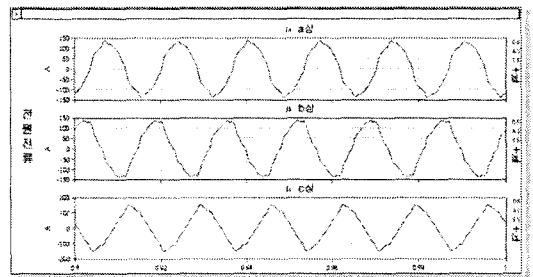


그림 8. 전원전류 (필터적용 후)

4. 고조파 저감 대책

4.1 동조필터

동조 필터는 필터의 용량성 성분과 유도성 성분이 같아지는 주파수로써 튜닝 주파수를 구할 수 있다. 튜닝 주파수를 구하는 방법은 식(1)과 같다.

$$\omega_0 = \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_f \cdot C_f}} \quad (1)$$

그리고 필터의 총 무효전력량은 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$Q_f = \frac{|V|^2}{\left(\frac{XC_f}{n^2} - XC_f\right)} = \frac{|V|^2}{XC_f} \cdot \frac{n^2}{(1-n^2)} \quad (2)$$

여기서 n은 고조파 차수, XC_f 는 기본파 캐패시턴스, XL_f 는 기본파 인덕턴스, Q_f 는 필터에 의해 공급되는 총 무효 전력량 그리고 V는 필터가 설치되었을 경우 기본파 전압의 크기이다.

본 논문에서는 가장 심각하게 일어나는 5고조파에 대한 동조필터를 적용하여 개선된 파형을 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다. 필터의 적용은 스코트 변압기 2차측에 적용하였다. 5고조파 필터 파라미터 예는 [표6]과 같다.

표 6. 5고조파 필터 파라미터 예

Q factor	1000
기본 주파수	60 [Hz]
공진 주파수	300 [Hz]
(용량) MVAR	0.08 [MVAR]
전압	55 [kV]

4.2 시뮬레이션 결과파형 (필터적용 후)

[그림7]과 [그림8]에서는 필터 적용후의 M좌 및 T좌의 전차선 전류와 전원전류를 나타내고 있다. 앞에서 다

5. 결 론

본 논문에서는 2004년 개통예정인 경부고속철도에서 발생하는 고조파 문제에 대해서 간단한 경우에 대해서 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 그리고 기존에는 적용하지 않았던 급전계통의 정전용량을 EMTP를 이용하여 산정하여 적용하였다.

그리고 고조파 중에서 가장 심각한 5고조파에 대하여 동조필터를 이용하여 고조파의 저감효과를 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

차후 연구방향은 능동필터를 이용하여 5고조파를 포함한 모든 고조파에 대한 저감효과를 분석할 계획이다.

본 논문은 숭실대학교의 지원을 받아 연구 수행한 것임.

[참 고 문 헌]

- [1] 김태수, "전기철도 급전계통의 순간전압강하 보상장치 적용에 관한 연구", 숭실대학교 대학원, 석사학위논문, 2003.6
- [2] 전용수, "AT교류 철도급전계통 내 다수 열차 운행 시 새로운 계통해석 알고리즘 적용", 숭실대학교 대학원, 석사학위논문, 2000.12
- [3] Elham B. Makram, "Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data", IEEE Conference Paper, No.92 B2, pp.1-7, 1992
- [4] Jin-Ho Song, Humor Hwang, "Estimate of Harmonics on Power System of AC Electric Railway", Trans. KIEE, Vol. 52B, No.2, pp.68-79, FEB, 2003,
- [5] 김정환, "수동·능동 필터를 이용한 고조파 저감대책에 관한 연구", 홍익대학교 대학원, 석사학위논문, 2001.12.
- [6] Yaow-Ming Chen, "Passive Filter Design Using Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.50, No.1, pp. 202-207, Feb 2003