

Estimation of Harmonics on Power System of AC Electric Railway

宋 晋 鎬* · 黃 有 模**
(Jin-Ho Song · Humor Hwang)

Abstract - We estimated harmonics on power system of AC railway based on quantitatively measured harmonics and investigated the need of facilities for harmonics reduction. In order to analysis harmonics which inflow into power system due to increase in collector voltages and harmonic currents generated from the train when the railway is in operation, the railway system is sectioned into power supply, railway line, AT, sectioning post and subsectioning post.

For analysis of extension of currents resulting from the railway loads, PWM converter, VVVF inverter and the feeder system are modeled based on the dynamic node technique(DNT). In order to test the usefulness of the DNT for analysis of harmonic effects, the measured harmonic currents and harmonic magnification ratios at the S/K substation are compared with simulation results using DNT modelling, which include the results for two cases with and without filters for suppression of harmonic currents.

When 8 cars(4M4T) are in operation, the total sum of harmonic currents resulting from the train at M and T phases, which inflow into the substation along with the railway line, is calculated. Using the harmonics analysis program for railway feeder system with these data, the total harmonic distortion factor(THD) at the outgoing point of KEPCO substation is computed.

The calculation shows that when the maximum THD at the receiving point of H/K substation was 0.0443% which is much lower than 1.5% which is the allowable value of KEPCO at 154kV as well as IEEE-519 above 132kV. This result indicates that any measure for harmonics reduction in Incheon International Airport Railway is not needed.

Key Words : AC railway, harmonics, power system, DNT, THD, harmonic magnification ratios

1. 서 론

전기철도는 전원공급 방식에 따라 직류급전 방식과 교류급전 방식으로 나눈다. 직류급전 방식은 공급전압이 낮아 전차선로의 절연계급을 낮출 수 있고, 통신 유도장해가 없다는 장점이 있으나, 부하전류가 크기 때문에 급전회로의 전압강하가 크게 발생한다. 직류급전설비에서는 정류기의 펄스 수를 증대하여 고조파 영향을 개선하고 있으며, 중성선에 흐르는 고조파는 교란에 영향을 크게 미치기 때문에 영상전류 제거장치를 설치하는 경우도 늘어나는 추세이다[1].

교류급전 방식은 주로 장거리 구간의 전기철도에 적용되고 있으며, 변전소의 전원 공급거리를 연장시킬 수 있다. 통신선에의 유도장해를 고려하여 여러 가지 장점 때문에 근래에는 단권변압기(Autotransformer: AT) 급전방식이 주로 채택되고 있다[2].

전기철도 급전시스템은 변압기, 전차선, 급전선, 레일 및 보호선 등 수송설비와 이들을 유기적으로 결합시키고 효율적

으로 운용, 관리하기 위한 운영설비로 구성되어 있다. 교류전철급전시스템은 일반 전력계통에 비해 부하의 특성이나 계통구성 형태 및 제반현상이 상이하다. 특히, 최근에 도입된 구동시스템에는 컨버터와 인버터가 포함되어 있으며 위상제어, 펄스폭변조(Pulse Width Modulation: PWM) 컨버터 및 가변전압-가변주파수(Variable Voltage Variable Frequency: VVVF) 인버터에 의해 제어되기 때문에 고조파를 발생시킨다[3]-[5].

차량에서 발생된 고조파전류는 급전계통의 임피던스 특성에 의해 특정 조파에서 공진되어 고조파전류 확대현상을 일으키게 된다. 즉, 고조파전류는 인접통신선에의 유도장해를 일으키고 교란의 원인이 될 뿐만 아니라 전원계통에 유입되는 경우에는 전력용 콘덴서의 과열이나 진동이 생기고 보호계전기 오동작 우려가 있다[6].

일반적으로 고조파 시뮬레이션을 하기 위하여 전기차에서 발생하는 조파별 발생전류, 전차선로의 조파별 선로 임피던스, 조파별 정전용량을 분포회로로 나타내고 전원측 임피던스를 각 조파별로 나타내어 각 조파별로 풀어야 한다.

본 논문에서는 전기차가 운행하면서 발생하는 고조파와 전차선로를 거쳐 전철변전소(Substation: S/S)로 유입되는 고조파를 예측하고 분석하기 위해 Matlab과 Simulink 소프트웨어를 이용한 DNT(Dynamic Node Technique) 방식[7]으로 기

* 正 會 員 : 明知大學 情報制御工學科 博士課程

** 正 會 員 : 明知大學 通信工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2002年 10月 10日

最終完了 : 2003年 1月 6日

기별 모델링을 하였다. DNT 기법을 이용하면 전기차의 운행 조건과 전기차의 위치 입력 자료로 간편하게 고조파 시뮬레이션이 가능하다.

기별 모델은 전기차와 변전소를 구성하는 고조파의 발생과 영향을 미치는 주요 기기별로 모델링을 하였다. 고조파 해석을 위해 산업선 국수(S/K) 변전소(Substation: S/S)에서 측정된 고조파, 고조파확대율 등의 실측자료를 DNT 기법으로 모의 시험한 결과와 비교하고, 필터를 설치하는 경우와 설치하지 않을 경우를 각각 분석하고, 이 때의 고조파 및 고조파확대율과 경우별 고조파 억제효과를 예측 계산하였다.

고조파 해석에 DNT 기법의 적용 타당성을 검증하고, DNT 기법으로 차량에서 발생하는 고조파 전류를 계산한 결과를 사용하여 인천국제공항 철도의 고조파 예측계산을 통하여 고조파 대책을 위한 설비의 필요성을 검토하였다.

2. 교류전계통의 고조파 분석

2.1 DNT 모델링 기법

DNT 기법은 전기회로 절점에서, 입출력되는 전류를 충전시키는 기생 커패시터(parasitic capacitor)를 절점에 삽입하여 식 (1)과 같이 모델링 한다.

$$V_n = \frac{1}{C} \int \Sigma I_n dt \quad (1)$$

그림 1은 식 (1)의 전기회로에 대한 DNT 모델을 나타낸다. Simulink에는 마스킹(masking) 기능이 있어 DNT 모델에서 구성한 절점들을 마스킹하면 입력 I_1, I_2, I_3, I_4 및 V_0 와 출력 V_n 으로 나타난다.

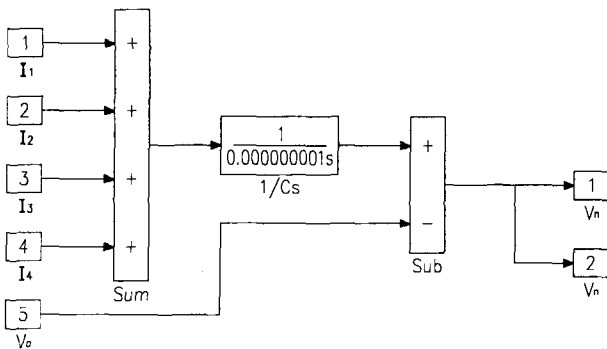


그림 1 전기회로 DNT 모델의 절점

Fig. 1 Nodes for DNT model of electric circuit

전기회로는 소자와 소자 사이에 절점이 존재하며 절점에 유출력되는 전류를 입력 받아 절점 전압을 출력시킨다. 전기소자는 소자 양단의 절점으로부터 전압을 받아 소자의 전기적 특성에 의해 전류를 출력시킨다. 전기소자의 모델은 전류를 전압의 시간함수로 나타내며 절점을 기준으로 전기소자

의 출력전류는 나가는 방향을 정(+) 값으로 정하고, 절점을 기준으로 입력전류는 전류가 들어오는 방향이고, 출력전류는 전류가 나가는 방향이므로, 입력전류는 출력전류와 크기는 같으나 부(-) 값이 된다.

2.2 전동차 기기별 모델링

DNT를 이용하여 전동차 변압기, 직류직권 전동기, 유도전동기, PWM 컨버터 및 VVVF 전동차의 모델링 결과 중 본 논문에서는 PWM 컨버터 및 VVVF 모델링을 서술한다.

VVVF 전동차에서는 변압기의 2차측으로 부터 교류전압을 받아 VVVF 인버터에 직류를 입력할 때 PWM 컨버터를 사용한다. PWM 컨버터는 교류입력을 직류출력으로 변환시키고 입력전류 제어기로 입력교류 전압과 전류의 위상차가 없도록 제어를 한다.

PWM 컨버터의 제어기는 그림 2와 같이 출력 직류전압을 감지하여 전압제어를 하고 입력 교류전류를 감지하여 PWM 제어를 한다. 그림 2에서 \dot{V}_S 와 \dot{V}_L 은 컨버터 입력전압과 L_s 에 인가되는 전압, 그리고 C_d 와 V_d 는 평활콘덴서와 직류전압을 각각 나타낸다.

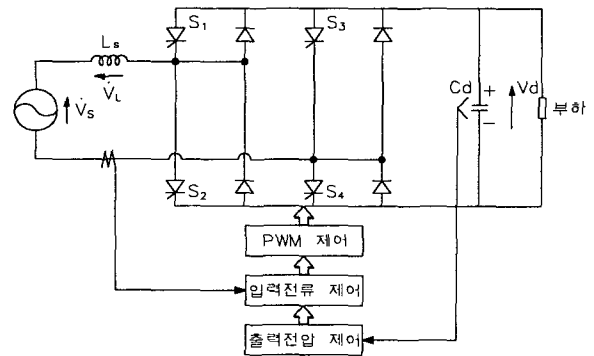


그림 2 PWM 컨버터 구성도

Fig. 2 Circuit diagram of PWM converter

PWM 컨버터는 평활콘덴서 C_d 에 인가되는 직류전압 V_d 가 거의 일정하게 입력전류를 제어한다. 입력전류가 전원전압 \dot{V}_S 와 동상의 정현파가 되도록 제어하면 입력역률은 항상 1이다. 컨버터 제어기는 컨버터 직류전압에 실제 측정된 직류전압을 뺀 값을 이용하여 전압제어를 하고, 이 때 측정된 컨버터 교류전류에서, 전압제어기 출력과 컨버터 입력전압과 동일한 위상을 갖는 크기가 1인 정현파를 곱한 값을 뺀 값으로 전류제어를 하여 출력을 발생한다.

그림 3은 PWM 컨버터의 입출력 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션용 DNT 모델로서 PWM 컨버터의 출력단에 병렬로 저항과 커패시터를 연결하고 있다. PWM 컨버터는 주 변압기로부터 출력된 교류전력을 직류로 변환시키는 역할을 하며 제어기 출력을 420[Hz]의 반송파 주파수를 갖는 삼각파와 비교하여 PWM 제어를 수행한다.

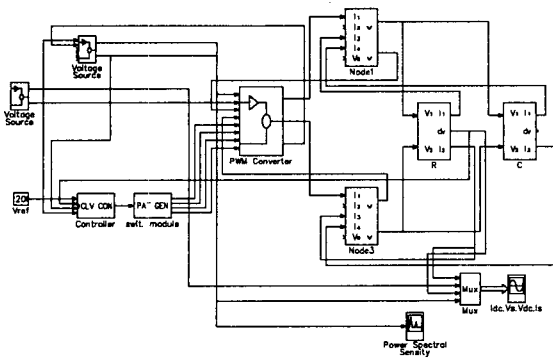


그림 3 PWM 컨버터의 DNT 시뮬레이션 모델
Fig. 3 DNT simulation model of PWM converter

그림 4는 PWM 컨버터의 입출력 특성을 보여주는 시뮬레이션 결과와 주파수별 고조파 추정치를 나타낸다. 그림 4 (a)를 보면 출력전압과 전류는 직류성분이며 PWM 컨버터의 제어기 특성 때문에 입력전압과 전류가 동상의 파형으로 제어되는 것을 알 수 있다. 교류입력전류의 고조파는 1,500

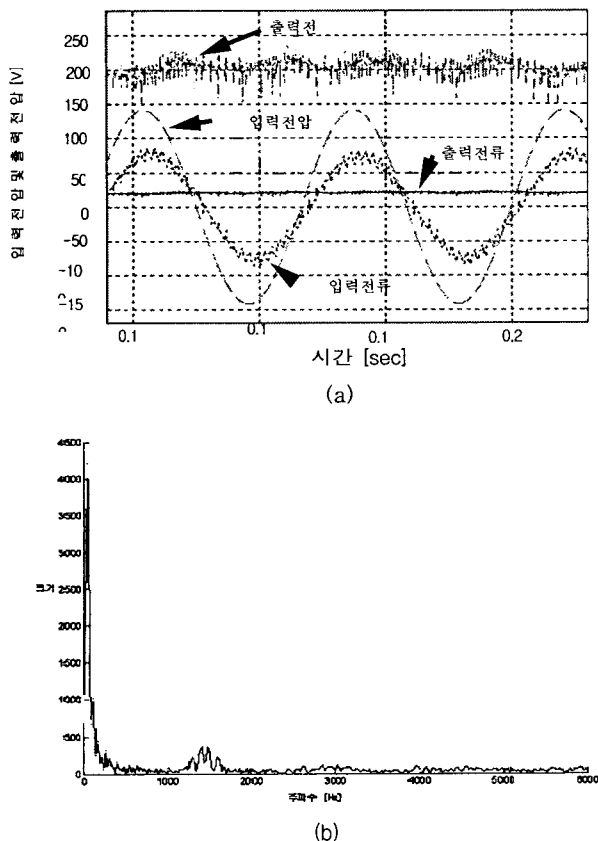


그림 4 PWM 컨버터 입출력 고조파 특성;
(a)시뮬레이션 결과, (b) 고조파 측정값
Fig. 4 Characteristics of input-output harmonics of PWM converter; (a) simulation results, (b) measurement values of harmonics

[Hz] 부근에서 발생하는 것이 그림 4 (b)에 나타난다. 그림 4 (b)에 표시된 고조파 전류의 크기는 기본파 전류의 크기(치수 4000으로 설정)에 대한 상대적 값을 나타낸다. 이론적으로는 반송파가 420[Hz]일 경우, 2상을 사용하는 PWM 컨버터 입력 전류에서 발생하는 고조파는 반송파 주파수항만 고려할 때 1,680[Hz]를 중심으로 발생하는 것으로 되어 있으나, 시뮬레이션 결과에서는 고조파가 발생하는 주파수는 1,500[Hz]로서 180[Hz]정도 차이가 난다. 그 이유는 DNT 모델에서는 절점의 전압을 계산할 때 기생 커패시턴스 성분을 추가하였기 때문이다.

PWM 컨버터와 전압형 인버터를 사용한 VVVF 전동차의 회로구성도는 그림 5와 같다. 컨버터는 420[Hz]의 반송파 주파수를 이용한 PWM 제어방법에 의해 역행제동시 역률 1 제어를 하고, 회생제동시 건인전동기에 의해 발전되는 전력이 컨버터를 통하여 회생되도록 역률 -1 제어를 한다. 컨버터는 반송파 주파수의 4배수 고조파를 발생하므로, 고조파를 경감하기 위해 반송파 주파수의 위상차를 90도를 주어 컨버터를 병렬로 접속하면, 고조파가 반송파 주파수의 8배수에서 발생하므로 고조파를 저감할 수 있다.

그림 5와 같이 주변압기로 부터 두 개의 2차권선을 두 컨버터에 입력시키고, 두 컨버터의 출력을 인버터 입력단에 연결하여 두 컨버터의 반송파 위상을 90도 위상차를 갖도록 하면 고조파는 반송파 주파수의 8배수의 주파수대역에서 발생한다. 인버터는 컨버터로부터 출력되는 직류전원을 전동차 구동전동기인 3상 유도전동기의 교류전원으로 변환시키는 장치이다.

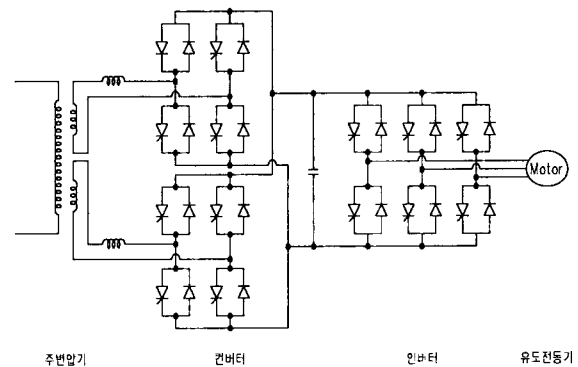


그림 5 VVVF 전동차의 회로구성도
Fig. 5 Circuit diagram of VVVF electric train

그림 6과 그림 7은 인버터의 DNT 모델을 이용한 VVVF 속도제어 역행시 및 회생시 발생하는 고조파 전류파형으로서 교류입력전압 사인파에 대한 직류전압과, 교류입력전류 사인파에 대한 컨버터 출력 전류의 파형을 나타낸다. 즉 입력전류 사인파 최대치보다 강하된 파형의 성분만큼 고조파 전류성분을 나타낸다. 또한 역행시는 입력전압과 입력전류가 동상이며, 회생시는 입력전압과 입력전류가 180도의 위상차를 갖는다.

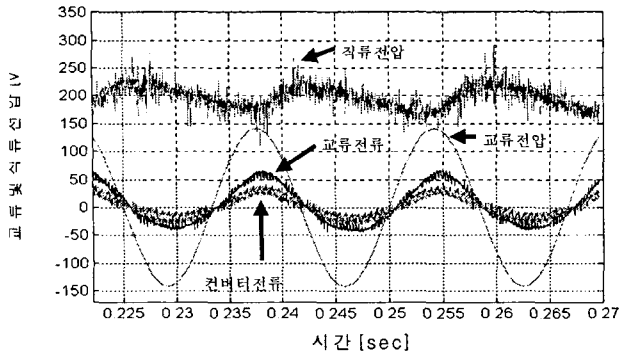


그림 6 VVVF 전동차 역행시 시뮬레이션 결과
 Fig. 6 Simulation results for Plugging of VVVF controller electric train

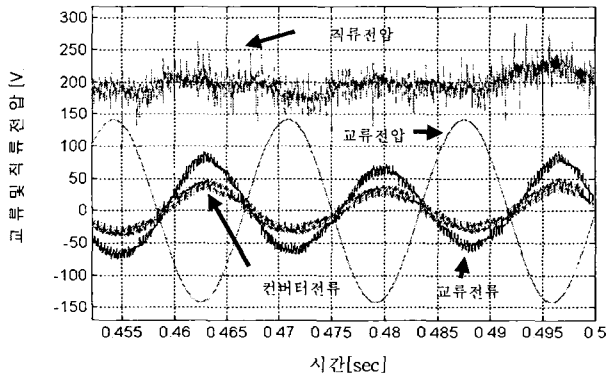


그림 7 VVVF 전동차 회생시 시뮬레이션 결과
 FIG. 7 Simulation results for regenerative braking of VVVF controller electric train

그림 8은 입력전류에 대한 고조파 특성을 보여주고 있다. 컨버터가 한 개일 경우에서 1,500[Hz] 근처에서 발생한 고조파가 소멸되고 3,000[Hz] 부근에서 고조파가 발생한다. 그림 8에서 표시된 고조파 전류의 크기는 기본파 전류의 크기(치수 8000으로 설정)에 대한 상대적 값을 나타낸다.

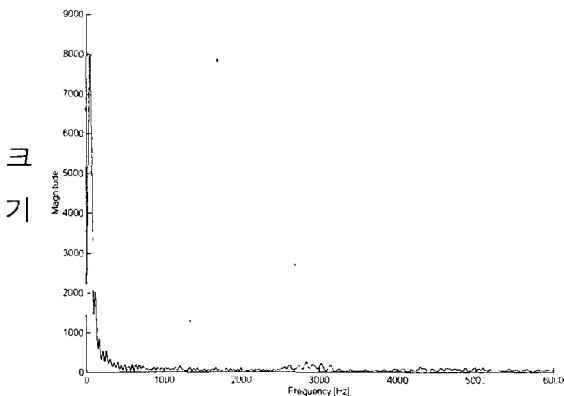


그림 8 VVVF 전동차에서 발생하는 고조파 전류
 Fig. 8 Harmonic currents of VVVF controller electric train

2.3 변전 및 급전계통 모델링

전기철도에서는 전동차에 공급하는 전력이 단상급전 방식이므로 3상을 수전하여 Scott 변압기를 사용하고 있다. Scott 변압기의 3상 입력전압들은 T상전압과 M상전압으로 분리되어 출력된다. Scott 변압기의 1차측 상전류와 상전압으로부터 2차측 T상과 M상의 전류와 전압을 출력시키기 위한 DNT 모델은 그림 9와 같다.

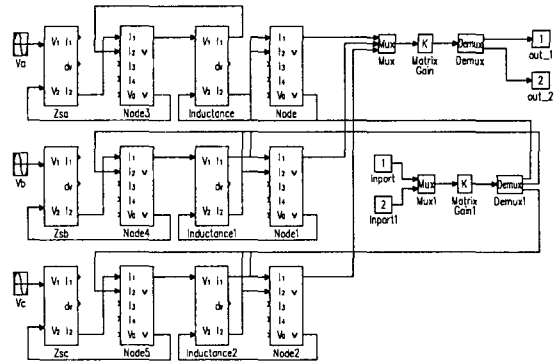


그림 9 Scott 변압기의 DNT 모델
 Fig. 9 DNT model of Scott transformer

전차선로 급전방식은 AT, 흡상변압기(Booster Transformer : BT) 방식이 있으나 BT 급전방식의 회로적 모델링을 수행하면 그림 10과 같다.

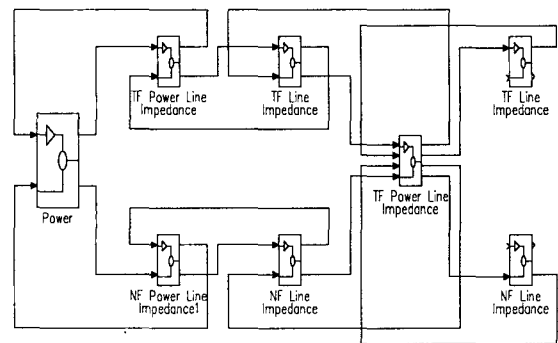


그림 10 BT 급전방식의 DNT 모델
 Fig. 10 DNT model of BT supply systems

2.4 고조파 확대율

고조파 확대율 Q는 공진시, 즉 $X_L = X_C$ 에서 16조파 전류 I_{16} 을 기본파 전류 I_1 로 나눈 값이다. 급전회로의 전차선로 회로정수는 일률적인 분포정수 회로가 아니고, 급전회로에 RC 필터, LC 필터, 전동차의 이동, 상선과 하선을 접속한 급전계통으로 구성되어 있기 때문에 계산이 쉽지 않다.

급전계통도를 나타내는 그림 11에서 고조파발생원이 전철 변전소로부터 l_1 의 위치에 있을 때, 전동차에서 전철변전소 방향의 급전회로 임피던스를 Z_1 , 급전선로 말단 방향의 급전회로 임피던스를 Z_2 라 하면, 변전소 송전단 전압 $E_S = I_S Z_{SS}$, 그리고 수전단 전압 $E_R = I_R Z_{sp}$ 이 된다. 여기서 Z_{SS} 는 변전소 급전용 변압기 임피던스와 전원측 임피던스의 합, 그리고 Z_{sp} 는 급전구분소측 임피던스를 나타낸다.

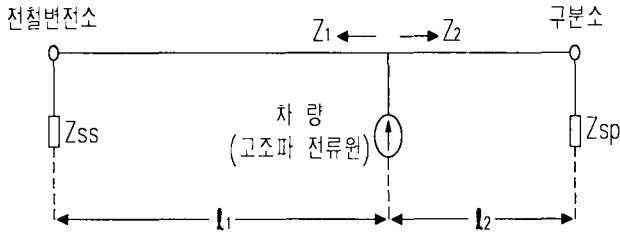


그림 11 급전계통도
Fig. 11 Configuration of supply system

만일 차량에서 단위 고조파 전류가 발생한다고 가정할 때, 전동차에서 전철변전소와 구분소로 흐르는 전류를 I_{ss} 와 I_{sp} 라 하면 차량에서 발생한 단위 고조파 전류가 전철변전소와 구분소로 유입되는 전류 I_{css} 와 I_{csp} 는 다음과 같이 된다[8].

$$I_{css} = I_{ss} \frac{1}{\frac{Z_{ss} \sinh \gamma \ell_1}{Z_0} + \cosh \gamma \ell_1}$$

$$I_{csp} = I_{sp} \frac{1}{\frac{Z_{sp} \sinh \gamma \ell_1}{Z_0} + \cosh \gamma \ell_1} \quad (2)$$

여기서, Z_0 는 급전선로측의 특성임피던스, γ 는 급전선로측의 전파정수를 나타낸다. 결과적으로 I_{css} 와 I_{csp} 는 전철변전소로 유입되는 고조파확대율을 의미한다.

2.5 고조파억제 필터

RC 필터는 고차 주파수 억제용으로 11조파 이상의 고조파 전류함유율을 흡수하는 특성이 있다. 본 논문에서는 급전구분소에 RC 필터를 설치하여, 전동차의 위치에 관계없이 공진 현상으로 발생하는 고조파확대율이 미치는 영향을 분석한다.

고조파 전류는 변전소 리액턴스 성분과 전차선로 정전용량으로 병렬공진이 발생하여 변전소로 유입된다. 이 고조파는 급전계통의 조건에 따라 공진 대역에서 고조파 전류가 상승한다. 그러므로 병렬공진은 변전소 임피던스 Z_{ss} 와 전차선로 정전용량의 임피던스 Z_c 가 같은 조건에서 발생하므로 공진 주파수 $f = 1/2\pi \sqrt{LC}$ 가 된다.

병렬공진에 의해 발생하는 고조파 확대현상을 억제하기 위해 구분소에 RC 필터를 설치하는 경우, 그림 12에서와 같이 전철변전소 방향의 급전회로의 임피던스를 Z_1 , 급전선로 말단 구분소 방향의 급전회로의 임피던스를 Z_2 라 할 때, 구분소에 RC 필터 임피던스 Z_{CR} 를 설치할 경우의 전압과 전류는 각각 식 (3)과 식 (4)와 같다.

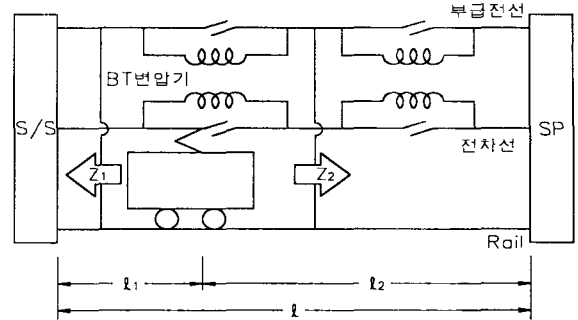


그림 12 BT 급전계통도
Fig. 12 Configuration of BT supply system

$$E_2 = E_{sp} \cosh \gamma \ell_2 + I_{sp} Z_0 \sinh \gamma \ell_2$$

$$= E_{sp} \frac{\sinh(\gamma \ell_2 + \theta_{sp})}{\sinh \theta_{sp}} \quad (3)$$

$$I_2 = E_{sp} \sinh \frac{\gamma \ell_2}{Z_0} + I_{sp} \cosh \gamma \ell_2$$

$$= I_{sp} \frac{\cosh(\gamma \ell_2 + \theta_{sp})}{\cosh \theta_{sp}} \quad (4)$$

전기차가 있는 위치에서의 구분소 방향의 임피던스는 다음과 같이 된다.

$$Z_2 = \frac{E_2}{I_2} = Z_0 \tanh(\gamma \ell_2 + \theta_{sp}) \quad (5)$$

여기서, $\theta_{sp} = \tanh^{-1} Z_{CR}/Z_0$ 이다. RC 필터 임피던스 Z_{CR} 을 특성 임피던스 Z_0 와 같게 하면, $\theta_{sp} = \infty$ 가 되어 전차가 급전거리에 관계없이 어떤 위치에 있어도 특성 임피던스는 공진 현상을 일으키지 않게 된다.

LC 필터는 전철변전소 급전 측에 설치하여 변전소 측으로 유입되는 특정한 조파의 고조파 전류함유율을 흡수할 목적으로 사용되며, 특정 조파의 최고 고조파 전류함유율을 분석하는데 이용된다. 급전계통 LC 필터 구성도를 나타내는 그림 13과 같이 전기차를 전류원, 전철변전소를 전압원으로 가정하고, 전철변전소 급전측에 LC 필터를 설치할 경우, 필터의 용량 계산은 필터에 흐르는 기본파의 전류 I_1 와 고조파의 전류 I_n 이 흐르는 것으로 가정한다.

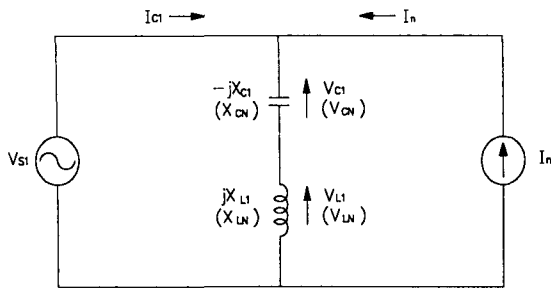


그림 13 급전계통 LC 필터 구성도
Fig. 13 Configuration of LC filter for supply system

공진 차수 n 는 공진 주파수 ω_n 에 기본주파수 ω_1 를 나누어 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$n = \frac{\omega_n}{\omega_1} = \frac{\omega_n}{2\pi f_1} = \frac{1}{2\pi f_1 \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad (6)$$

M을 리액터에 대한 콘덴서의 임피던스 비라 할 때, 설비 기격중의 기본파 전류는 $I_1 = Q_1 / V_{S1}$ 이 되고, 고조파 용량 $Q_n = I_n V_{S1}$ 이 된다.

2.6 고조파 임피던스 측정

BT 급전계통의 전철변전소는 5조파 이상에서 고조파 전류 함유율이 크게 발생하며 5, 7, 9 조파의 저차 고조파 전류 함유율과 11조파 이상의 고차 고조파를 억제하여야 한다. 고조파 저감장치로 RC 필터를 원덕(D/W) 구분소(Sectioning Post: SP)에 설치하여 고조파공진을 억제하여 공진 주파수를 기차로 하고 공진시 확대율을 감쇄시킨다.

급전계통에서 국수 변전소와 원덕 구분소간에 고조파 임피던스를 측정된 결과 공진점이 16조파에 있는 것을 확인할 수 있었으며, 전차선로 특성임피던스는 150[Ω]이다. 이 때의 조건은 국수 변전소 급전 측에 3조파 흡수용 LC 필터가 설치되어 있고, 원덕 구분소에는 750[Ω] 0.18[μF]의 RC 필터가 설치되어 있는 경우이다. 그림 14는 이 경우의 계통도를 나타내고 있다.

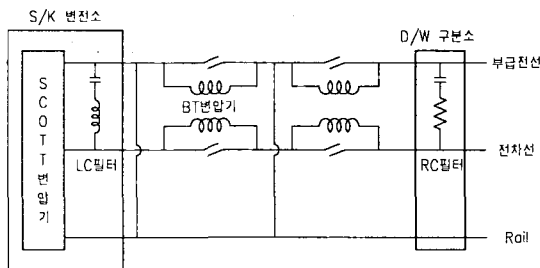


그림 14 국수 변전소 - 원덕 구분소간 계통도
Fig. 14 System for S/K SS - D/W SP

국수 변전소와 원덕 구분소간의 고조파 해석을 위하여 국수 변전소에 설치되어 있는 Scott 변압기의 임피던스 Z_{scott} , 전차선로 임피던스 Z_s , 정전용량 임피던스 Z_o 로 가정하고 주파수를 가변하기 용이한 교류전원으로 측정하였으며 그 결과는 그림 15와 같다.

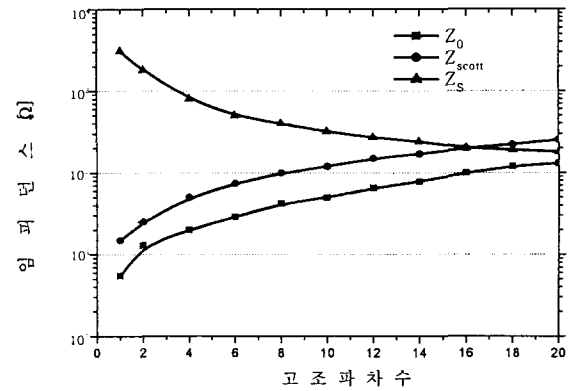


그림 15 Scott 변압기, 전차선로 개방시 단락 임피던스
Fig. 15 Short impedance for opening trolley lines of Scott transformer

RC 필터는 공진을 억제하기 위한 설비이며 공진은, 전원 측 리액터 L과 전차선로 측의 정전용량 C가 증가일 때 발생한다. 공진의 발생을 식으로 나타내면 각 임피던스가 같을 때, 즉 $X_L = X_C$ 의 경우이다. 급전계통에 Scott 변압기와 전차선로가 있을 경우에 그림 15에서와 같이 Z_{scott} 와 Z_o 가 교차하는 점, 즉 $Z_{scott} = Z_o$ 가 공진점이며 이 때의 공진주파수는 16조파이다.

국수 변전소와 원덕 구분소간의 전차선로의 특성 임피던스와 전파정수는 그림 16과 같다. 여기서 특성임피던스는 약 150[Ω]정도이므로 RC 필터의 저항은 200[Ω]을 기준으로 한다.

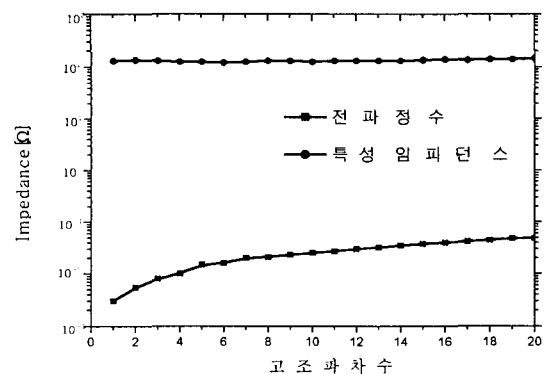


그림 16 국수 변전소 - 원덕 구분소간 특성임피던스와 전파정수
Fig. 16 Characteristic impedance and propagation constants of S/K SS - D/W SP

2.7 고조파전류 산출

계통의 조파별 임피던스를 기준으로 전기차가 구분소에서 조파별로 단위전류를 발생할 경우, 급전 측, 즉 LC필터 후단으로 유입되는 고조파 전류함유율은 구분소에 RC 필터가 없을 때, 750[Ω]과 200[Ω] RC 필터를 각각 설치할 때로 구분하여 계산하였고, 그 결과는 그림 17과 같다.

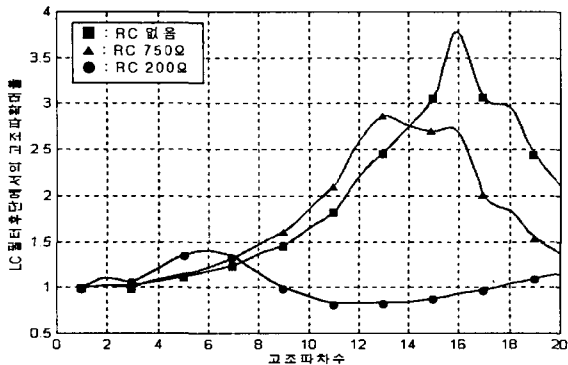


그림 17 LC 필터 후단에서의 고조파확대율
Fig. 17 Harmonics magnification ratios of LC filter secondary

전원측 임피던스와 전차선로 정전용량에 의해 16조파에서 공진이 발생하는데 이는 이론적 배경에서와 같이 RC 필터를 설치하지 않을 경우에 16조파에서 공진이 발생한다. RC 필터를 750[Ω]과 200[Ω]으로 구분소에 설치하는 경우는 공진주파수가 저차로 되고 고조파확대율도 감소하는 것으로 나타났다.

그림 18과 같이 전기 기관차에서 발생하는 고조파 최대전류를 분석한 자료를 이용하여, 구분소에서 전기차의 고조파 전류함유율을 보면 Scott 변압기로 유입되는 고조파 전류함유율은 그림 19와 같다. 200[Ω] RC 필터를 구분소에 설치할 경우는 9조파 이상에서 고조파 전류함유율이 낮게 나타난다.

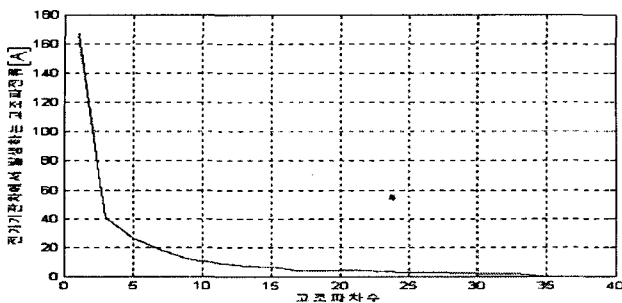


그림 18 전기 기관차에서 발생하는 고조파 최대전류
Fig. 18 Maximum harmonic currents outflow from electric train

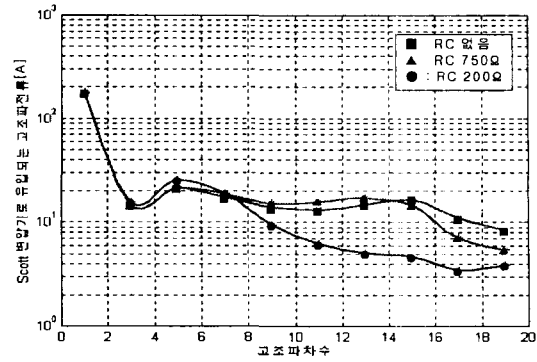


그림 19 Scott 변압기로 유입되는 고조파 예측전류
Fig. 19 Predictive harmonic currents inflow into Scott transformer

그림 20은 LC필터로 유입되는 고조파 함유율을 나타내는 결과로서 200[Ω] RC필터를 설치시에는 9조파만이 유입되고, 9조파 이상의 전류가 200[Ω] RC필터를 설치하는 경우보다 크다.

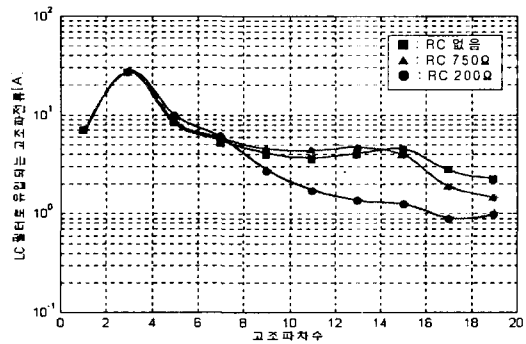


그림 20 LC필터로 유입되는 고조파 예측전류
Fig. 20 Predictive harmonic currents inflow into LC filter

3. 현장측정치와 시뮬레이션 결과 비교

원덕 구분소에 RC 필터를 접속하지 않을 경우, 750[Ω] RC 필터를 접속할 경우, 200[Ω] RC 필터를 접속할 경우에 대하여 Scott 변압기로 유입되는 고조파 및 수전측 전압왜형률을 측정 하였다. 모의계산 결과와 비교해 보면 16조파와 3조파 부근에서는 측정값이 다소 차이가 있다. 그 이유는 전차선로 임피던스와 정전용량 측정시에 임피던스가 부하조건에 따라 변하기 때문이다. 16조파에서도 공진현상 때문에 계산치와 측정치는 다소 차이가 있다.

그림 21에서 Scott 변압기로 유입되는 고조파 전류함유율을 보면 RC 필터가 접속하지 않을 경우는 24.87[%], 750[Ω] RC 필터를 접속할 경우는 24.98[%]로 큰 차이는 없지만 200[Ω] RC 필터를 접속하는 경우는 10.87[%]이므로 이 경우는 두 배 이상 감소되는 것을 알 수 있다.

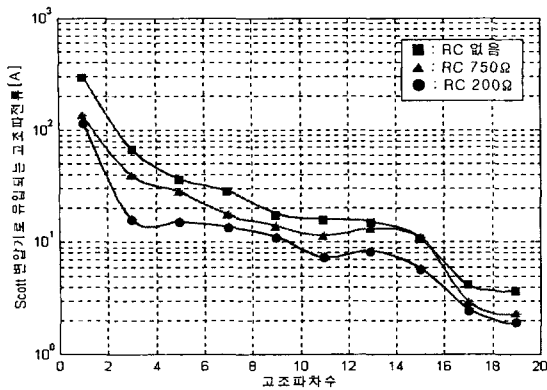


그림 21 Scott 변압기로 유입되는 고조파 측정전류
Fig. 21 Measurements of harmonic currents inflow into Scott transformer

표 1은 원덕 구분소에 필터를 접속하지 않을 경우, 750[Ω]과 200[Ω] RC 필터를 접속한 3가지에 대한 전압왜형률과 그 평균값을 나타내고 있다. 수전측의 전압왜형률을 보면 원덕 구분소에 750[Ω] RC 필터를 접속하게 되면 최고 전압왜형률이 11.3[%]에서 11[%]로 0.3[%] 감소하지만, 200[Ω] RC 필터를 접속하면 최고 전압왜형률이 11.3[%]에서 4.9[%]로 6.4[%] 감소되고, 750[Ω] RC 필터를 접속할 경우에 비교하면 6.1[%] 감소하여 4.9[%]로 측정되었다.

표 1 수전측 전압왜형률 측정결과
Table 1 Measurement results for receiving line distortion ratios

필터용량	상별전압 왜형률	부하[A]	전압왜형률 [%]			
			A상	B상	C상	평균
RC 필터가 없을 경우	최저	20.1	1.0	0.6	0.6	0.8
	최고	133.2	14.5	12.6	14.6	11.3
750[Ω]/0.18 [μF] RC 필터	최저	21.1	1.4	0.8	0.9	1.1
	최고	156.5	14.2	13.9	14.8	11.0
200[Ω]/1.5 [μF] RC 필터	최저	28.7	0.9	0.6	0.6	0.7
	최고	133.6	5.4	5.1	6.0	4.9

Scott 변압기 수전 측에서 고압배전선로에 대한 전압왜형률을 계산한 결과는 표 2와 같으며, 이 때의 조건은 M/T상에 750[Ω] RC 필터와 200[Ω] RC 필터를 각각 접속할 경우이다. 750[Ω] RC 필터를 M/T상 각각 접속할 경우는 전압왜형률이 6.4[%]였으나 200[Ω] RC 필터를 설치할 경우는 3.2[%]로서 거의 50[%] 이상 감소되는 것으로 나타났다.

국수 변전소에서 측정된 고조파확대율과 DNT 기법에 의하여 시뮬레이션 한 결과를 비교한다. 고조파확대율을 시뮬레이션하기 위하여 시뮬레이션 대상의 주파수에 대한 임피던스를 산출하고 각 주파수별로 회로해석을 하여야 하지만 계산의 간편성을 위해 각 임피던스를 라플라스 함수의 형태인

다항식으로 나타내면 다음 식 (7)과 같다.

$$Z(s) = \frac{b_1s^4 + b_2s^3 + b_3s^2 + b_4s + b_5}{a_1s^4 + a_2s^3 + a_3s^2 + a_4s + a_5} \quad (7)$$

주어진 주파수에 대한 임피던스값을 다항식 Z(s)으로 나타내기 위해서는 $\sum_{n=1}^m [Z^*(jn\omega_0) - Z(jn\omega_0)]^2$ 을 최소화하는 Z*(s)를 구해야 한다. 여기서 ω_0 는 기본주파수, 그리고 n은 고조파 차수를 나타낸다.

표 2 고압배전 전압왜형률[%] 예측계산
Table 2 Predictive computations of THD for high voltage distribution lines

구분	M/T상 각각750[Ω] RC 접속	M/T상 각각200[Ω] RC 접속
A상	7.0	3.5
B상	2.6	1.3
C상	9.5	4.8
평균	6.4	3.2

변전소와 구분소에서 측정된 각 계통의 조파별 임피던스를 주파수에 대한 크기와 위상으로 나타내었고, 이 방법에 의해 산출한 다항식 값으로 주파수에 대한 크기와 위상을 비교한 그림을 부록에 수록하였다. 각 계통별 임피던스의 다항식은 다음 표 3과 같다.

표 3 계통별 다항식
Table 3 Polynomial expressions for systems

계통	다항식
Scott 변압기	$\frac{s^3 + 3.724 \cdot 10^7 s}{0.0322s^4 + 1.199 \cdot 10^6 s^2 + 5.71 \cdot 10^{10}}$
한국 전력 모선	$\frac{s^2 + 6.396 \cdot 10^6 s - 3.763 \cdot 10^7}{6.776 \cdot 10^3 s^3 + 4.334 \cdot 10^4 s^2 - 1.389 \cdot 10^5 s - 6.83 \cdot 10^5}$
LC 필터	$\frac{s}{0.1492s^2 + 163132}$
선차 선로	$\frac{s^2 + 11131s + 1.192 \cdot 10^8}{1.393 \cdot 10^2 s^2 + 1.502 \cdot 10^6 s + 7.235 \cdot 10^8}$
정전 용량	$\frac{s + 35.19}{7.991 \cdot 10^{-4} s^2 + 67.27s + 1.188 \cdot 10^6}$
RC 필터 750 [Ω] 18[μF]	$\frac{s + 1.074 \cdot 10^{-13}}{-6.806 \cdot 10^{-17} s^2 + 750s + 5.556 \cdot 10^6}$
RC 필터 200[Ω] 1.5[μF]	$\frac{s}{0.0531s^2 + 200s + 6.6667 \cdot 10^5}$

고조파 확대율을 시뮬레이션하기 위해 그림 22와 같이 DNT 기법을 이용하여 모델링을 한다. 구분소에 RC 필터를 설치하지 않을 경우, 750[Ω] RC 필터를 설치하는 경우, 200[Ω] RC 필터를 설치하는 경우의 3가지 방법으로 구분하였다.

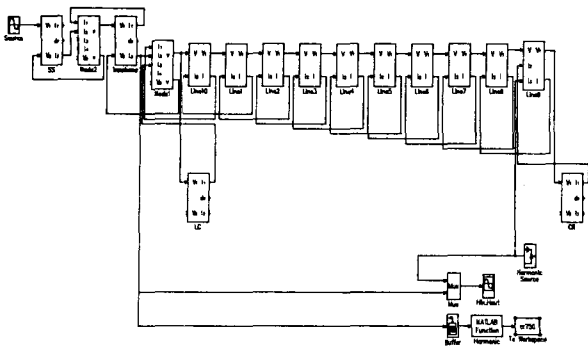


그림 22 Scott 변압기 후단으로 유입되는 고조파확대율 계산 모델

Fig. 22 Computation model of harmonic magnification ratios of Scott transformer secondary

고조파확대율은 전기차가 구분소에 각 기수 조파별로 1[A]의 전류를 발생할 때, 급전측에서의 고조파 전류함유율 변화를 나타낸 것이다. 구분소에 RC 필터가 없을 때는 고조파 확대율이 15조파에서 2.3배, 750[Ω] RC 필터를 설치할 경우 13조파에서 2.2배, 200[Ω] RC 필터를 설치할 경우 7조파에서 1배 정도로 고조파확대율과 확대주파수가 나타나게 된다. 이 결과는 고조파 공진 관계식과 비교할 때 거의 동일한 값을 가지므로 본 논문에서 사용한 DNT 기법에 의한 고조파 시뮬레이션이 유용성이 있음을 알 수 있다.

교류급전 계통의 고조파를 중앙선의 국수 변전소와 원덕 구분소에서 실측을 하였고 DNT 기법으로 구현한 시뮬레이션 프로그램의 출력을 대비한 결과 DNT 기법이 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 또한 RC필터를 설치하지 않을 경우와 750[Ω] RC필터를 설치할 경우, 200[Ω] RC필터를 설치할 경우를 각각 모의 시험하였고 그 결과는 그림 23과 같다.

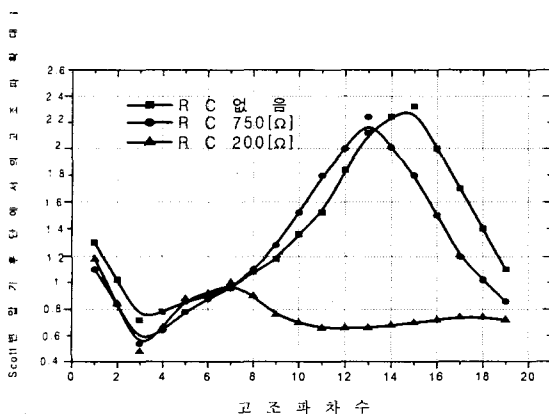


그림 23 Scott 변압기 2차 고조파확대율

Fig. 23 Harmonic magnification ratios of Scott transformer secondary

본 절에서는 새로운 기법의 DNT 모델 전개로 정확도를 향상시킬 수 있는 프로그램을 적용하였고, 필터를 설치하는

경우의 고조파 확대율과 확대주파수를 차수별로 분석 및 모의 계산 후 그 결과를 현장시험과 이론적으로 증명하였다.

4. 인천국제공항 철도의 고조파 예측

한전변전소 전력 인출점에서의 고조파 전압왜형률을 계산하기 위해서는 M상과 T상의 전기기관차에서 발생하는 고조파 전류가 전차선로를 따라 전철변전소로 유입되는 고조파 전류의 각 상별 총합을 구하고, 이로부터 한전변전소 인출점으로 유입되는 고조파 전류를 계산하고 한전변전소에서의 고조파 전압왜형률을 산출한다.

4.1 입력 데이터

1) 굴현(H/K) 전철변전소

표 4 굴현 전철변전소 입력 데이터

Table 4 Input data of H/K S/S

구분		데이터	비고
한전 전력 계통	모선 정격전압	154[kV]	한전입학 S/S
	계통 임피던스	0.099+j1.593[%]	00[MVA] 기준
		0.0299+j0.4819[Ω]	55[kV] 기준
송전 선로	선로 전압	154[kV]	
	선로 공장	가공	
		지중	3.0[km]
	선로임피던스	0.0505+j0.114[%]	100[MVA]기준
0.0097+j0.0218[Ω]		55[kV] 기준	
전철 주변압기	정격전압	154/55[kV]	
	정격용량	45[MVA]	
	임피던스	0.5149+j13.9039[Ω]	55[kV] 기준

2) 급전선로

표 5 급전선로 입력 데이터

Table 5 Input data of feeder lines

구분		데이터	비고
굴현 S/S	서울 역방면	급전 거리	29.300[km]
		AT 위치	굴현S/S, 김포SSP, 수색SSP, 서울ATP
	AT 용량	용량 : 10[MVA]	굴현S/S
		용량 : 5[MVA]	김포SSP, 수색SSP, 서울ATP
신공 항방면	급전 거리	32.474[km]	굴현-신공항1역
		AT 위치	굴현S/S, 연육교SSP, 동강SSP
	AT 용량	용량 : 10[MVA]	굴현S/S
		용량 : 5[MVA]	연육교SSP, 동강SSP

3) 차량 고조파 발생량

검증된 DNT 기법으로 차량에서 발생하는 고조파 전류를 산정한 결과는 표 6과 같다.

표 6 차량발생 고조파 전류
Table 6 Harmonic currents of electric railway

고조파 차수	주파수[Hz]	M[A]	MM'[A]	4M4T[A]
1	60	65.479	152.887	306.413
3	180	1.889	4.559	8.988
5	300	0.118	0.224	0.376
7	420	0.132	0.466	1.519
9	540	0.01	0.065	0.796
11	660	0.048	0.049	0.442
13	780	0.148	0.096	0.138
15	900	0.063	0.082	0.501
17	1020	0.152	0.210	0.389
19	1140	0.072	0.035	0.447
21	1260	0.16	0.107	0.206
23	1380	0.491	0.130	0.276
25	1500	2.045	0.159	0.597
27	1620	0.68	0.061	0.192
29	1740	0.952	0.122	0.017
31	1860	1.229	0.154	0.414
33	1980	0.814	0.257	0.493
35	2100	0.299	0.171	0.272
37	2220	0.07	0.117	0.061
39	2340	0.074	0.187	0.365
41	2460	0.076	0.089	0.260
43	2580	0.073	0.044	0.242
45	2700	0.015	0.168	0.273
47	2820	0.119	0.271	0.493
49	2940	0.246	0.349	0.302

그림 24는 8량(4M4T) 편성 차량 기준으로 운행할 경우의 전소로 미치는 고조파 발생량을 나타낸다.

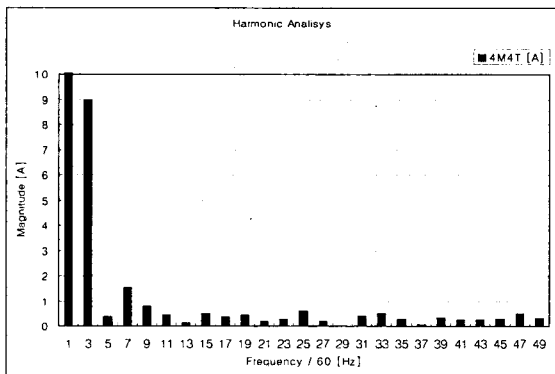


그림 24 8량 편성차량 차수별 고조파 발생량
Fig. 24 Harmonics of 8 cars(4M4T)

4) 고조파 전압왜형을 및 고조파 허용 기준치

IEEE 519에 의한 전압왜형을 규격은 표 7과 같다.

표 7 전압왜형률 규격(IEEE 519)
Table 7 THD standard(IEEE 519)

구분	계통 전압		
	23 - 69 kV	69 - 132 kV	132 kV 이상
개별 조파 [%]	3	1.5	1
THD [%]	5	2.5	1.5

한국전력공사 고조파 허용 기준치는 다음과 같다.

표 8 한국전력공사 고조파 허용 기준치
Table 8 Allowable values of harmonics by KEPCO

구분	계통 항목	지중선로가 있는 S/S에서 공급하는 고객	
		전압왜형률 (%)	등가방해 전류(%)
개별 조파 [%]		3	-
THD [%]		1.5	3.8

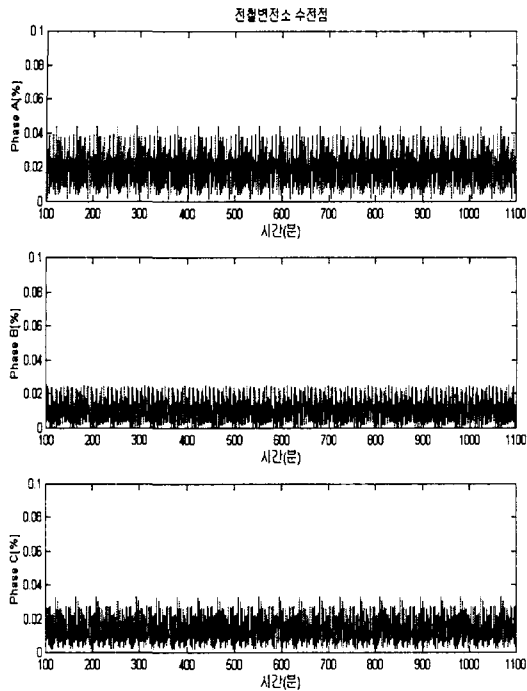
5) 운행 전기차량 데이터

차량 일반사항(환경조건, 공급전원, 궤도), 열차성능(차량구성, 차량중량, 운전속도) 및 차량 주요 구성요소 규격(차체, 대차 및 동력장치, 집진장치 등)에 대한 데이터는 ROTEM 보고서[9]를 기초로 하였다.

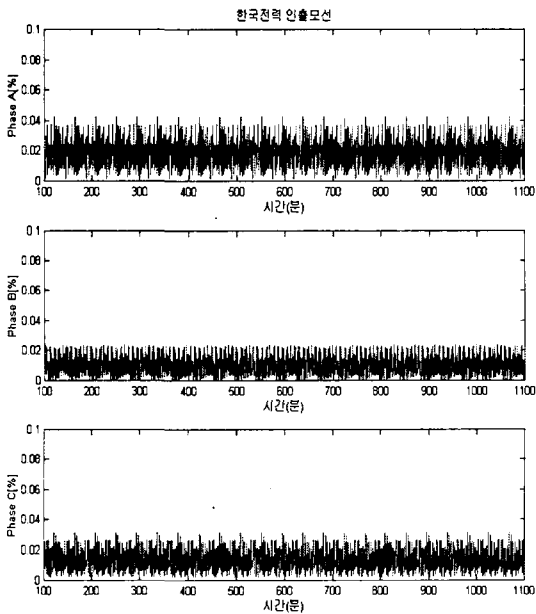
4.2 고조파 예측 결과

DNT 기법으로 입력 데이터와 계산 절차에 따라 철도급전 시스템 고조파 해석 프로그램[10]을 수행한 결과, 고조파 대책설비가 없는 경우 154[kV] 수전측 굴현 변전소와 한전모선 임학(H/I) 변전소에서 각 상별 시간에 따른 전압왜형률의 측정값은 그림 25와 같다. 표 9는 그림 25의 결과를 근거로, 고조파 대책설비가 없는 경우 154[kV] 수전측과 한전모선에서 각 상별 전압왜형률을 나타낸다.

전압왜형률은 연도별 열차편성 및 운전시격표 중 목표연도 2020년의 열차운행다이아(안)에 따라서 8량 편성 통근열차와 직통열차(4M4T)가 상선 및 하선을 운행할 때 굴현전철변전소 수전측에서 3상 최대 0.0443[%]로 계산되었다. 이 경우, 고조파 계산 결과 값은 우리나라의 현행 규제치(154[kV]에서 1.5[%]) 및 IEEE-519 규격(132[kV]이상에서 1.5[%])을 만족하므로 별도의 대책이 필요 없을 것으로 평가되었다.



(a)



(b)

그림 25 전압왜형률 결과 그래프 ; (a) 전철변전소(굴현) 수전점 전압왜형률, (b) 한전변전소(임학) 인출모선 전압 왜형률

Fig. 25 Graphs of voltage distortion factors: (a) at receiving point of H/K S/S, (b) at outgoing bus of H/I S/S

표 9 154[kV] 수전측과 한전모선에서의 전압왜형률 [%]
Table 9 Voltage distortion factors at receiving points and outgoing points of S/S

전철변전소(굴현) 수전측			한전변전소(임학) 인출모선		
A상	B상	C상	A상	B상	C상
0.0443	0.0247	0.0328	0.0423	0.0237	0.0313

5. 결 론

본 논문에서는 교류 방식의 전동차가 운행하면서 발생하는 고조파와 전철변전소로 유입되는 고조파를 예측하고 분석하기 위해 DNT 방식으로 고조파의 발생과 영향을 미치는 주요 기기별 모델링을 수행하였다. 고조파 해석을 위해 산업선 국수 변전소에서 측정된 고조파, 고조파확대율 등의 실측자료를 DNT 기법으로 모의 시험한 결과와 비교하고, 필터를 설치하는 경우와 설치하지 않을 경우를 각각 분석하여 고조파 및 고조파확대율과 경우별 고조파 억제효과를 예측 계산했다.

DNT 기법으로 차량에서 발생하는 고조파 전류를 계산한 결과를 사용하여 인천국제공항 철도의 고조파 예측계산을 통하여 고조파 대책을 위한 설비의 필요성을 검토한 결과, 고조파 대책설비를 별도로 설치하지 않는 경우에서도, 인천국제공항철도의 전철 및 한전변전소의 고조파 예측결과는 다음과 같이 평가되었다.

전압왜형률은 연도별 열차편성 및 운전시격표 중 목표연도 2020년의 열차운행다이아(안)에 따라서 8량 편성 통근열차와 직통열차(4M4T)가 상선 및 하선을 운행할 때 굴현전철변전소 수전측에서 3상 최대 0.0443[%]로 계산되었다. 고조파 계산 결과 값은 우리나라의 현행 규제치(154[kV]에서 1.5[%]) 및 IEEE-519 규격(132[kV]이상에서 1.5[%])을 만족하므로 별도의 대책이 필요 없을 것으로 평가되었다.

그러나 이것은 현재 제공된 조건에서만 평가된 경우이므로 계통이 달라지면 고조파 전류를 많이 발생하는 차량이 운행될 경우에는 고조파 저감을 위한 대책 연구를 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] 송진호, 황유모, "지하철 전력계통의 고조파 영향 분석 및 그 대책에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 제 51B 권, 4 호, pp. 210- 220, 2002. 4.
- [2] "배전계통 고조파 장애 방지대책", 電氣協同研究會, 第 37 卷, 第 3號, pp. 1-184, 1981.
- [3] D. Maischak, "A novel control strategy for IGBT-Four-Quadrant converter", pp.3179-3183, EPE'97.
- [4] "구미제국의 고조파 억제대책의 상황", 月刊電機 通卷 第 95 號, pp. 46-50, 1996.
- [5] Giuseppe S. Buja, "Optimum Output Waveforms in

- PWM Inverters”, *IEEE Trans. on IA*, vol. IA-16, no. 6, pp. 830-836, 1980.
- 5] “고조파 발생원에서의 대책”, *月刊電機 通卷 第 86 號*, pp. 31-39, 1995.
 - 7] Frank Flinders, “Mixed electrical and mechanical simulations using dynamic systems analysis packages”, *the Proceeding of the 1993 IEEE/ASME joint railroad conference*, 1993.
 - 8] 한국철도기술공사, “충북선 조치원-봉양간 전철, 전력설비 기 본설계보고서(변전설비)”, 1997. 11.
 - 9] ROTEM, “Incheon International Airport Railway Link Project”, Feb., 2001.
 - 10] 철도기술연구원, “철도급전시스템 고조파 해석 프로그램”, 2002. 2.

저 자 소 개

송 진 호(宋 晋 鎭)

전기학회 논문지 제 51B권 4호 참조

황 유 모(黃 有 模)

전기학회 논문지 제 51B권 4호 참조