

전기철도 급전시스템의 주파수 기반모델을 이용한 고조파 해석 Harmonics analysis based on a frequency domain in Electric Feeding System

한문섭* 이장무* 정호성* 김주락*

Han, Moonseob Lee, Jangmu Jung, Hosung Kim, Joorak

ABSTRACT

Each feeding power is transformed 3 phases of KEPCO through SCOTT transformer and operate a electric train in AC Feeding system of electric railway. Nowaday a power conversion system, installed inside the train, generate a harmonics and has a effect on a power quality and it is necessary to install a countermeasures.

This report is proposed a new technique to simulate a power system based on frequency model. The result is resonable relatively with a experimental one.

1. 서론

전기철도에서는 전기차량을 운행시키기 위해 전철변전소에서 변환된 전력을 전차선을 이용하여 전달하고 전기차량의 판토타그래프와의 습동작용에 의해 전기차량에 전달시킨다. 전기차량은 승객이나 화물을 운반시키는 매개체의 역할을 하여 한 개의 급전구간에서 볼 때 여러 대용량의 전력들이 위치를 이동하면서 움직이는 독특한 계통을 구성하게 된다.

전기차량의 추진시스템은 열차를 움직이는 중요한 철도시스템중의 하나이다. 교류급전시스템에서의 추진시스템은 보통 주로 컨버터를 통하여 교류를 직류로 변환시키고 인버터를 통하여 직류를 교류로 변환시켜 교류견인전동기를 구동시킨다. 전철화 초기에는 교류견인전동기 대신에 직류견인전동기를 사용할 경우에는 인버터를 사용하지 않았고 컨버터에서 직류 생성시 바로 직류견인전동기를 구동시켰다.

전력계통에서 고조파는 모든 전기소자에 의해서 발생하지만 특히 인버터나 컨버터와 같은 스위칭 장치에 의해 주로 발생한다. 전기차량에서 발생한 고조파전류는 전철변전소로 유입되어 전기장치의 고장 및 보호계전기의 측정 오류 등을 일으킬 수 있으며 한국전력에서 규정하고 있는 전압왜형에 관한 수전 가이드라인을 초과할 수도 있다. 또한 전기철도는 귀선을 레일을 이용하고 있기 때문에 레일을 이용한 신호케도회로나 인근 유선통신관련 선로나 장치 및 전자파에 의한 방송 및 무선통신의 품질에 영향을 미칠 수 있다.

* 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 전력계통연구그룹

국내에서 전철화는 1970년대부터 진행되어왔으며 최근 고속철도의 개통과 함께 경부선과 호남선을 포함한 주요 노선에 대한 전철화가 급속히 진전되어 오고 있다. 고조파에 대한 대책으로 기존에는 전철변전소에 싸이리스터 전기기관차에 대한 수동형 LC 밴드패스 필터를 이용한 저차 고조파 저감장치가 설치되었고 최근 들어 PWM 컨버터에 의한 전기기관차가 도입되면서 고차고조파전류 저감을 위해 능동형 필터의 도입이 추진되고 있다.

이러한 필터의 설계를 위해 전력계통측면에서는 고조파 해석을 수행하여야 하며 기존에는 각 소자의 각 조파별 임피던스를 산출하여 각 조파별로 전력회로 해석을 반복하여 수행하거나 전용 프로그램을 이용하여야 하였으나 본 연구에서는 고조파 기준에 수행하여 온 각 조파별 고조파 해석을 탈피하여 각 소자를 주파수기반의 함수화를 수행하여 고조파 해석하는 방안을 제시하고 그 특성을 입증하였다.

2. 주파수기반 모델의 고조파해석

2.1 DNT(Dynamic Node Technique) 모델링 기법

Matlab과 Simulink는 많은 수학적 함수와 그래픽 모델이 지원되는 Dynamic system simulation package로 전기회로 및 전기 기기와 기계 역학적인 장치가 복합 (Mixd) 연결된 시스템을 시뮬레이션 하는데 효과적이다.

1) DNT (Dynamic Node Technique) 기법

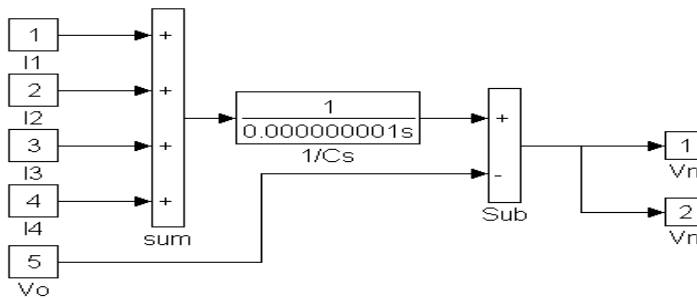


그림 1. Node DNT 모델

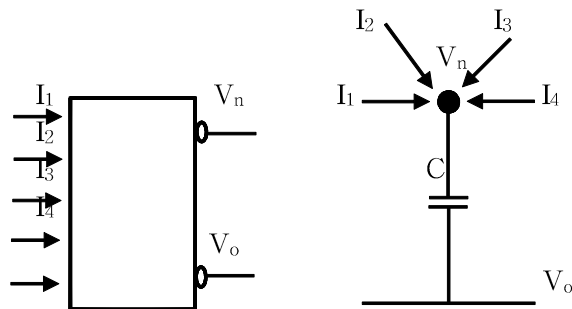


그림 2. Masking 모델

DNT 기법은 아래 그림과 같은 전기회로에서의 Node 경우 Node에서 입출력되는 전류를 총 전시키는 기생 캐패시터를 Node에 삽입하여 모델링 한다. 이를 식으로 나타내면 아래 식 같다.

$$V_n = \frac{1}{C} \int \sum I_n dt$$

이를 Simulink에서 모델링 하면 그림 1과 같으며 각 입력전류 I_1, I_2, I_3 와 I_4 를 합한 후에 기생 캐패시터($C=10^{-9}F$)로 적분한 값에 기준 전압을 빼면 Node에서의 전압을 알 수 있다. Simulink의 기능 중에는 Masking이라는 기능을 갖고 있으며 그림 2와 같이 구성한 Node 모델을 Masking 하면 아래와 같이 입력 I_1, I_2, I_3, I_4 및 V_0 와 출력 V_n 으로 축약된다.

2) 전기적 소자모델

보통 전기회로는 소자와 소자사이에는 Node가 존재하며 Node는 위와 같이 Node에 입출력되는 전류를 입력으로 받아 Node 전압을 출력시킨다. 그러므로 전기소자는 소자 양단간의 Node로부터 전압을 받아 소자의 전기적인 특성에 의해 전류를 출력시켜야 한다.

전기적 소자모델은 전류를 전압의 시간함수로 나타내며 수동소자는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 전기소자의 입력전류를 I_1 , 입력전압을 V_1 , 출력전류를 I_2 및 출력전압을 V_2 라 하면, Node를 기준으로 출력전류는 나가는 방향으로 흐를 때를 정(+) 값으로 정하면, Node를 기준으로 할 때 입력전류는 전류가 들어오는 방향이고 출력전류는 전류가 나가는 방향이므로 입력전류는 출력전류와 크기는 같은 부(-) 값이 된다.

아래 식에서와 같이 출력전류는 입력전류와는 Node를 기준으로 방향이 반대이며, 출력전류를 출력전압을 입력전압으로 뺀 값에 소자의 전기적인 임피던스를 나누면 구하여진다. 경우에 따라 싸이리스터 또는 GTO 등의 전력변환장치의 소자 모델링을 수행하는 경우 입력단의 G단자에 적절한 신호를 입력하여 소자의 특성을 묘사할 수 있다.

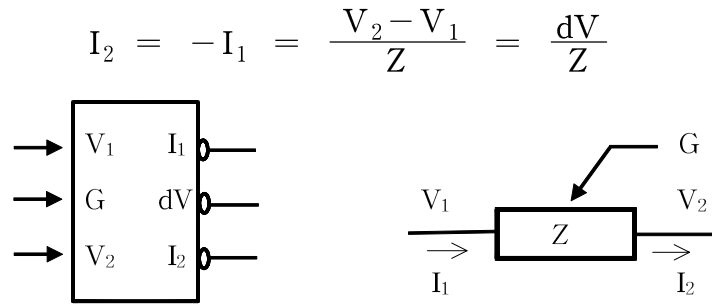


그림 3. 전기적 소자 모델

표 1. 전기소자 DNT 모델

전기소자	블럭도	회로
인덕터		
캐패시터		
저항		

인덕터, 캐패시터 및 저항의 수동소자의 경우에 대한 회로구성 및 소자 모델링을 위한 블럭도는 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 각 계통의 임피던스 특성 및 다항식값 산출

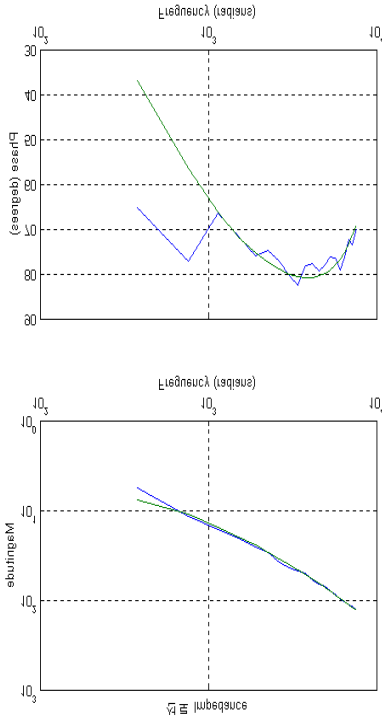


그림 4. 측정치와 다항식과의 특성비교 -선로임피던스

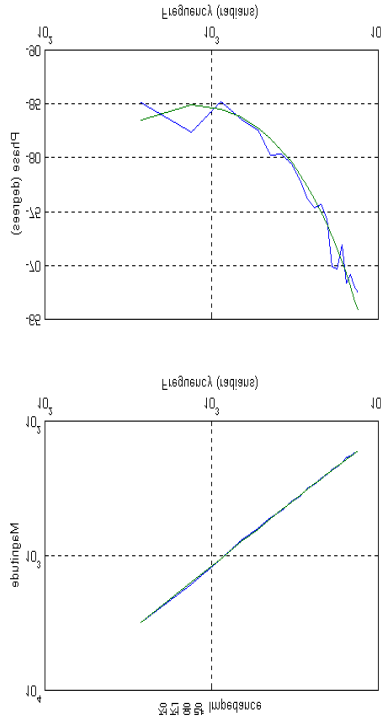


그림 5. 측정치와 다항식과의 특성비교 - 정전용량 임피던스

표 2. 계통별 다항식

계통	다항식
Scott 변압기	$\frac{s^3 + 3.724 \cdot 10^7 s}{0.0322s^4 + 1.199 \cdot 10^6 s^2 + 5.71 \cdot 10^{10}}$
한국전력모선	$\frac{s^2 + 6.396 \cdot 10^6 s - 3.763 \cdot 10^7}{6.776 \cdot 10^3 s^3 + 4.334 \cdot 10^4 s^2 - 1.389 \cdot 10^5 s - 6.83 \cdot 10^5}$
LC필터	$\frac{s}{0.1492s^2 + 163132}$
전차선로	$\frac{s^2 + 11131s + 1.192 \cdot 10^8}{1.393 \cdot 10^2 s^2 + 1.502 \cdot 10^6 s + 7.235 \cdot 10^8}$
정전용량	$\frac{s + 35.19}{7.991 \cdot 10^{-4} s^2 + 67.27s + 1.188 \cdot 10^6}$
RC 필터 750Ω 0.18uF	$\frac{s + 1.074 \cdot 10^{-13}}{-6.806 \cdot 10^{-17} s^2 + 750s + 5.556 \cdot 10^6}$
RC 필터 200Ω 1.5uF	$\frac{s}{0.0531s^2 + 200s + 6.6667 \cdot 10^5}$

고조파를 모의하기 위해서는, 보통 모의하고자 하는 주파수에서의 각 임피던스를 산출하여 각 주파수별로 회로해석을 하지만 여기서는 계산의 간편성을 위해 각 임피던스를 라플라스 함수,

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

의 형태인 다항식으로 나타낸다.

주어진 주파수에 대한 임피던스값을 다항식(Z(s))으로 나타내기 위해서는

$\sum_{=1}^n \left(Z(s) - \frac{B(s)}{A(s)} \right)^2$ 을 최소화하는 Z(s)를 구해야 한다. 또한 각 계통별 임피던스의 다항식은 다음 표 2와 같다.

2.3 주파수기반 모델의 고조파해석

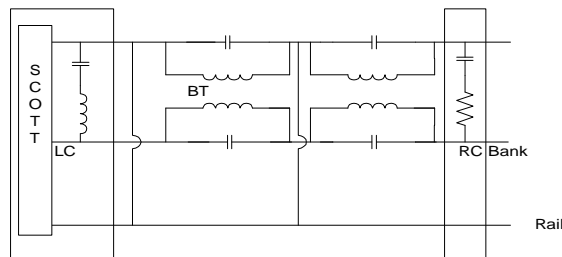


그림 6. 급전계통도

DNT 기법에 의해 고조파 시뮬레이션을 수행하기 위해 그림 6의 급전계통도를 그림 7과 같이 DNT 기법을 이용한 모델링을 구분소에 RC 필터가 없을 때, 750Ω RC 필터가 설치되어 있을 때와 200Ω RC 필터가 설치되어 있을 때 3가지의 경우로 나누어 수행하였으며 그 결과는 그림 8과 같으며 그림은 기수 조파에 대한 고조파 확대율을 보여주고 있다.

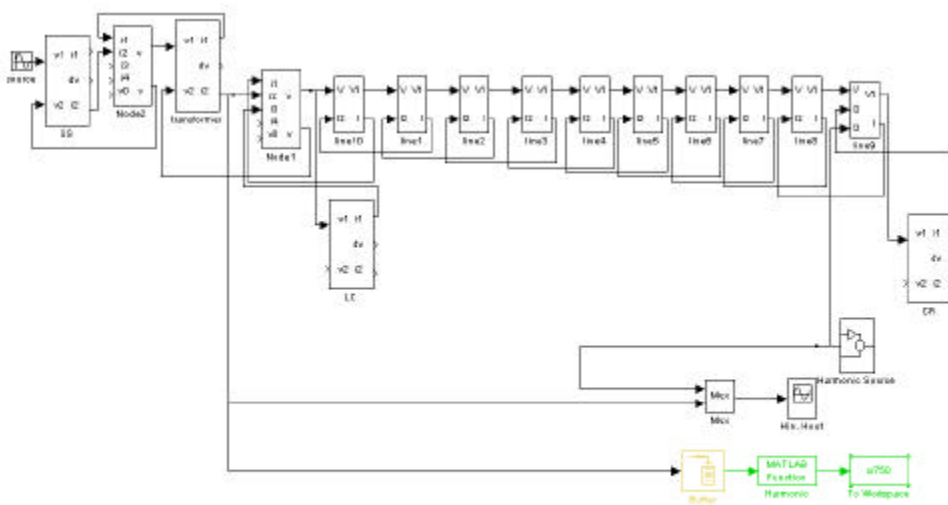


그림 7. Scott 변압기 후단으로 유입되는 고조파확대율 계산 모델

여기서 고조파확대율이라 함은 전기차가 구분소에 각 기수 조파별로 1A의 전류를 발생할 때

급전측에서의 고조파 전류함유율의 변화율을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 구분소에 RC 필터가 없을 때는 고조파 확대율이 15조파에서 2.3배, 750Ω RC 필터를 구분소에 설치할 경우 13조파에서 2.2배, 200Ω RC 필터를 구분소에 설치할 경우 7조파에서 1배정도로 고조파확대율과 확대주파수가 감소됨을 알 수 있다. 이 결과는 뒤의 계산식의 결과와 비교할 때 거의 동일함을 알 수 있어 DNT 기법에 의한 고조파 시뮬레이션이 가능함을 알 수 있다.

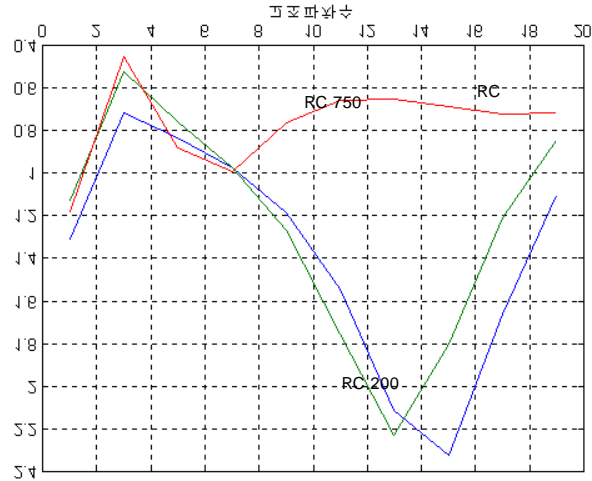


그림 8. Scott 변압기 후단으로 유입되는 고조파확대율

4. 결 론

본 연구에서는 최근 들어 철도에서 이슈화되고 있는 전력품질 중 고조파에 대한 해석을 위해 Matlab의 Simulink를 이용하여 각 소자별로 주파수 기반 모델을 세워 DNT(Dynamic Node Technique) 기법을 제시하였다. 해석대상 급전계통도에 따라 각 소자의 주파수별 임피던스특성을 이용하여 모델링하여 시뮬레이션한 결과 일반적인 고조파 해석과 큰 특성차를 보이지 않았다. 특히 본 논문에서는 고조파확대율 관점에서만 해석을 수행하였으나 전기차량과 최근에 설치가 이루어지는 능동필터에 따른 급전계통의 동적인 해석을 수행하기 위해서는 이들 계통을 대표할 수 있는 모델의 개발이 요구되어 진다.

참고 문헌

1. "Mixed electrical and mechanical simulations using dynamic systems analysis packages", Frank Flinders와 2인, Proceedings of the 1993 IEEE/ASME joint railroad conference, 1993
2. "기전 System 技術講座", 鐵道總合技術研究所, 1995. 9
3. "AT 기전회로におはる 高調波共振と 抑制對策", 持永芳文외4인, T.IEE Japan, Vol.114-D, No 10, '94