

전기철도차량 이선 현상 검출을 위한 TEO 및 STFT 신호처리기술 적용에 관한 연구

A Study on the Application of TEO and STFT Signal Processing Techniques for Detection of Electric Railway Contact Loss

정 노 건* · 박 철 민* · 이 재 범* · 박 영* · 신 승 권†
(No-Geon Jung · Chul-Min Park · Jae-Bum Lee · Young Park · Seung-kwon Shin)

Abstract - In this paper, A technique for detecting contact loss at the input power of a railway vehicle has been studied when the contact loss occurs in the feed system. The impedance of the actual railway line was applied to the modeling of the feed system, and modeling was performed based on the performance of the electric railway vehicle. The input voltage and current of the railway vehicle through modeling were analyzed by applying TEO and STFT signal processing technique.

Key Words : TEO, STFT, Railway feeding system, Railway vehicle, Contact loss

1. 서 론

국내 전기철도분야에서는 전차선 전압과 전류 이상신호에 대한 감지기술개발이 아직 활발히 연구되지 않고 있다. 이는 국내에서 연구에 활용 중인 대부분의 전력품질 분석 장비를 해외 제품에 의존하고 있기 때문이다. 또한 국내에서 제작하는 장비라도 주요 기능을 수행하는 칩셋 및 프로그램을 외국기술에 의존하고 있다. 특히, 전기철도는 전력품질(Power Quality)에 매우 취약한 구조적 특징을 지니고 있다. 고속으로 운행하는 전기철도차량과 고전압/전류를 사용하는 전기설비, 그리고 외부 환경적 영향에 취약한 지역적 특성 등이 바로 그 원인이다. 또한 전기철도차량이 운행하는 동안 발생하는 이선으로 발생하는 아크와 고조파로 인해 변전소, 급전선로 등 급전설비에 악영향을 미치고 이는 설비의 수명을 단축시키는 요인으로 작용한다[1].

특히 악영향들 중에서도 집전성능의 개선에는 이선현상을 분석하는 것이 중요하다. 철도차량의 주행속도가 변함에 따라 전차선과 팬터그래프의 접촉력이 변하여, 물리적으로 비접촉이 되는 이선현상이 발생하며 이는 전기철도가 고속화됨에 따라 수반되는 주요 문제점 중 하나이다. 이러한 이선현상은 전차선에서 팬터그래프로 전력을 공급하는 도중에 발생하므로 접촉면에서 아크방전을 일으킨다. 이 때 발생하는 아크는 팬터그래프와 전차선을 마모시켜 파손, 수명단축 등의 물리적 문제뿐만 아니라 철도차량 및 내부 회로에서 전기적인 문제를 발생시킨다[2].

본 논문에서는 급전시스템에서 이선이 발생할 때 철도차량의

입력전원에서 이를 검출하는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 급전시스템 모델링에는 실제 선로의 임피던스를 적용하였으며 철도차량은 동력집중식 철도차량의 성능을 기준으로 모델링을 수행하였다. 또한 이를 통하여 급전시스템과 철도차량을 연계하여 이선 현상을 모델링하였다. 모델링을 통한 철도차량 입력 전압과 전류를 TEO(Teager Energy Operator)와 STFT(Short-Time Fourier Transform)를 이용한 신호처리 기법을 적용하여 이선을 검출하였다.

2. 신호처리 시스템 및 급전시스템

본 논문에서는 급전시스템에서 이선이 발생할 때 철도차량의 입력전원에서 이를 검출하는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 TEO와 STFT를 이용한 신호처리 기법을 적용하였으며, 이선 발생은 실제 선로의 임피던스를 이용한 급전시스템 모델링과 철도차량의 연계를 통하여 모의한 데이터를 반영하였다.

2.1 TEO & STFT에 의한 신호처리기술

2.1.1 TEO 기법

일반적으로 이상적인 전압신호 파형은 외형적으로 순수 정현파의 특성을 지닌다. 하지만 고조파가 발생할 경우 순수 정현파의 파형은 왜곡된다. 이 때 TEO 기법을 이용하면 외형 왜곡이 발생한 순간을 빠르게 인지할 수 있다. 전압신호를 $x(t) = A \cos(\omega t)$ 라고 하면 $x(t)$ 의 TEO, $\Psi[x(t)]$ 는 식 (1)과 같이 정의된다.

† Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea
E-mail: skshin@krii.re.kr

* Korea Railroad Research Institute, Korea

Received : September 28, 2018; Accepted : October 29, 2018

$$\Psi[x(t)] = \dot{x}(t)^2 - x(t)\ddot{x}(t) \quad (1)$$

전압신호의 수학적 표현을 활용하여 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Psi[x(t)] &= (-A\omega\sin(\omega t))^2 \\ &\quad - A\cos(\omega t)(-\omega^2 A\cos(\omega t)) \\ &= A^2\omega^2(\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t)) \\ &= A^2\omega^2 \end{aligned} \quad (2)$$

이산신호에 대한 TEO값은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\Psi[x[n]] = (x[n])^2 - x[n-1]x[n+1] \quad (3)$$

2.1.2 STFT 기법

흔히 사용하는 FFT(Fast Fourier Transform)를 통해 시간영역을 주파수영역으로 변환하였을 때 시간에 대한 정보는 사라지기 때문에, 각 주파수에 해당하는 신호가 어느 시점에서 존재하였는지 확인할 수 없다. 이것을 해결하기 위해 고안된 방법이 STFT로, FFT에 이동윈도우를 적용하여 시간에 따른 주파수 변화를 관찰할 수 있는 시간-주파수 분석법이다.

STFT은 윈도우를 시간에 따라 이동하면서 Fourier Transform을 수행한 것으로, 시간에 따른 주파수 변화를 확인할 수 있다. 식 (4)는 continuous-time에서 슬라이딩 윈도우를 적용한 Fourier Transform을 이용하여 정의한 STFT이다.

$$\begin{aligned} STFTx(t)(\tau, \omega) &\equiv X(\tau, \omega) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau)e^{-j\omega t}dt \end{aligned} \quad (4)$$

$w(t)$ 는 time-window function을 의미한다. 윈도우 사이즈가 클수록 세밀한 주파수영역 관찰이 가능하지만, 시간영역의 정밀함이 떨어진다. 반대로 윈도우 사이즈가 작으면 시간영역의 관찰이 세밀하여 이벤트 발생 감지 성능이 올라가나, 주파수영역의 정밀함이 떨어진다. 따라서 STFT를 적용하는 특성에 맞게 윈도우 크기를 결정해 주어야 한다.

STFT를 digital domain으로 변환하려면 식 (5)와 같이 continuous-time에서 discrete-time으로 바꿔주어야 한다.

$$\begin{aligned} STFTx[n](n,\omega) &\equiv X(n,\omega) \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[n]w[k-n]e^{-j\omega k} \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 교류 AT급전시스템 구성

일반적으로 전기를 에너지원으로 주행하는 철도차량에 교류전력을 공급하기 위한 급전회로는 그림 1과 같이 구성된다.

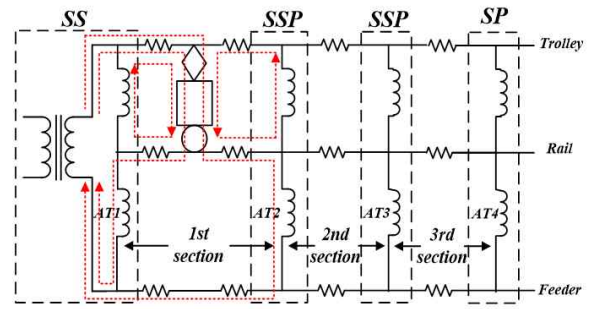


그림 1 전기철도 AT급전시스템

Fig. 1 AT Feeder method of Electric Railway

급전용 전철변전소(SubStation), 급전구간의 구분과 연장을 위하여 개폐장치를 설치한 급전구분소(Sectioning Post), 작업 또는 사고시에 단전.정전구간을 한정하거나 연장급전을 위한 목적으로 보조 급전구분소(SubSectioning Post), 전차선로의 말단에 가공전차선의 전압강하 보상과 유도장치의 경감을 위한 단말 급전구분소(Auto Transformer Post) 등으로 구성되어 있다. 국내에 대부분 적용되고 있는 급전방식은 AT방식으로 단권변압기(Auto Transformer)는 전차선과 급전선에 설치가 되며, 중성점은 레일에 연결이 되고 양단을 전차선과 급전선에 각각 연결되는 급전회로 방식이다. 따라서 전차선은 레일보다 전위가 높으며, 가공 급전선은 레일 및 대지보다 전위가 낮다. AT는 변압기 2차측을 기준으로 전차선과 급전선 사이에 55[kV]를 인가하게 되며, 중성점이 전차선과 레일 사이에 연결되어 있어 27.5[kV] 전압을 인가한다[3]. 한편 전차선로의 특성을 위하여 원주-강릉간의 임피던스 데이터를 반영하였다[3]. 표 1은 전차선 데이터를 나타내었다.

표 1 전차선 데이터

Table 1 Catenary Data

Type		Data
Self Impedance [per Km]	Trolley	0.1960+j0.7353
	Rail	0.1851+j0.6219
	Feeder	0.1782+j0.8672
Scott transformer Secondary-side Voltage [kV]		55
Auto transformer Secondary-side Voltage [kV]		27.5
Auto transformer Leakage reactance		j0.4490

2.3 철도차량의 전력변환장치 구성

동력집중식 전기철도차량의 추진시스템은 크게 AC-DC 컨버터와 3상 DC-AC 인버터로 이루어지며 이를 이용하여 견인전동기를 제어한다. 시뮬레이션에서의 동력집중식 철도차량 모델링은 참고문헌을 참조하여 구성하였다[4].

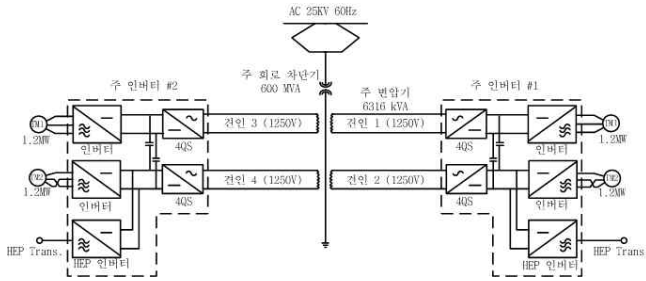


그림 2 동력집중식 철도차량의 주회로도
 Fig. 2 The main circuit for the centralized power railway vehicle

전기철도차량의 구성은 견인전동기의 회생으로 인하여 컨버터와 인버터 모두 양방향 제어가 가능하여야 한다. AC-DC 컨버터는 입력 전압과 전류의 상을 제어하는 PLL(Phase Locked Loop) 기법을 이용하며 3상 인버터는 견인전동기의 제어를 위한 속도제어기를 적용하였다.

3. 전기철도시스템 모델링

전철변전소(SS)는 한전 변전소에서 공급된 154[kV] 전압을 스코트변압기를 통해 55[kV]로 변압하여 M상, T상으로 전압을 공급하도록 모델링하였다 또한 전철변전소(SS), 보조급전구분소(SSP), 급전구분소(SP)의 단권변압기를 모델링하여 상선과 하선에 27.5[kV]를 공급할 수 있도록 하였으며, 전차선로도 상세 모델링하였다.

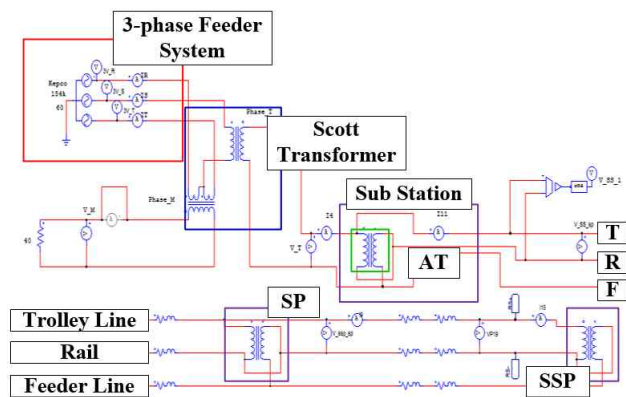
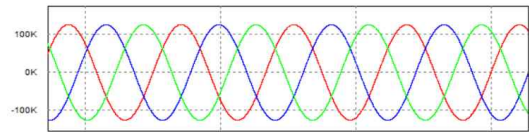


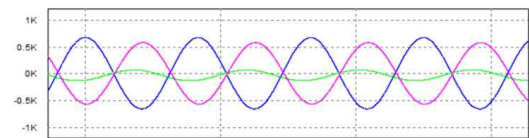
그림 3 AT급전시스템 연계 철도차량 시뮬레이션 회로도
 Fig. 3 Circuit of AT feeder system applied railway vehicle

급전계통방식은 단독급전방식으로 그림 3과 같이 한전변전소의 3상 AC 154[kV] 전압을 수전받아 스코트 변압기를 거쳐 SS-SSP-SP순으로 전력 시뮬레이션 툴인 PSIM를 이용하여 구성하였다. 그림 4(a)는 AC 3상 154[kV]를 전압파형을 나타내었다.

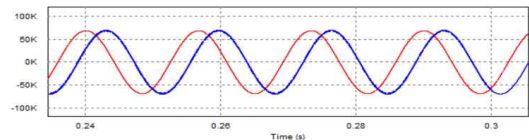
그림 4(b)는 AC 3상 154[kV]의 부하전류를 나타내었는데 T좌에만 철도차량을 적용하여 전류불평이 나는 것을 확인할 수 있으며 이는 철도특성을 반영하여 모델링이 잘 되었다는 것을 확인할 수 있다. 이후 스코트 변압기를 통해 그림4(c)와 같이 전차선과 급전선의 전압은 M좌와 T좌에서 55[kV]를 출력하는 것을 확인할 수 있다.



(a) AC 3상 154[kV] 전압



(b) AC 3상 154[kV] 전류



(c) M/T좌에서 55[kV] 전압

그림 4 급전시스템 모델링 파형

Fig. 4 Feeder system modeling waveform

또한 추진시스템에 대한 모델링은 그림 5에서 AC-DC 컨버터와 3상 DC-AC 인버터가 연결되어 견인전동기를 구동하는 시스템으로 구성하였다. 이션의 경우, UIC 799 OR의 기준은 100[m] 거리 당 이션시간 10[ms]를 넘고 25[ms] 미만의 아크를 이션으로 판단한다[5]. 따라서 본 논문에서는 12[ms]의 이션을 발생시켰다.

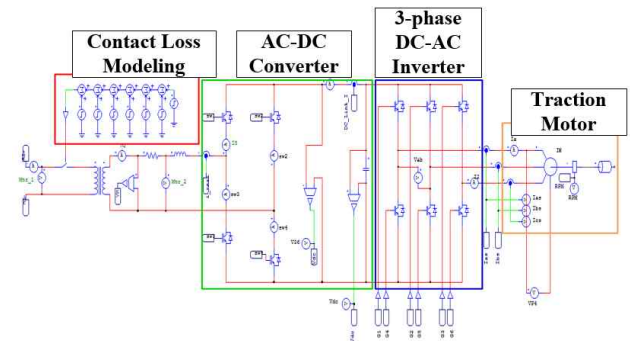


그림 5 AT급전시스템 연계 철도차량 시뮬레이션 회로도

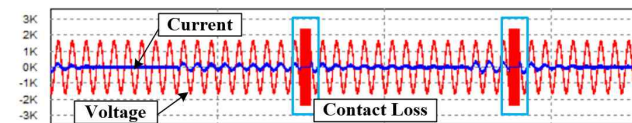
Fig. 5 Circuit of AT feeder system applied railway vehicle

표 2는 시뮬레이션을 위해 사용된 파라미터 값을 보여준다. 컨버터는 PLL제어를 통하여 역률제어를 수행하였고 부하에 관성부하를 사용하여 회생제동이 이루어질 수 있도록 하였다.

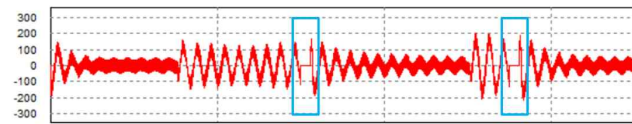
표 2 시뮬레이션에 적용된 파라미터

Table 2 The used simulation Parameter

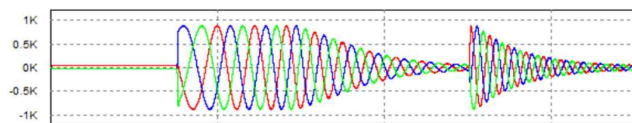
Parameter	Data
Main transformer(Mtr) Primary side voltage	27.5[kV]
Converter input voltage (Mtr 2nd side Voltage)	1,250[V]
Converter output	DC 2400~2600[V]
Traction motor Speed	Maximum 3500[rpm]



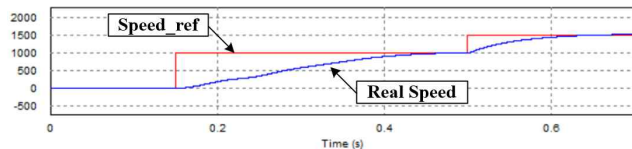
(a) 컨버터 입력전압 및 전류



(b) 컨버터 입력 전류



(c) 3상 DC-AC 인버터 출력 전류



(d) 기준 속도 및 실제 속도

그림 6 급전시스템 모델링 파형

Fig. 6 Feeder system modeling waveform

그림 6은 AT급전시스템을 연계한 철도차량 시뮬레이션 파형을 나타내었다. 그림 6(a)는 기준 속도를 0→1,000→1,500[rpm]으로 지령을 내려 철도차량이 운전할 때의 전압과 전류 파형을 나타내었으며 PLL제어를 통하여 상이 일치하는 역률제어가 이루어져 있음을 확인할 수 있다. 입력 전압은 1,250[V]이며 이선이 발생할 때 이상전압이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 입력 전압의 최대치는 약 2,500[V]로 이선이 발생하지 않을 경우의 입력 전압 약 1,750[V]에 비해 약 750[V] 정도 상승한 것을 확인할

수 있다. 또한 주파수의 경우 약 250[kHz]로 이선이 발생하지 않을 때의 60[Hz]에 비해 약 4,000배 가량 상승하였다. 이는 변압기 누설인덕턴스로 인한 자화현상과 DC-Link에 저장된 전압 이상제어로 인하여 발생하는 현상이다.

또한 그림 6(b)는 입력 전류만 나타낸 파형으로 이선이 부하량에 따라 전류량이 바뀌는 것을 확인할 수 있으며 이선 발생시 전류가 0이 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 6(c)는 3상 DC-AC 인버터 출력 전류이며 그림 6(d)의 실제 속도가 증가할 때 전류가 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 6(d)에서는 속도제어에 따라 기준 속도가 실제 속도에 잘 추종하는 것을 확인할 수 있어 철도차량 모델링이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.

4. 신호처리 시뮬레이션

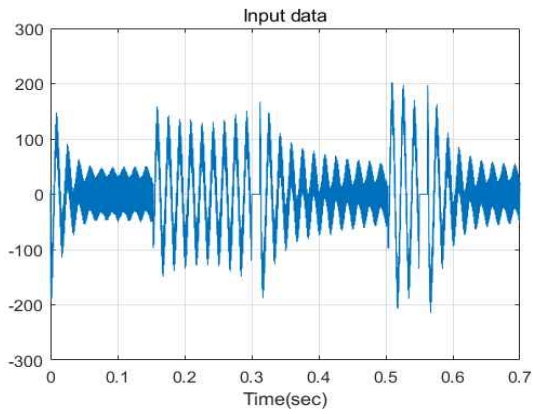
신호처리 시뮬레이션은 TEO와 STFT 기법을 이용하여 수행하였다. 시뮬레이션 툴은 Mathlab을 이용했으며 철도차량모델링 제어의 결과로 나온 컨버터 입력 전압과 전류를 이용하여 이선을 검증하였다.

4.1 컨버터 입력전류 신호처리 시뮬레이션 결과 분석

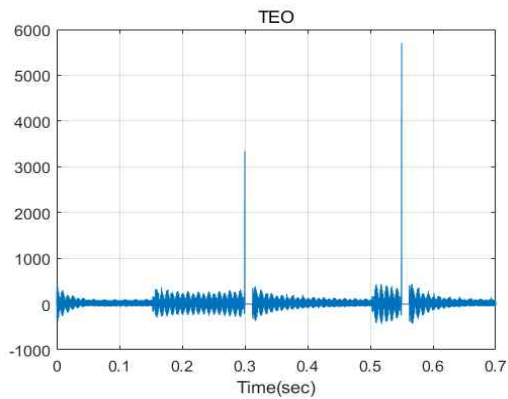
그림 7은 컨버터 입력전류 TEO&STFT 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림 7(a)은 컨버터 입력전류를 나타내었으며 0.3[s], 0.55[s]에서 각각 이선이 발생하여 12[ms] 지속되는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 이를 TEO 연산을 한 결과이며 0.3[s]와 0.55[s]에서 이선이 시작될 때 높은 각각 약 3,300, 5,800 정도로 1000미만의 다른 수치보다 훨씬 높은 값이 나오는 것을 확인할 수 있다. TEO의 수치는 상대적인 것으로 절대적인 값이 중요하지 않으며 이선이 발생하는 시점의 값이 급격히 변하므로 해당 시간을 정확하게 알 수 있다. 그림 7(c)는 그림 7(a)의 입력데이터를 STFT 처리를 한 결과이며 제어에 따른 전류의 노이즈 발생으로 이선이 발생하는 시점과 주파수를 정확히 확인할 수 없었다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 다음에서 입력전압의 신호처리 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 확인하였다.

4.2 컨버터 입력전압 신호처리 시뮬레이션 결과 분석

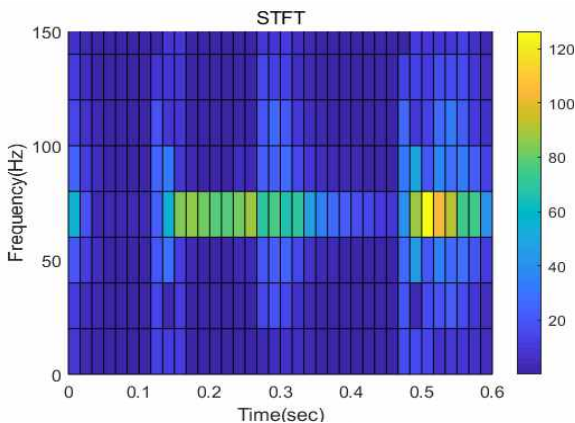
그림 8은 컨버터 입력전압 TEO와 STFT 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림 8(a)은 컨버터 입력전압을 나타내었으며 그림 8(a)의 입력전류 데이터와 마찬가지로 0.3[s], 0.55[s]에서 각각 이선이 발생하여 12[ms] 지속되는 것을 확인할 수 있다. 이선이 발생할 때 이상 과전압이 발생하는데 이는 입력전압에 이상이 생겨 제어가 정확히 동작하지 않기 때문에 발생하는 현상이다. 그림 8(b)는 이를 TEO 연산을 한 결과이며 0.3[s]와 0.55[s]에서 이선이 시작될 때 높은 각각 12,000,000 정도로 2,000,000 미만의 다른 수치보다 훨씬 높은 값이 나오는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 입력전압 분석에서와 마찬가지로 이선이 발생하는 시점의 값이 급격히 변하므로 해당 시간을 정확하게 알 수 있다.



(a) 컨버터 입력전류



(b) 컨버터 입력전류 TEO 결과 파형

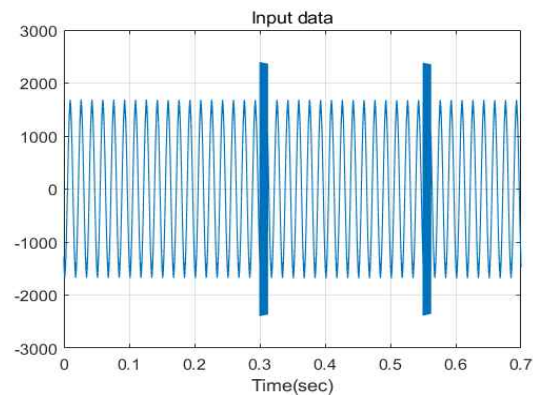


(c) 컨버터 입력전류 STFT 결과 파형

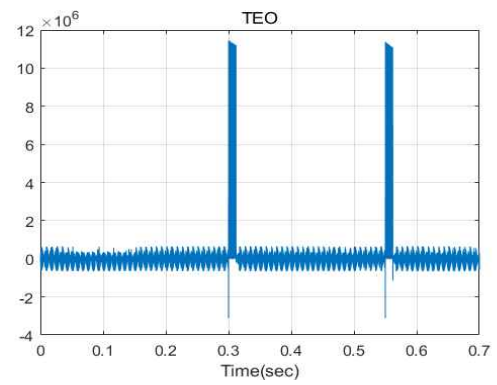
그림 7 컨버터 입력전류 TEO&STFT 시뮬레이션

Fig. 7 Converter input current TEO&STFT simulation

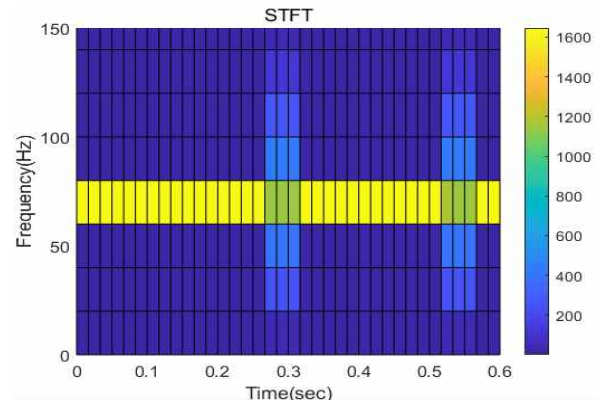
그림 8(c)는 그림 8(a)의 입력데이터를 STFT 처리를 한 결과이며 이선이 발생하는 시점과 주파수를 입력전류 보다는 정확히 확인할 수 있다. STFT 윈도우 크기에 따라 주파수와 시간의 정확도가 다르게 변하며, 시간이 정확해지면 주파수가 부정확해진다. 시간을 더욱 정확하게 측정하기 위하여 주파수 대역의 1 sampling 범위가 넓어졌지만 60[Hz]에서 동작을 하다 0.3[s]와



(a) 컨버터 입력전압



(b) 컨버터 입력전압 TEO 결과 파형



(c) 컨버터 입력전압 STFT 결과 파형

그림 8 컨버터 입력전압 TEO&STFT 시뮬레이션

Fig. 8 Converter input voltage TEO&STFT simulation

0.55[s] 부근에 이상 신호가 발생하여 이상 주파수가 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한 전압의 크기도 약 1,650[V] 정도로 원래 1,750[V]에 비하여 약 6%의 오차가 있음을 확인하였다. 0.3[s]에서 2 sampling 전에서 이상신호가 검지된 것을 확인할 수 있는데 이는 STFT 윈도우 크기와 실제 전압 사이에 측정 오차로 볼 수 있다. 하지만 TEO로 정확한 시간을 측정할 수 있

기 때문에 이를 이용하여 시간을 정확하게 측정하고 STFT를 이용하여 주파수나 크기 특성을 확인하는 것이 좋다고 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 강체전차선로의 임피던스를 적용한 급전시스템에서 이선에 따른 철도차량의 전력변환장치의 특성을 모델링하였다. 이를 TEO와 STFT를 이용하여 신호처리를 하였으며 그 특성을 분석하였다.

본 논문의 결과는 다음과 같다. 입력 전압에 TEO 신호처리 기법을 적용하면 이선이 발생하는 정확한 시점을 확인할 수 있고 STFT를 이용하면 이선이 발생하는 시점의 주파수나 크기 변화에 대한 정보를 확인할 수 있다. 또한 입력전류보다는 입력전압을 적용하는 것이 주파수나 크기를 더 정확하게 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- [1] Jo, Han-Bum, "A Study on the Improvement of Overhead Rigid Conductor Line of Electric Railway for Speed-up, master's thesis", *Seoul National University of science and technology*, 2011
- [2] Park, Young et al, "On the Implementation of an Advanced Judgement Algorithm for Contact Loss of Catenary System", *KIEE*, Vol. 63, No. 6, pp. 850-854, 2014.
- [3] Jung, No-Geon, "The Analysis of Short Current on Actual System through Power Analysis of AT Feeder System for Electric Railway," *KIEE*, Vol. 63, No. 11, pp. 1582-1587, 2014
- [4] No-Geon Jung, Jae-Moon kim et al, "Response Characteristic Analysis using Modeling of Propulsion System for 8200 Electric Locomotive", *The Transactions of KIEE*, Vol 62, No. 11, pp. 1640-1646, 2013.
- [5] UIC 799 OR, 2002

저 자 소 개



정 노 건 (No-Geon Jung)

2012년 한국철도대 철도차량전기와 졸업.
2015년 한국교통대 교통대학원 교통시스템 공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 교통시스템공학과 박사과정



박 철 민 (Chul-min Park)

2004년 성균관대 전기전자컴퓨터공학부 졸업(공학석사), 2016 한국교통대학교 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 선임연구원



이 재 범 (Jae-Bum Lee)

2010년 고려대 전기전자전파공학부 졸업(학사), 2016년 한국과학기술원 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 선임연구원



박 영 (Young Park)

2000년 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학석사), 2004년 동대학원 동학과 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 책임연구원, 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학과 교수



신 승 권 (Seung-kwon Shin)

1972년 6월생, 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2003년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원

Tel : 031-460-5684

E-mail : skshin@krii.re.kr