Regular Paper Best Paper
J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 32, No. 1, pp. 1-5 January 2019
DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.1.1
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

호남고속철도 전차선로의 이상 상태 분석

전재근[1], 신승권[2], 정호성[2], 나경민[2,3], 박 영[2,3]

[1] 우송대학교 철도시스템학과
[2] 한국철도기술연구원 스마트전기신호본부
[3] 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학과

Analysis for Catenary System with Focus on Abnomal Conditions on Honam High Speed Line

Jaegeun Jun[1], Seungkwon Shin[2], Hosung Jung[2], Kyungmin Na[2,3], and Young Park[2,3]

[1] Department of Railway System Engineering, Woosong University, Daejeon 34606, Korea
[2] Smart Electrical & Signaling Division, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 16105, Korea
[3] Department of Railway System Engineering, University of Science & Techology, Daejeon 34113, Korea

(Received September 28, 2018; Revised October 2, 2018; Accepted October 2, 2018)

Abstract: The overhead contact line (OCL) is a key piece of equipment for transmitting electrical energy to the pantograph of rail cars. Recently, a 400 km/h OCL was applied to the Honam high-speed line, and its performance was examined by running HEMU-430X. For the study, we analyzed the current of catenary wire concurrently while running HEMU-430X in the Honam high-speed line. Specifically, this study recorded the currents for each speed during operation of the railway vehicle. The analysis of the frequency of line current showed generation of third-harmonics, 15th-harmonics, 17th-harmonics, and 19th-harmonics. The current of catenary wire is a basic technology assessment used to determine the electrical safety of electric railway systems, and it can be used as a technology for analyzing circulating currents generated in the current configuration, as well as for analyzing electric fatigue of the OCL components.

Keywords: Catenary system, Contact wire, Current ratio between contact and catenary wire

1. 서 론

전철설비는 전기적으로 차량과 연계되어 전기에너지를 공급하는 전기철도의 핵심장치이다 [1]. 전철설비 중 전차선은 차량의 팬터그래프와 연결되어 전기에너지를 안정적으로 전달하기 위해 급전선, 조가선, 드로퍼, 가동브라켓 등 다양한 설비 부품과 전기적으로 연결되어 있다 [2]. 차량의 속도가 증가하면서 팬터그래프와 전차선로 간의 안정적인 접촉을 위해 높은 장력이 필요하며 이를 위해 호남고속철도 일부 구간을 400 km/h로 증가시키기 위해 장력을 34 kN으로 향상시켰다 [3]. 이와 같이 전차선의 기계적 특성을 향상시킴으로써 안정적인 집전상태를 유지하기 위한 설비 부품은 개발되고 있으나 전차선로의 전기적 특성을 향상하기 위한 연구는 보고되지 않고 있다. 특히 전차선과 조가

✉ **Young Park; ypark@krri.re.kr**

Copyright ©2019 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

선의 전류와 전압에 대한 파형 분석을 통한 전기적 특성과 안전성은 일부 검측기술에 대해서만 보고되어 있다 [4]. 전차선은 기계적으로 팬터그래프와 접촉하게 되므로 전류 검출이 어렵고 5 m 이상의 높이에서 검측되므로 무선기반의 검측기술이 적용되어야 한다 [5]. 본 연구는 경부고속철도 2단계에서 전차선과 조가선의 전류를 검측하여 발표한 결과를 기반으로 호남고속철도의 조가선 전류를 분석하여 전차선로 이상상태를 확인하였다. 전차선로의 전류는 전철설비의 전기적 안정성을 판단하는 기초기술로 현재 발생되는 순환전류, 전차선로 부품의 전기적 피로를 분석할 수 있는 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 호남고속철도의 조가선 전류 시험 방법

전차선로의 전류는 차량운행 중 전차선과 팬터그래프의 접촉과 무관하게 그림 1과 같이 5 m 이상의 높이에서 검측된다. 본 논문에서 사용한 전차선로 검측장치는 전류 측정을 위해 전류센서를 전차선과 조가선에 각각 연결하고 이를 무선기반의 상태 모니터링 장치를 이용하여 검측하도록 하였다. 그림 1은 호남고속철도 전차선로에 설치된 무선기반의 전류 상태 모니터링 시스템 사진이며 그림 1(a)에서와 같이 전차선로 가동브라켓에 고정한 가압부 측정장치가 전류를 검측하여 2.4 GHz의 무선통신을 통해 지상부 측정장치에 전송하여 모니터링이 가능하도록 구성하였다. 가압부 측정장치는 배터리를 이용하여 전원을 공급받고 전류센서는 ±500 A가 측정되도록 구성하였다. 지상부 측정장치는 태양광을 이용하여 전원을 공급받으며 속도 측정, 전차선의 전류 측정값을 수신하는 서버로 구성하였다. 전차선과 조가선의 전류 검측은 오버랩 구간에서 전차선과 조가선에 전류센서를 각각 연결하고 팬터그래프 운행에 따른 기계적 접촉에 이상이 없도록 하였다. 그림 1(b)는 전류 모니터링 프로그램 사진이며 파형을 통해 이상상태를 모니터링하도록 구성하였다. 본 검측장치는 기존의 전차선로 압상량 검측장치와 같은 구조로 구성하였으며 전차선 압상량 검측장치의 경우 이전 논문에 세부적인 구성방법을 나타낸 바 있다 [6].

(a)

(b)

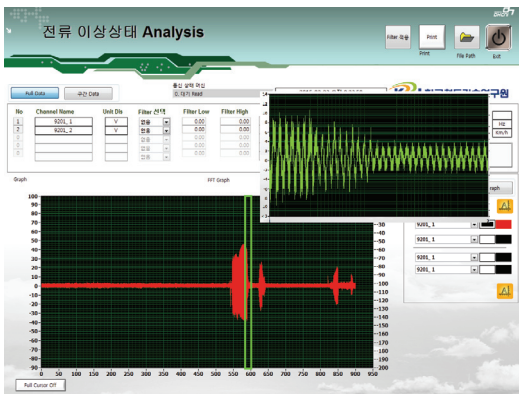

Fig. 1. Picture of current monitoring system, (a) installation of current monitoring system on OCL (overhead contact line) in Honam high-speed line and (b) program for analysis of current.

2.2 호남고속철도의 전류 용량 분석

호남고속철도는 속도 향상을 위해 350 km/h급과 400 km/h급의 전차선로를 각각 설치하였다. 350 km/h급 전차선로는 CuSn150 전차선을 사용하여 장력 26 kN을 유지하도록 설계되어 있다. 400 km/h급 전차선로는 속도 향상 350 km/h과 400 km/h 구간 모두 CuMg116을 사용하도록 설계되었다. 그림 2는 호남고속철도의 익산과 정읍 간 토공구간 장주도를 나

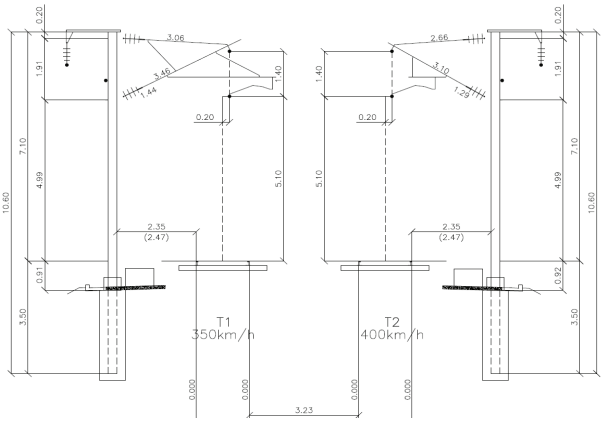

Fig. 2. Infrastructure gauge of Honam high-speed line from Iksan to Jungub.

타내었다. 그림 2에서와 같이 하선과 상선에서 각각의 속도로 설계되어 건설되었다. 표 1은 전차선과 조가선의 설계사양을 나타내었으며 400 km/h급에서 장력이 증가되어 설계된다. 전차선과 조가선의 전류분배는 임피선스와 전류의 관계식을 이용하여 나타낼 수 있다.

특히 전차선과 조가선의 자기 임피던스 및 상호 임피던스를 각각 고려하여 구하는 것이 일반적이다. 이때 전차선로의 자기 임피던스 및 상호 임피던스는 식 (1)의 칼슨-폴라첵을 이용하여 계산된다. 조가선 검측 구간의 전차선과 조가선의 전류비를 계산하기 위해 전선의 자기 임피던스 및 각 선 간의 상호 임피던스를 식 (1)을 이용하여 나타내었다 [7].

전차선 자기 임피던스(Z_T, Cu 150 ㎟)는 식 (1)과 같이 계산되며, 이때 전차선의 내부 임피던스와 외부 임피던스 Z_{Ti} = 0.1173 + j0.0188 Ω/km 및 Z_{To} = 0.0584 + j0.8857 Ω/km이다.

$$Z_T = Z_{Ti} + Z_{To} = 0.1757 + j0.9046\ \Omega/\mathrm{km} \quad (1)$$

또한 조가선의 자기 임피던스(Z_M, Bz 65 ㎟)는 식 (3)에 의해 계산할 수 있다. 여기서, 등가 높이는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$Z_T = Z_{Ti} + Z_{To} = 0.1757 + j0.9046\ \Omega/\mathrm{km} \quad (2)$$

(W: 무게, L: 경간 길이(50 m), T: 장력)

이때 조가선의 내부 임피던스와 외부 임피던스는 각각 Z_{Mi} = 0.4474 + j0.0188 Ω/km 및 Z_{Mo} = 0.0582 + j0.9054 Ω/km이다.

Table. 1. Physical properties of overhead contact wire and catenary wire.

Section	Contact wire			Messenger wire	
Speed	350 km/h	400 km/h		350 km/h	400 km/h
Standard type	CuSn150	CuMg 150		CuMg116	CuMg116
		New	15% Wear		
Diameter [mm]	14.50	14.50	13.5	14.00	14.00
Resistance [Ω/km]	0.165	0.169	0.19822	0.216	0.216
Height [m]	5.10	5.10	5.10	6.50	6.50
Tension [kN]	26	34	34	20	23
Weight [kg/m]	1.334	1.334	1.1339	1.050	1.050

$$Z_M = Z_{Mi} + Z_{Mo} = 0.5056 + j0.9243\ \Omega/\mathrm{km} \quad (3)$$

또한, 조가선의 높이(h_M) = 6.39 m이고 전차선의 높이(h_T) = 5.08 m이며 두선의 수평거리(b) = 0 m일 때, 전차선과 조가선의 상호 임피던스(Z_{TM})는 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$Z_{TM} = 0.0583 + j0.4900\ \Omega/\mathrm{km} \quad (4)$$

전차선과 조가선에 흐르는 전류비를 예측하기 위해서 단위길이당 전압강하가 동일한 특성을 이용하였다. 전차선 전압강하와 조가선 전압강하가 동일하므로 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있으며 전차선과 조가선에 흐르는 전류를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 전차선과 조가선의 전류비는 식 (8)에 나타내었다.

$$V_T = V = Z_T I_T + Z_{TM} I_M \quad (5)$$

$$V_M = V = Z_{TM} I_T + Z_M I_M \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} I_T \\ I_M \end{bmatrix} = (1/Z_T Z_M - Z_{TM}^2) \begin{bmatrix} Z_M & -Z_{TM} \\ -Z_{TM} & Z_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} I_T : I_M &= (Z_T - Z_{TM})/(Z_T Z_M - Z_{TM}^2) : \\ &\quad (Z_T - Z_{TM})/(Z_T Z_M - Z_{TM}^2) \\ &\approx 0.8206 : 0.5671 \fallingdotseq 59.1 : 40.9\,[\%] \end{aligned} \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 호남고속철도 전차선로의 전류 검측 결과

전차선로는 차량의 팬터그래프에 전기적·기계적 접촉에 의해 전기에너지를 전달하며 기계적 비접촉에 따라 이선아크가 발생된다. 이선아크의 경우 100 μs 이상의 아크를 일반적으로 검측하므로 본 논문에서는 10 kHz의 검측속도로 전차선로의 전류를 측정하였다. 검측구간은 호남고속철도 익산역과 정읍역 사이로 측정구간에 HEMU-430X 차량의 통과 전후의 전류를 검측하여 분석하였다. 그림 3은 호남고속철도 전차선로의 전류 파형이며 그림 3(a)부터 그림(d)까지 검측지점의 열차 통과 속도가 159 km/h, 290 km/h, 349 km/h, 370 km/h에서 열차 통과 지점 기준 15초 그래프의 전류 파형을 나타내었다. 열차 통과 시 15초 그래프 중 2초 동안의 류 파형을 그림 3(a)부터 (d)까지 각 그림 아래에 나타내었다. 그림 3에서와 같이 전류 파형은 일정하지만 미세한 전류 파형의 변화를 나타내었다. 전류 파형은 열차속도가 증가할수록 전차선과 팬터그래프 간 이선으로부터 전류의 변화가 나타나며 속도의 증가에 따라 변동률이 커지는 것은 집전성능의 영향에 의해 나타나는 것으로 사료된다. 그림 4(a)는 호남고속철도 익산역과 정읍역간의 측정구간 전류 파형이며 그림 4(b)는 주파수 분석을 나타내었으며 전차선 전류의 주파수 분석 결과 제3고조파, 15고조파, 17고조파, 19고조파가 발생되었다.

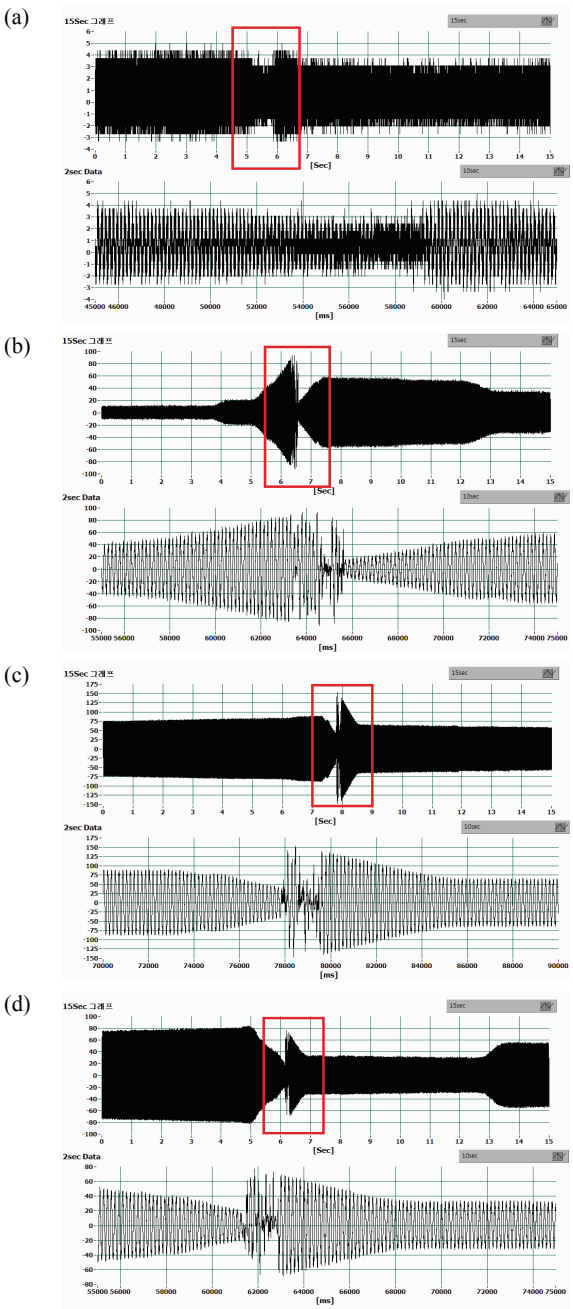

Fig. 3. Results of current wave from between contact and catenary wire of HEMU-430X on Honam HSR, (a) 159 km/h, (b) 290 km/h, (c) 349 km/h, and (d) 370 km/h.

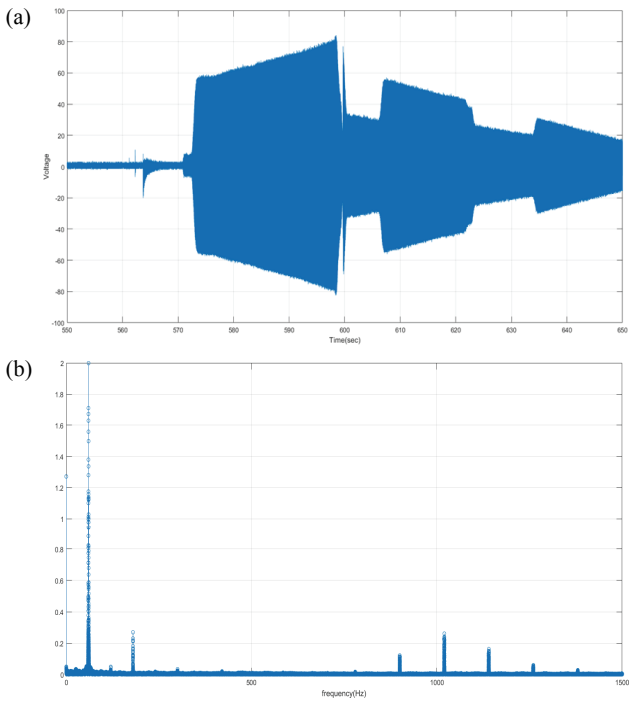

Fig. 4. Results of current analysis of catenary system on Honam HSR line, (a) current wave and (b) frequency analysis.

4. 결 론

본 논문에서는 호남고속철도 HEMU-430X 운행에 따른 호남고속철도 익산역과 정읍역 구간 전차선로의 전류를 실시간으로 검측하였다. 또한 전차선과 조가선의 전류 용량을 분석하기 위해 전선의 자기 임피던스 및 각 선 간의 상호 임피던스를 칼슨-폴라첵 계산식을 이용하여 각 59.1 : 40.9%의 전류비를 나타내었다. 호남고속철도 전차선로에서 HEMU-430X 운행 중 검측지점의 통과속도가 159 km/h, 290 km/h, 349 km/h, 370 km/h인 경우 통과 전후의 15초 전류는 열차의 속도가 증가할수록 전류의 변동률이 상승하는 것으로 분석되었다. 본 논문에서 제안한 전기철도 차량 운행에 따른 전차선로 전류측정 결과는 팬터그래프와 전차선간의 비접촉에 의해 나타나는 이선아크, 순환전류, 팬터그래프의 집전장치 이상상태 등 전기적 특성 분석이 가능 할 것으로 사료된다.

ORCID

Young Park https://orcid.org/0000-0002-9825-0424

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] Y. S. Park, K. M. Na, and Y. Park, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **67**, 976 (2018). [DOI: https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.7.976]

[2] Y. Park, K. Lee, S. Y. Park, J. Y. Park, and W. S. Choi, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **64**, 1406 (2015). [DOI: https://doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.9.1406]

[3] Y. H. Cho, K. Lee, S. Y. Kwon, and H. R. Cho, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **64**, 1789 (2015). [DOI: https://doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.12.1789]

[4] Y. Park, S. K. Shin, K. Lee, J. Kim, and W. Kim, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **62**, 573 (2013). [DOI: https://doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.4.573]

[5] Y. Park, Y. H. Cho, K. W. Lee, H. J. Kim, and I. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **22**, 864 (2009). [DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2009.22.10.864]

[6] J. H. Kim, J. G. Lee, K. S. Lee, W. Rhee, and H. B. Lee, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **62**, 6 (2013). [DOI: https://doi.org/10.5370/KIEEP.2013.62.1.006]

[7] Y. Park, H. Jung, and K. Lee, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **62**, 1465 (2013). [DOI: https://doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.10.1465]