

전철시스템에서 전차선로와 통신선로간 유도전압의 해석

* 송진호 *** 이형수 *** 유근배 **** 창상훈
 세종기술(주) 한국산업안전공단 철도청 철도기술연구원

COMPUTATION OF INDUCTIVE COUPLING BETWEEN ELECTRIFIED RAILWAYS AND COMMUNICATION CABLES

* Jin-ho Song ***Hyung-soo Lee ***Keun-bai Ryu **** Sang-hoon Chang
 Sejong Engineering Co. ***Korea Industrial Safety Corporation
 Korea National Railroad *Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper present a study on the interference levels on the communication lines, which are parallel to the electrified rails. The interference study is carried out using a circuit model approach. First, the self and shunt impedances of all the conductors in the rail system and the mutual impedances between different conductors are computed. Several different scenarios are analyzed, including the load condition and a few fault conditions with different fault locations. The induced potentials on the communication cables are computed. The effect of the buried ground wires is also analyzed by comparing the results with and without the presence of the ground wires. The results presented in the paper can be used as a reference for estimating interference levels in similar rail systems.

지선과 통신선)의 자기 임피던스와 상호 임피던스를 구하였다. 이를 토대로 전철 운행의 정상상태와 위치가 각각 다른 고장상태를 상정하여 통신선로에 유도되는 전압을 계산하였으며 이 때 매설접지선의 설치 유무에 따른 영향을 비교하였다.

1. 서 론

전기철도는 대량수송이 가능하고 환경 친화적이면서 안전성과 신속성 등의 장점이 있기 때문에 우리 나라에서 앞으로 신설은 물론 기존 철도의 많은 구간이 전철화될 것으로 예상된다. 이러한 추세와 함께 기존의 전기철도 시스템에 적용해 온 제반 기술적 문제에 대한 검토가 이루어지고 있다.

특히, 전철시스템에서 통신·신호 선로와 같이 레일과 병행하는 회로에는 유도성과 전도성 커플링에 의한 영향이 발생하여 통신·신호기에 손상을 주거나 인명에 감전의 위험을 초래하게 된다. CCITT(국제전신전화자문위원회)가 규정한 기준은 정상상태에서 60V 이하, 고장상태에서 650V 이하이다. 이러한 영향을 기준치 이하로 완화시키기 위해서 새로운 방식의 접지시스템 구축이 검토되고 있는데, 이것은 등전위 접지망을 형성하도록 레일과 병행하여 접지선을 매설하고 이를 가공 보호선, 금속 구조물 등과 연결하는 것이다. 본 논문에서는 기존의 접지방식과 새로운 방식을 각각 적용하여 통신·신호 선로에 미치는 영향을 정량적으로 비교 해석하고자 하였다.

해석대상 전기철도는 전철화 대상구간인 충북선(초치원~봉양간) 상하행선 110 km의 급전구간으로 4개소의 전철변전소와 13개의 단상 변압기(AT)의 급전시스템으로 전력이 공급되고 있다. 각 선로는 급전선, 전차선, 보호선과 매설접지선으로 구성되어 있으며 통신선로가 레일과 병행하여 설치되어 있다.

본 논문에서는 상기한 영향을 해석하기 위하여 회로모델 해석법(Circuit model approach)을 사용하였다. 먼저, 전철시스템을 나타내는 전철 변전소와 단상 변압기를 포함한 급전계통의 등가회로를 구한 후 이 시스템을 구성하는 모든 도체들(급전선, 전차선, 보호선, 매설접

2. 유도전압 해석 모델

2.1 전철급전 계통 등가회로 구성

그림 1은 AT급전방식(2×25kV AT) 및 급전선로의 구성방식을 회로모델로 표현한 것이다. 상하선의 전차선, 레일, 급전선, 매설지선, 보호선 및 신호·통신케이블로 구성되어 있으며, 변전소 매시접지와 레일 및 보호도체는 모두 매설지선과 접속되어 있다. 급전계통의 전압은 전차선과 레일간에 25kV, 급전선과 레일 사이에 25 kV를 인가되어 전체적으로는 전차선과 급전선간에 50 kV의 전압이 걸리게 되나, 안정적인 견인력 유지를 감안하여 실제 시뮬레이션에서는 25kV를 27.5kV로 모의하였다. 전력공급은 중평변전소, 충주변전소에서 이루어지며, 각 구분소, 보조구분소 마다 AT가 설치되어 있는데, 음성SP를 기준으로 전기적으로 구분하여 운전된다. 즉, 오송SSP~음성SP 구간은 중평변전소로부터, 음성SP~봉양SP 구간은 충주변전소로부터 전원공급이 이루어진다.

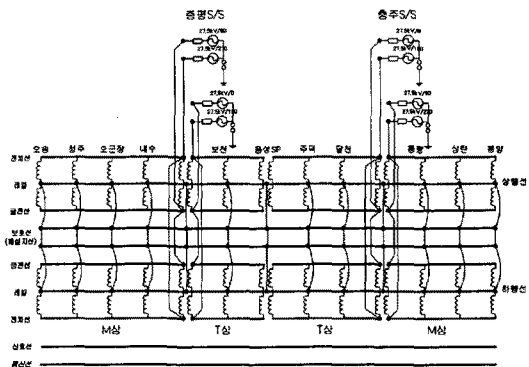


그림 1. 전철 급전계통 등가회로

2.2 급전선로 모델

2.2.1 급전회로 도체 파라미터

급전회로를 구성하는 전차선로 도체는 급전선, 전차선, 조가선, 레일, 매설지선, 신호 및 통신 케이블이며 각 도체의 굵기는 표 1과 같다. 그림 2는 전차선로 도체 배치 단면도를 나타낸 것이다.

표 1 전차선로 도체 데이터

도체	재질	단면적(mm ²)
급전선	ACSR	160
조가선	MgSnCu	80
전차선	ACSR	110
보호도체	Cu	90
레일	50kgN	80
매설지선		80

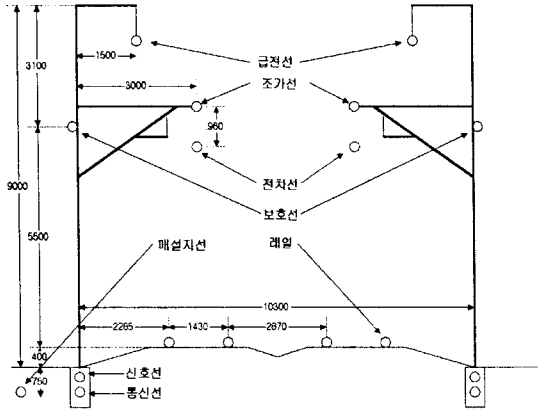


그림 2. 전차선로 도체 배치도

2.2.2 레일과 매설지선

그림 1에서 제시한 회로모델을 완성하기 위하여, 상기에 제시한 선로정수 외에 레일과 매설지선의 누설 콘덕턴스(또는 저항)를 구하여야 한다. 그러나, 누설 콘덕턴스는 선로 주변의 토양구성과 주변환경의 영향을 많이 받으며 노반의 종류, 침목의 종류, 기온, 습도 및 기후에 따라 매우 큰 변화폭(0.1~100 [Ω/km])을 갖는다[1].

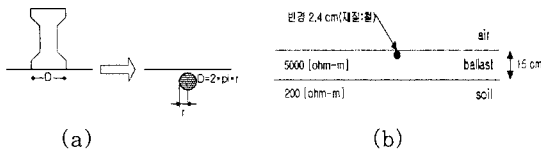


그림 3. 레일 누설저항 계산 모델

여기서는 다층토양 내에 매설된 충전된 도체의 응답특성을 시뮬레이션할 수 있는 해석프로그램인 MALZ[2]를 이용하여 매설지선 및 레일의 누설콘덕턴스를 계산하였는데, 그림 3에서 보는 바와 같이 수평 2층 등가 토양 모델을 가정하였다. 레일은 지상에 노출되어 있는 부분을 제외하고 자갈층에 매설되어 있는 부분만 계산하여 2.5 cm의 도체로 등가화 하여 계산하였다. 이 때 반경 레일도체의 전기적 특성은 철과 같다(ex. 구리(Cu)에 대한 비저항률이 17, 구리에 대한 비투자율이 250)고 가정하였다. 자갈층의 대지저항은 5000[Ω·m]이고, 대지저항률은 200 [Ω·m]을 가정하였다. 매설지선의 누설콘덕턴스를 계산할 때 그림 3의 자갈층이 없는 200 [Ω·m]의 균일 토양모델을 사용하였고 매설깊이는 0.9 m로 가정하였다. 시뮬레이션 결과, 레일과 매설지선의 누설임피던스(저항)는 각각 3.54 [Ω/km], 0.74 [Ω/km]이다.

3. 시뮬레이션

3.1 정상 운전시 전철부하 시나리오

그림 4는 정상 운전중인 전철부하 시나리오를 나타내고 있다. 전철은 7800 [kW]의 정전력부하(열차종류 : 화물, 기관차 : 8004호, 열차편성 : 2P + 40T)로 가정하였으며, 정전력부하를 유지하도록 전차선과 레일간의 임피던스(약 97 [Ω]) $\approx E^2/P = (27.5 \text{ kV})^2 / 7800 \text{ kW}$ 로 표현하였다. 전철은 충주변전소 T상 급전구역인 음성SP~주덕SSP 10.5 km 구간에 위치하는 것으로 가정하였으며, 충주변전소로부터 거리는 약 13~23 km 이다. 그림에서 괄호안의 숫자는 색선번호를 나타낸다.

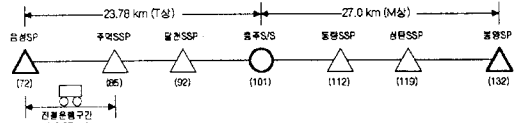


그림 4. 전철운행구간

3.2 단락사고 시나리오

전차선과 레일간 단락사고 시나리오는 그림 5와 같은 경우 즉, 전원공급원인 증평변전소로부터 먼 지점에서 단락사고가 난 경우(고장점-1)와 전원단과 가까운 곳(고장점-2)에서 사고가 난 경우를 가정하였다. 사고는 모두 신호선과 가까운 상행선에서 발생한다.

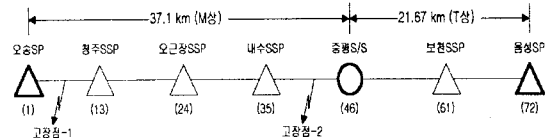


그림 5. 전차선-레일간 단락사고

4. 모의 결과

4.1 전철부하시 전차선/레일전압 해석결과

7800 [kW]의 전철부하가 음성SP와 주덕SSP 사이 구간에 위치했을 때의 전차선 전압과 레일전압 계산결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 매설지선이 있는 경우와 없는 경우를 비교한 결과, 전차선 전압은 큰 차이를 보이지 않으나, 레일전압은 매설지선이 없는 경우가 높은 것으로 나타났다. 이러한 레일전압은 전차선 전류(부하전류)를 반영하는 값으로, 열차가 두 AT의 정 가운데에 위치했을 때 열차에서 바라본 열차의 양쪽 전차선 또는 레일의 병렬임피던스가 가장 작으므로 정전력을 유지하기 위하여 열차임피던스는 작아지고 열차전류(부하전류)는 커지는 데 따른 현상이다. 이와 같은 전차위치에 따른 전차선과 레일전압 변화경향은 참고문헌 [5], [9] 및 [10]의 AT방식 전철계통의 모의결과와도 잘 일치하였다.

전차선 전압의 경우(그림 6), 전원단인 충주변전소에 가까이 위치할수록 높으며, 멀어질수록 낮아진다. 그러나, 레일전압(그림 7)은 전원단과의 거리에 상관없이 AT에 가까울수록 낮고, 멀어질수록 높아지며 매설지선이 없는 경우는 이러한 경향이 더욱 두드러졌다.

그림 9는 그림 8과 같은 전철부하에서 가공보호지선이 있는 경우에 열차위치에 따른 전차선 전류의 크기를 나타낸 것이다. 전원단인 충주변전소에 가까운 주덕SSP

에 열차가 가까울수록 주덕SSP 쪽으로부터 공급되는 전차선 전류가 커지며, 반대로 충주변전소에서 멀어질수록 이 전류는 작아지는 대신 음성SP 방향에서 공급되는 전류는 커져, 부하전류는 약 290[A] 정도로 유지되었다.

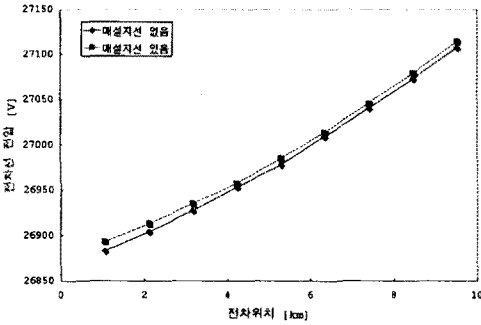


그림 5. 음성SP로부터의 거리에 따른 전차선전압

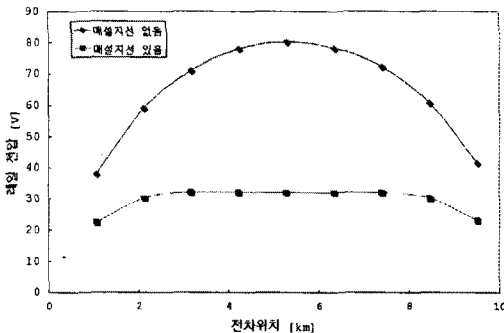


그림 7. 음성SP로부터의 거리에 따른 레일전압

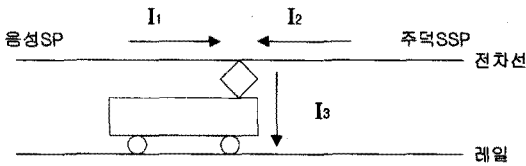


그림 8. 전철부하

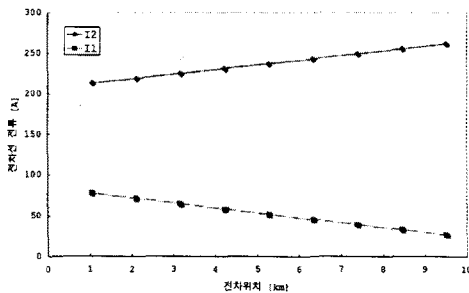


그림 9. 음성SP로부터 거리에 따른 전차선 전류

4.2 전차선-레일간 단락사고시 해석결과

고장점에 따른 고장전류의 크기와 레일전압을 계산한 결과를 표 2에 요약하였다. 앞에서 전차선-레일간 단락사고시 고장전류 분포에서 알 수 있듯이 전원단인 충주변전소에서 가까운 곳에서 사고가 발생한 경우가, 그렇지

않은 경우에 비하여 고장전류, 즉 전차선과 레일간 단락 전류가 2배 이상 크다. 그러나 대지와 접하고 있는 레일 또는 매설지선의 누설콘덕턴스, 즉 접지저항 또는 대지 귀로 임피던스는 계통임피던스에 비하여 매우 작으므로 매설지선의 있고 없음에 따른 단락시 고장전류 크기는 별 차이가 없음을 알 수 있다. 레일 또는 매설지선을 통하여 대지로 전류가 누설될 때의 접지전위, 즉 레일전위는 매설지선이 있는 경우가, 매설지선이 없는 경우에 비하여 절반정도 낮은 것으로 계산되었다.

표 2. 고장전류, 레일전압 및 스트레스 전압 비교

시뮬레이션 조건		고장전류	레일전압	Stress Voltage
매설지선有	고장점-1 (오송SP-청주SSP)	2669[A]	306[V]	983[V]
	고장점-2 (내수SSP-중평S/S)	5630[A]	625[V]	714[V]
매설지선無	고장점-1 (오송SP-청주SSP)	2640[A]	591[V]	1464[V]
	고장점-2 (내수SSP-중평S/S)	5471[A]	1583[V]	1585[V]

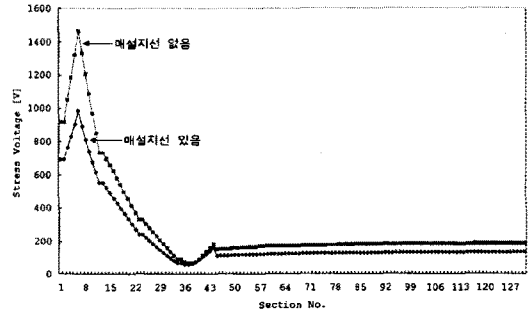


그림 10. 신호선의 스트레스 전압 (고장점-1)

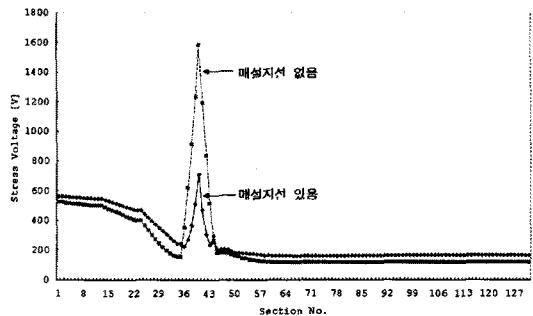


그림 11. 고장시 신호선의 Stress Voltage (고장점-2)

4.3 레일전압과 스트레스 전압에 대한 안전기준과 안전성 평가

4.3.1 안전기준

가) 레일전압

레일전압은 레일을 귀로 하는 전철회로에서 누설전류로 인해 유도되는 전압을 말하며, CCITT(The International Telegraph & Telephone Consulting Committee: 국제전신전화자문위원회)에서 정한 제한전압의 기준은 대부분의 유럽국가에서 채택되어 적용되고 있는데 구체적 기준은 다음과 같다.

- 열차가 정상상태로 운전중일 때 : 60[V]
- 전차선로의 단락고장상태일 때 : 650[V], 0.2초 이내

참고문헌

나) 스트레스 전압 안전기준

이 전압은 통신/신호 케이블과 대지간에 유기되는 유도 기전력(유도전압)을 말하는 것으로 통상적으로 기기의 절연내력 전압의 한계치이다. CCITT에서 정한 기준치는 2[kV]이다.

4.3.2 안전성 평가

그림 7에서 보는 바와 같이 열차가 정상적으로 운전중일 때 나타나는 레일전압을 보면, 매설지선을 설치하는 경우는 최대 30[V] 이하로 안전전압인 60[V] 미만으로 나타났으나 매설지선이 없는 경우 전차의 위치에 따라 60[V]를 초과하여 최대 약 80[V]에 이르고 있다. 전차선로가 고장상태인 경우 결과(표 2)와 비교할 때 매설지선이 없는 경우의 고장점-2(내수SSP-중평SS) 레일전압이 1,583[V]로서 기준치 650[V]를 훨씬 초과하고 있음을 알 수 있다. 스트레스 전압의 경우는 매설지선의 유무에 관계없이 기준한계치인 2 [kV] 이하를 충족하고 있다.

5. 결론

- (1)선로에 전차가 운행중일 때 레일전압은 공용접지 방식으로 했을 때가 기존 접지방식 보다 전차위치에 관계없이 전반적으로 낮게 나타났으며, 최대 50[V] 정도 낮아지고 있어 공용접지 방식의 접지효과가 더 우수함을 알 수 있다.
- (2)전차선과 레일간에 단락사고가 발생했을 때 레일전압은 공용접지 방식으로 했을 때 기존의 접지방식 보다 약 50% 정도 낮아지는 것으로 나타났다.
- (3)유럽의 대부분 국가에서 적용하고 있는 전철에서 레일의 제한전압과 스트레스 전압에 대한 CCITT 기준과 본 시뮬레이션 결과와를 비교할 때 매설지선이 없는 경우에서 정상운전중일 때 전차의 위치에 따라 부분적으로 안전전압 60[V]를 초과하였으며, 전차선로가 일부 구간에서 고장상태인 경우 안전전압 650[V]를 훨씬 초과하는 것으로 나타났다.
- (4)단락이나 지락사고시 통신/신호선에 가해지는 스트레스 전압은 공용접지 방식으로 했을 때 기존의 접지방식 보다 최대 33% 정도 낮게 걸리는 것으로 나타났다. 이때 통신/신호선로에 접속되어 있는 통신설비나 기기의 외함을 매설지선에 접속하는 등 등전위를 유지하기 위한 접지를 실시하면 훨씬 효과적인 것으로 사료된다.
- (5)본 논문에서 이용된 해석기법은 레일과 병행하는 통신선로간의 유도성 커플링에 대한 정확한 계산을 가능하게 하였으며, 앞으로 전기철도 시스템에서 통신선로에 미치는 커플링의 허용한계를 평가하는데 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 세종기술(주)의 지원에 의하여 수행되었음.

- [1] 한승진, 정용운, 천기하, 이기서, 박영수, 유광균, "궤도회로의 전기적 특성에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, 1996
- [2] 한국철도기술공사, "충북선 조치원~봉양간 전철, 전력설비 기본설계보고서(변전설비)", 1997. 11
- [3] 윤재영, 황치우, 박동욱, "고속전철 급전계통의 전압강하 해석", EMTP workshop, 1997
- [4] F. P. Dawalibi, F. Donoso, "Integrated Analysis Software for Grounding, EMF and EMI", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 2, pp. 19~24, 1993
- [5] R.J.Hill, "On-line Simulation of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 3, Aug., 1993
- [6] G.Shi-bin, H.Wei-jun, C.Xiao-chuan, "Study on Complex Grounding Fault Protection With High-Impedance For AT Feeding Traction System", 5th International Conference on Development in Power System Protection, 1993
- [7] K.S.Bahra, P.G.Batty, "Earthing and Bonding of Electrified Railways", International Conference on Developments in Mass Transit Systems, April, 1998
- [8] H.Roussel, "Power Supply for the Atlantic TGV High Speed Line", International Conference on Main Line Railway Electrification, 1989
- [9] B.Mellitt, J.Allan, Z.Shao, W.Johnston, C.Goodman, "Computer-based methods for induced-voltage calculations in AC railways", IEE proc., Vol. 137, No. 1, Jan., 1990
- [10] R.J.Hill, I.H.Cevik, "Parallel Computer Simulation of Autotransformer-Fed AC Traction Networks", Railroad Conference, 1990
- [11] CCITT Directives, "Inducing-currents and Voltages in Electrified Railway System", Geneva, 1989