

고속선 궤도회로 결합진단을 위한 내부 모델링

A Internal Signal Modeling for a Defect Diagnosis of Track Circuit on HSL

박기범* 이태훈**
Park, Ki Bum Lee, Tae Hoon

ABSTRACT

This paper introduces a result of internal signal modeling for a defect diagnosis of the UM-71C track circuit using on HSL. Actually, We fixed a sample area within operating section on HSL and performed the simulations for short circuit current that is reflected characteristic impedance and propagation factor. We compared the measuring data with the result of the simulation. These modeling can be used as the basic data for secure of the safety. Also, It need to make a criteria of analysis for the maintenance through comparison simulation data and inspection data.

본 논문은 고속선에 사용 중인 UM71-C 궤도회로의 결합진단을 위한 내부 모델링 결과를 나타낸다. 실제, 고속선 운행선상의 샘플개소를 선정하여 환경에 따른 선로정수를 구하고 전송라인의 특성임피던스와 전파정수를 반영시켜 단락전류에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 임의의 지점에 결합을 발생시켜 측정된 결과와 시뮬레이션 수행한 결과를 비교하였다. 이러한 모델링 작업은 궤도회로 구성요소의 기능저하를 사전 예측하여 열차의 안전운행을 확보하기 위한 기초자료로 사용되어 질 수 있으며, 차상검측시스템에서 얻어진 검측데이터와의 비교를 통해 유지보수에 활용 가능한 활용지침 및 분석기준을 작성하기 위해 필요하다.

1. 서 론

현재 고속선에 설치된 궤도회로는 CSEE사에 의해 개발된 UM71C궤도회로이다. 프랑스에서는 1980년대 이후로 지금까지도 계속해서 TVM 지상/차상시스템의 인터페이스 용도로 UM71C궤도회로를 사용하고 있으며, 그 안정성은 이미 전 세계적으로 설치되어 인정받고 있다. 그러나 우리나라에 도입된 UM71C궤도회로의 유지보수를 효율적으로 시행하기 위해서는 우리나라의 선로환경에 적합한 전기적인 특성을 반영하여 차상검측시스템의 분석기준을 마련하는 것이 필요하다. 차상검측시스템에서는 궤도회로에 유도되는 단락전류(Icc)가 수집되는데 이러한 검측데이터를 분석하기 위해서는 우선 전송라인의 특성임피던스와 전파정수 등에 영향을 미치는 선로정수 R,L,G,C에 대한 기준값이 정해져야 한다.[1] 우리나라 고속선은 지형특성상 토공구간, 교량구간, 터널구간으로 나뉜다. 각 구간별 선로정수의 평균값은 설치당시에 측정값이 존재하므로 그 값을 이용하여 샘플궤도회로에 적용하여 내부 모델링 작업을 수행하였다. 첫째 4단자망을 이용하여 궤도회로의 전기적인 모델링을 수행하였으며, 둘째 궤도회로 결합진단을 위해 보상컨덴서의 저항을 변경시켜 모델링 작업을 수행하였다.

* 한국철도공사 철도연구개발센터, 비회원
E-mail : pkb6170@korail.com
TEL : (042)609-3992, FAX : (042)609-3720

** 한국철도공사 철도연구개발센터, 비회원

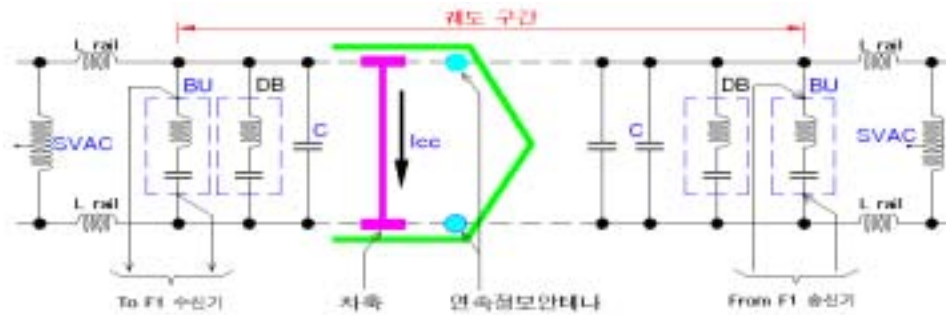
2. 본 론

2.1 궤도회로의 전기적인 특성 모델링

고속선 오송~천안아산간 TC2402의 샘플 궤도회로를 선정하였고 해당구간에 대한 전송라인의 분포정수와 선로정수를 이용하여 내부 모델링을 수행하였다. TC2402는 2400Hz를 반송주파수로 사용하고 있으며 궤도길이는 1,502m, 보상콘덴서의 수량은 23개이다. 궤도회로의 등가 4단자망의 계산은 전송라인의 분포정수회로와 일정한 간격의 보상콘덴서를 구간별 선로정수 값을 적용하여 수행하였고, 보상콘덴서의 값은 설치 당시와 약간의 차이가 있지만 평균적으로 25 μ F으로 일정하다는 가정 하에 계산하였으며, 변환행렬식은 전송라인 이론을 이용하여 계산하였다.

2.1.1 궤도회로의 정보전송 원리

고속선의 궤도회로는 특별한 반송주파수를 이용하여 열차에 코드화된 연속정보데이터를 전송한다. 이러한 시스템은 기관사에게 안전구역 내에서 최고속도를 제시하며, 궤도회로의 송신기는 AC전류를 공급한다. 전송라인은 양쪽레일에 의해 구성되어지고, 수신기는 송신기와 반대쪽에 연결된다. 보내진 전류는 궤도의 유도성분 때문에 감쇠되어진다. 전기적인 조정과 전송레벨의 향상을 위해서 레일에는 일정한 간격으로 보상콘덴서가 설치되는데 콘덴서의 수량은 궤도회로의 주파수와 길이에 따라 달라진다. 우리나라의 경우 전체 4개의 반송주파수를 사용하는데 2040Hz와 2400Hz에서는 60m간격으로 설치되며, 2760Hz와 3120Hz에서는 80m간격으로 일정하게 설치된다. 열차가 진행하면서 첫 번째 차축 2m전방에 있는 연속정보안테나로부터 연속정보를 수신하고 차상검측데이터도 차축에 의해 수집되는 단락전류를 측정하여 검측데이터로 활용하고 있다.



〈그림 1〉 궤도회로 정보전송 원리

2.1.2 구간별 궤도회로의 전기적인 특성 기준값

우리나라의 고속선은 지형 특성상 토공, 교량, 터널구간으로 구분되어 설치되었다. 따라서, 구간별 궤도회로의 전기적인 특성요소 값들도 다르게 나타난다. 이러한 궤도회로의 전기적인 특성은 고속선이 설치될 당시에 전기적 절연구간의 거리를 산정하기 위해 측정한 데이터가 존재하여 그대로 적용시켜 모델링 기초자료로 사용하였다.[1] 프랑스의 경우에는 대부분 토공으로 이루어져 있어 선로정수 평균값을 적용하기에 용이하지만 우리나라의 경우에는 세 종류의 구간으로 나뉘어 있어 전 구간에 대한 시뮬레이션을 수행하기에는 다소 복잡하다. 우선은 샘플구간에 대해서만 궤도 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하여 현장 측정결과와 직접 비교하였다.

〈표 1〉 토공구간의 선로정수 평균값

구분	$R(m\Omega/m)$	$L(\mu H/m)$	$G(\mu S/m)$	$C(nF/m)$	$R_b(\Omega \cdot km)$
2400Hz	1.456	1.305	0.276	0.280	3637

〈표 2〉 터널구간의 선로정수 평균값

구분	$R(\text{m}\Omega/\text{m})$	$L(\mu\text{H}/\text{m})$	$G(\mu\text{S}/\text{m})$	$C(\text{nF}/\text{m})$	$R_b(\Omega \cdot \text{km})$
2400Hz	1.382	1.274	508	19.28	1.97



〈그림 2〉 샘플 궤도회로의 지형 특성 구분

〈그림 2〉는 샘플 궤도회로의 지형특성에 대한 구간별 거리를 나타낸 것이고, 이것은 구간별 선로정수가 다르기 때문에 시뮬레이션 수행시 반영시켜야 할 파라미터 중 하나이다.

2.1.3 샘플구간의 전기적 등가회로

샘플 궤도회로의 전기적인 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위해 궤도회로를 우선 전기적 절연구간과 전송라인으로 구분하였으며, 샘플구간에 대해 세부적으로 전송라인과 보상컨덴서로 구분하여 4단자 정수를 계산하였다. 궤도회로의 전기적 절연구간과 전송라인 구분은 〈그림 3〉과 같고, 샘플구간내 전송라인에서의 등가회로는 〈그림 4〉와 같다.



〈그림 3〉 궤도회로의 전기적 절연구간과 전송라인 구분



〈그림 4〉 샘플 궤도회로내 전송라인에서의 등가회로

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j2\pi fL}{G + j2\pi fC}}$$

$$\theta = \sqrt{(R + j2\pi fL)(G + j2\pi fC)}$$

여기에서 Z_c 는 전송라인의 선로정수값에 의한 특성임피던스이고, θ 는 전파정수를 나타낸다. f 는 반송 주파수, R 은 레일과 같은 방향의 저항, L 은 레일과 같은 방향의 인덕턴스, G 는 레일과 평행한 컨덕턴스, C 는 레일과 평행한 캐패시턴스 성분을 나타낸다.

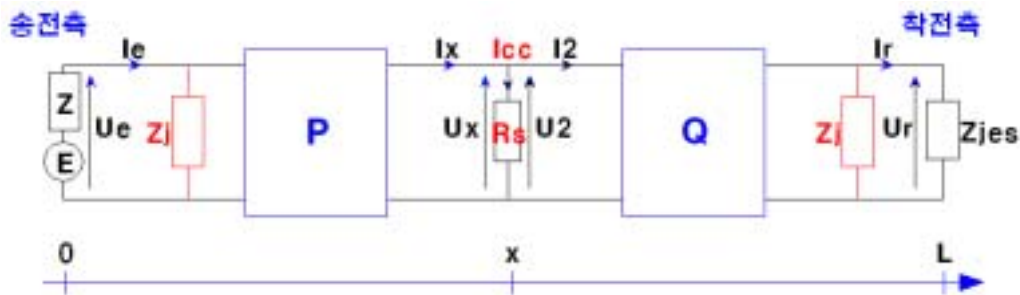
선로의 전기적인 특성값을 이용하여 특성임피던스 Z_c 와 전파정수 θ 가 구해지면 <그림 4>에서 전송라인 Q_1 과 보상콘덴서 Q_2 는 전송라인이론에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_1 = \begin{bmatrix} ch(\theta L) & -Z_c sh(\theta L) \\ -\frac{1}{Z_c} sh(\theta L) & ch(\theta L) \end{bmatrix}, \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{j2\pi f \times 25\mu F} & 1 \end{bmatrix}$$

보상콘덴서 지점은 C 값만을 적용하기 때문에 Q_2 와 같은 식이 일정하게 사용되어 진다.

2.1.4 단락전류 시물레이션을 위한 전기적 등가회로

또한 차상검측시스템의 연속정보레벨을 비교하기 위해서는 단락전류(Icc)를 시물레이션 할 수 있는 등가회로의 구성이 필요하다. 여기에서 P는 차축을 Rs로 할 경우 전면의 레도 구성요소에 해당하는 4단자(x길이의 레도부분)이고, Q는 차축 뒤 레도 구성요소에 해당하는 4단자(L-x길이의 레도부분)이다.



<그림 5> 단락전류(Icc) 계산을 위한 전기적 등가회로

열차는 착전측에서 송전측으로 이동하기 때문에 가로좌표들의 축방향이 정해진다. 우리는 현장에서 측정한 데이터와 시물레이션 데이터를 비교하기 위해 10m간격으로 축방향을 설정하여 시험하였다. Rs 저항 내 Icc를 계산하기 위해 먼저 차축의 단자에 모인 임피던스를 가지고 다음과 같은 식을 도출하였다.

$$Z_1 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{Z_{jes}Q_{22} - Q_{12}}{Q_{11} - Z_{jes}Q_{21}}$$

위 식은 차축 뒤쪽에서의 전압과 전류 U_2 와 I_2 의 계산식을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} U_x \\ I_x \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = [S][P] \begin{bmatrix} U_e \\ I_e \end{bmatrix}$$

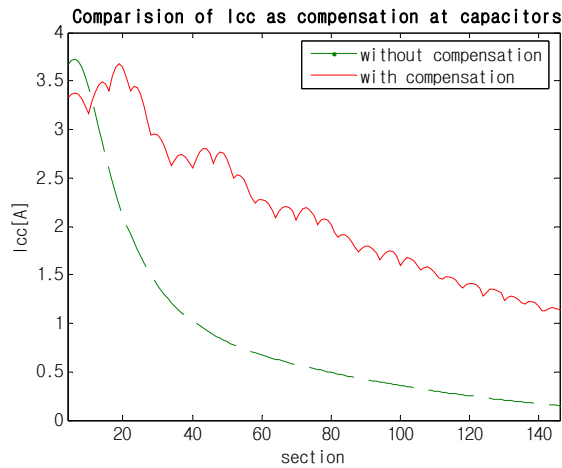
$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_s} & 1 \end{bmatrix}$$

위 식은 차축 앞쪽에서의 전압과 전류 U_x 와 I_x 의 계산식을 나타낸다. 다음은 차축 내 단락전류에 대한 식이다.

$$I_{cc} = \frac{U_x}{R_s} = U_e \frac{Z_1}{Z_1(R_s P_{22} - P_{12}) - R_s P_{12}}$$

$$I_{cc} = U_e \frac{Z_1}{Z_c(Z_1 + R_s)sh(\theta(L-x)) + Z_1 R_s ch(\theta(L-x))} \quad \text{따라서, } Z_1 = Z_c \frac{Z_{jes}ch(\theta x) + Z_c sh(\theta x)}{Z_c ch(\theta x) + Z_{jes}sh(\theta x)}$$

이러한 관계식에 의해 <그림 6>이 산출되었다.



<그림 6> 보상에 따른 단락전류(Icc)의 비교

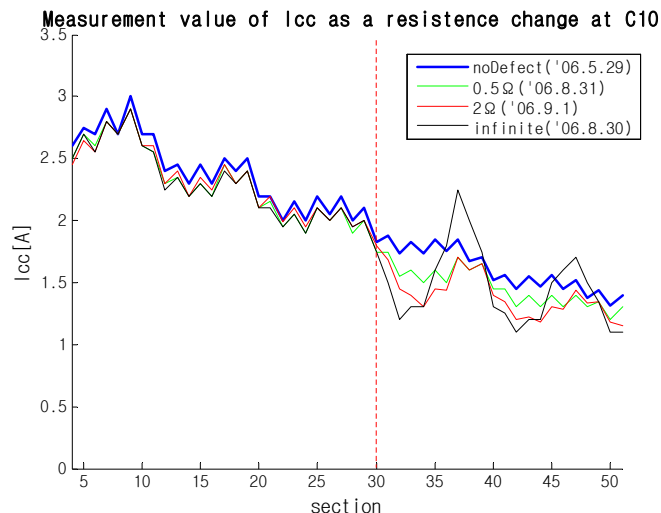
<그림 6>에서 보상콘덴서가 있는 단락전류는 콘덴서 지점에서 보상이 되어 착전측까지 단락전류가 1[A]이상으로 연속정보전송이 원활하게 이루어짐을 알 수 있지만, 보상이 없는 단락전류는 송전측에서 약 400m 지점까지 약 1[A]로 떨어져서 착전측까지 안정적인 연속정보전송이 이루어 질 수 없음을 나타낸다. 따라서 연속정보 전송을 위해서는 보상콘덴서의 역할이 중요하다는 사실을 알 수 있다.

2.2 결함진단을 위한 모델링

샘플 궤도회로, TC2402에 대해 C10지점에 저항을 변경시켜 현장측정을 하였고 차상검측을 통해 데이터를 비교할 수 있었다. 또한 시뮬레이션 데이터와 비교하여 세 가지 데이터가 모두 일치함을 확인하였다. 이는 궤도회로 구성요소의 기능저하를 사전에 예측하여 열차의 안전운행을 확보하기 위한 분석기준 및 활용지침을 제시하는데 있어 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

2.2.1 샘플 궤도회로에 대한 현장측정

TC2402 궤도회로에 대한 단락전류 시뮬레이션 과형과 차상검측데이터를 함께 비교하기 위하여 우선 현장설비별 위치 및 콘덴서 중간 지점에서 단락봉(shunting bar)을 설치하고 레일에 유도되는 전류를 측정하였다. 이때 차상검측시스템에서 수집되는 방법과 동일하게 단락봉 설치 후 송전측 방향 2m전방에서 전류를 측정하였으며, C10지점에서 결함이 없는 경우와 0.5Ω과 2Ω, 제거시(∞) 상태의 단락전류를 측정하였다. 전반적인 과장의 특성을 파악하기 위해 저항변경시 전구간의 단락전류를 측정하였다.

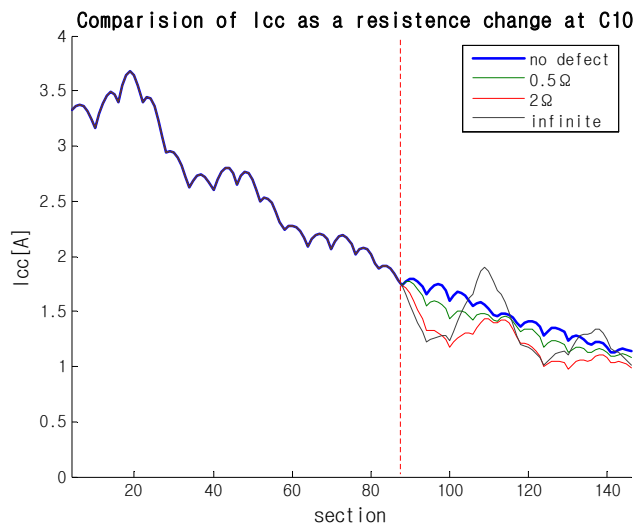


<그림 7> C10 저항변경에 따른 단락전류(Icc) 측정결과

5월29일에는 결함이 없는 경우, 8월30일에는 제거시, 8월31일에는 0.5Ω, 9월1일에는 2Ω 설치시의 단락전류를 측정하였으며, 전반적으로 파장을 그리며 나타났고 레일에 흐르는 전류를 보상시켜주는 보상콘덴서 지점도 명확하게 확인이 가능하였다. C10지점 이후로 저항변경에 따라 단락전류의 파장이 상이하게 나타남을 확인하였으며 차상에서 검측한 데이터와 시뮬레이션 데이터를 비교하였는데 세 데이터가 모두 일치함을 확인하였다. 이는 차상검측데이터의 연속레벨 측정데이터를 이용하여 현장 궤도회로 구성부품인 보상콘덴서의 기능저하상태를 예측할 수 있는 중요한 자료로 활용할 수 있다.

2.2.2 샘플 궤도회로에 대한 시뮬레이션 결과

앞에서 언급한 TC2402 궤도회로의 전기적인 특성을 반영한 단락전류 시뮬레이션을 C10지점에서 저항을 변경시켜 시뮬레이션 결과를 도출하였다. 시뮬레이션 데이터는 송전측의 송전전압을 3V로 가정한 상태에서 수행하였으며, 단락저항은 0.25Ω으로 가정하였다. 전기적 절연구간(JES)에서 입력 임피던스의 유도성분을 보상하기 위해 레일에 평행하게 설치된 Z_j 는 $j2\pi f C_j$ 로 나타낼 수 있는데, C_j 는 JES에서 조정하기 위해 필요한 등가 정전용량으로 여기에서는 90μF으로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 JES는 양호한 조건에서 궤도회로의 신호와 연속정보가 송수신될 수 있도록 하기에 충분한 임피던스를 갖는데, 그러므로 Z_{jes} 를 약 2Ω으로 정의하고 있다.[2] 이러한 조건들을 이용하여 시뮬레이션 수행결과 현장에서 측정된 데이터와 일치하는 것을 확인하였다.

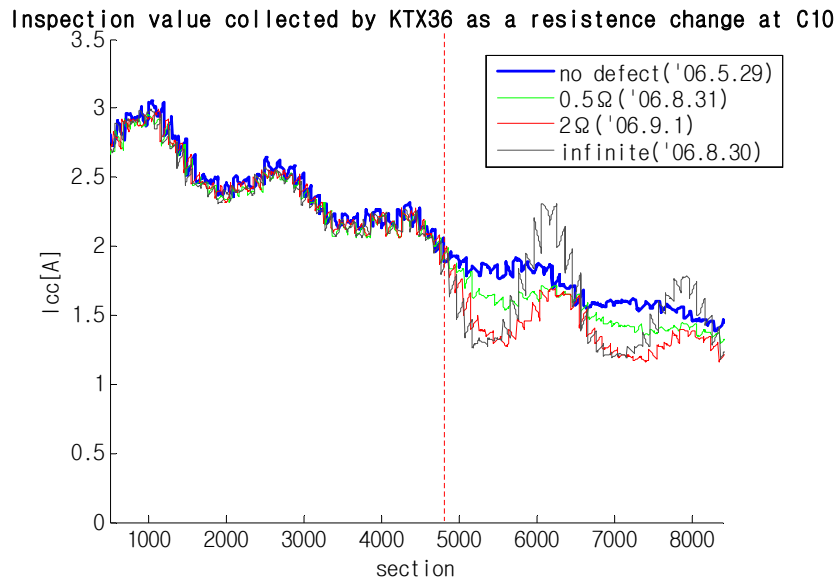


〈그림 8〉 C10 저항변경에 따른 단락전류(Icc) 시뮬레이션 결과

〈그림 8〉은 시뮬레이션 데이터를 비교한 그림이다. 〈그림 7〉과 마찬가지로 C10지점 이후로 착전측까지 파장이 변화됨을 확인할 수 있다.

2.2.3 샘플 궤도회로에 대한 차상검측데이터 비교

동일한 조건에서 KTX36호의 차상검측시스템을 통해 수집된 데이터를 분석한 결과 현장측정 결과와 시뮬레이션 결과 모두 일치하는 것으로 확인되었다. 차상검측데이터의 파형은 수집된 데이터의 양이 많아서 노이즈 성분까지도 나타나지만 전반적인 파장의 크기나 C10이후에서 착전측까지 파장이 변화되는 현상은 동일하게 검측되었다. 이로써 보상콘덴서의 저항변경에 따른 단락전류 변화상태는 시뮬레이션 결과를 이용하여 모델링 작업이 가능하게 되었다.



〈그림 9〉 KTX36호 차상검측시스템에 의해 수집된 검측데이터

3. 결 론

본 논문에서는 2가지의 결론을 얻었다. 첫째, 궤도회로 샘플구간에 대한 전기적인 특성을 반영한 내부 모델링 즉, 단락전류 시뮬레이션을 수행하였으며, 이는 추후에 계속될 외부 모델링 연구의 기초자료로 활용할 예정이다. 둘째, 임의의 지점에서 보상콘덴서의 기능저하시 단락전류의 변화상태를 현장측정값과 시뮬레이션 데이터를, 차상검측데이터를 비교하여 모두 일치함을 확인하였다. 이러한 결과로 인해 차상에서 수집되는 연속레벨 검측데이터의 변화상태를 사전에 예측하여 판단할 수 있는 분석기준 및 활용지침의 제시가 가능해졌다. 현재까지는 내부 모델링을 성공적으로 마친 상태이며, 검측데이터의 다양한 패턴을 분석하여 정밀한 분류화 및 결함위치 파악이 가능하도록 외부 모델링 연구를 추진 중에 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] F.BERTON, "Korea TGV Track Circuit UM71 60Hz Track Characterisation", 1999.
- [2] F.Fessant, P.Aknin, F.Vilette, M.Antoni. "Modelisation électrique du circuit de voie, element du systeme de transmission voie-machine des TGV", Revue 3El n°27.pp.46-52.2001