

레일전위상승 분석을 위한 컴퓨터 알고리즘

An Algorithm to Analyze Rail Potential Rise in DC Traction Power Supply System

정상기[†] · 김형철* · 정호성** · 권삼영***

Sanggi Chung · Hyungchul Kim · Hosung Jung · Samyoung Kwon

Abstract An algorithm and a computer software are developed for the analysis of rail potential rise. The algorithm is intended to be integrated with the traction power system simulation program. In the algorithm, rail potentials are obtained by two step process. First the injection currents to the negative rail are obtained from load-flow study. In the next step, a network consisting of negative rail and the injection currents are constructed. Leakage resistance to ground are added to the network. And the network is analyzed for rail potentials. A software is developed to verify the validity of the algorithm. The result of the software is compared with the Simulink/SymPower circuit analysis result. The differences between the two results are with the acceptable range. The advantage of this algorithm is that it can be integrated with the existing traction power supply simulation program easily, which usually ignores negative rail's leakage resistance.

Keywords : Rail potential, Leakage current, Traction power supply, Simulation

요 지 급전시뮬레이션과 함께 수행될 수 있는 ‘레일 전위 상승 분석을 위한 컴퓨터 알고리즘’이 제안되었다. 본 알고리즘에서 레일전위상승 분석은 2 단계로 진행된다. 첫 단계에서는 급전시스템의 조류해석을 수행하여 차량 및 변전소에서의 인젝션(injection) 전류를 구한다. 두 번째 단계에서는 급전시스템의 등가회로에서 변전소 및 차량을 전류소스로 대체하고 레일의 대지로의 누설 저항이 삽입된 등가회로를 다시 구성한다. 새로 구성된 등가회로를 해석하여 변전소 및 차량 위치에서의 레일 전위를 구한다. 알고리즘의 타당성을 분석하기 위하여 컴퓨터 프로그램을 작성하여 레일전위상승을 구하였고 동일한 시스템을 대상으로 MatLab 사의 Simulink/SymPowerSystems 소프트웨어를 이용하여 레일전위를 구하였다. 2가지 방법에 의한 결과를 상호 비교 분석한 결과는 그 오차가 허용범위 내에 있음을 보여주었다. 본 알고리즘은 급전시뮬레이션과 연동하여 수행될 수 있는 장점을 가지고 있다.

주 요 어 : 레일전위, 누설전류, DC급전, 급전시스템 모의

1. 서 론

도시철도의 DC 급전시스템에서 귀환전류의 전송로로 흔히 주행레일이 사용된다. 주행레일은 기본적으로 비접지로 설치 운영된다. 주행레일에는 차량의 부하전류가 흐르므로 그 부하전류에 비례한 전압차가 차량과 변전소의 정류기 부극사이 주행레일에 발생하여 레일전위가 상승하게

된다. 레일전위의 상승은 소위 터치전위(touch voltage) 및 스텝전위(step voltage)를 상승 시켜 승객의 안전에 위협이 되므로[1] 국내에서도 국가규격 ‘KS 62128-1, 철도용 고정 설비-제 1부: 전기안전 및 접지에 관련된 보호조치’로 레일 전위의 상승 값과 그 지속 시간을 제한하고 있다. 레일전위 상승은 또한 대지로의 누설전류를 발생시켜 지하매설 금속 시설물의 전식을 일으킨다. 본 논문에서는 이러한 레일전위상승을 분석하는 컴퓨터 알고리즘을 제시한다. 레일전위상승 분석은 목적에 따라 그 방법이 달라질 수 있다. 분석의 목적이 주어진 노선과 열차운영 조건에서 주어진 기간 내에서 최대 레일전위 상승 값, 혹은 누적 누설 전류 양 등을 예측하기 위함이 목적이라면 레일전위상승분석은 급전

[†] 책임저자 : 정회원 한국철도기술연구원 전철전력연구실 수석연구원
E-mail : sgchung@krri.re.kr

TEL : (031)460-5733 FAX : (031)460-5459

* 정회원, 한국철도기술연구원 전철전력연구실 연구실장

** 정회원, 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원

*** 정회원, 한국철도기술연구원 전철전력연구실 책임임연구원

시스템 시뮬레이션과 함께 수행되어야 한다. 즉 다수의 열차부하의 크기, 위치 등이 시간에 따라 변하므로 열차부하들의 크기 및 위치 등을 미리 정해 놓고 시스템을 해석하는 것은 현실적이지 못하다는 의미이다. 레일전위상승 분석은 본 알고리즘에서 레일전위상승 분석은 2 단계로 진행된다. 첫 단계에서는 급전시스템의 조류해석을 수행하여 차량 및 변전소에서의 인젝션(injection) 전류를 구한다. 두 번째 단계에서는 급전시스템의 등가회로에서 변전소 및 차량을 전류 소스로 대체하고 레일의 대지로의 누설 저항이 삽입된 등가회로를 다시 구성한다. 새로 구성된 등가회로를 해석하여 변전소 및 차량 위치에서의 레일 전위를 구한다. 본 알고리즘에서 2단계 레일전위상승분석 방법을 사용하는 이유는 다음과 같다. 첫째 한 번에 레일전위상승 분석을 위하여 주행레일의 누설저항을 포함하여 작성된 시스템 등가회로는 노드 방정식을 세우기 어렵다. 따라서 메쉬 전류 해석방법을 채택하여야 하고, 조류해석은 반복법으로 회로의 해를 구하여야 하고, 반복법에서는 초기 값을 가정하여야 되는 데 메쉬 전류를 가정하기 어렵다. 메쉬 전류를 잘못 가정하면 회로해석이 불가능하여 질 수도 있기 때문이다. 또한 기존의 급전시뮬레이션 프로그램에서는 일반적으로 레일의 대지누설저항이 고려되지 않고 수행되고 있는데 이와 연동해서 용이하게 레일전위 상승 분석을 수행할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 제시된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 본 알고리즘에 의한 계산결과와 세계적으로 신뢰성을 인정받고 있는 Simulink /SymPowerSystems 소프트웨어를 사용하여 얻은 결과를 2.3 절에서 비교 검토하였다.

2. 본 론

2.1 레일전위상승 검토

Fig. 1은 레일전위상승 분석 방법을 설명하기 위한 간략한 급전시스템 모델이다. Fig. 1에서 차량 및 변전소 위치에서의 레일전위는 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같다[2].

$$V_{GL} \cong \frac{R_L}{R_L + R_S} V_N \quad (1)$$

$$V_{GS} \cong \frac{R_S}{R_L + R_S} V_N \quad (2)$$

$$V_N \cong I_T \cdot R_N = I_N \cdot R_N \quad (3)$$

R_S 와 R_L 은 변전소 및 차량위치에서 주행레일의 유효접지 저항이다. 이 값은 주행레일의 분포 접지저항을 파이딩가회로의 집중 접지저항으로 환산한 값이다. 식 (1) 및 (2)

에서 등호가 '='가 아니고 '≅'로 표시된 것은 식 (3)에서 I_N 이 R_S 및 R_L 이 삽입되지 않은 상태에서의 급전계통 조류해석 결과이기 때문이다. 즉 식 (3)은 근사식으로 실제 값과는 오차가 있으며 이 오차가 허용될 수 있는 범위 내에 있느냐가 본 알고리즘의 타당성을 보여 줄 수 있는 한 요인이다. 다음에서는 실제 값과 식 (3)의 비를 구하여 본다. Fig. 2는 오차를 분석하기 위하여 Fig. 1의 차량부하를 정 전류원에서 정 저항, R_T , 로 바꾸고 주행레일의 접지저항을 삭제한 후 다시 그린 것이다. Fig. 2에서 차량과 변전소 위치에서의 주행레일 전위차 V'_N 은 식 (4)와 같으며 식 (3)과 동일한 값을 갖는다. 주행레일의 접지저항 R_L 및 R_S 를 포함한 등가회로는 Fig. 3과 같으며 이 때 차량과 변전소 사이 주행레일 전위차 V'_N 은 식 (5)와 같다. 식 (4)는 근사식으로 오차를 포함하고 있는 값이고 식 (3)과 동일한 값을 갖는다. 식 (5)는 오차가 없는 실제 값이다. 즉 V_N 은 주행레일의 접지저항이 고려되지 않을 경우의 차량과 변전소 사이 주행레일 전위차 이고 V'_N 은 주행레일의 접지저항을 고려하였을 경우 차량과 변전소 사이 주행레일 전위차이다. $R_N // (R_L + R_S)$ 는 R_N 과 $(R_L + R_S)$ 의 병렬회로의 등가저항이다. 상수 k_1, k_2 를 식 (6) 및 (7)로 정의하면 식 (4) ~ (5)로부터 V_N 의 V'_N 대비 % 오차는 식 (8)과 같게 된다.

$$V_N = \frac{R_N}{R_P + R_T + R_N} \cdot V_S \quad (4)$$

$$V'_N = \frac{R_N // (R_L + R_S)}{R_P + R_T + R_N // (R_L + R_S)} \cdot V_S \quad (5)$$

$$(R_L + R_S) = k_1 R_N \quad (6)$$

$$(R_P + R_T) = k_2 R_N \quad (7)$$

$$\% \text{ error} = \frac{V_N - V'_N}{V'_N} = \frac{1}{k_1 + \frac{k_1}{k_2}} \times 100 \quad (8)$$

$$0 < \% \text{ error} < \frac{1}{k_1} \times 100 \quad (9)$$

식 (6) 및 (7)에서 k_1 은 차량의 부하와 관계없이 노선의 조건에 의해서 정해지는 값이고, k_2 는 차량 부하 상태에 따라 변한다. 차량 부하가 작으면 작을수록 R_T 가 커지므로 k_2 가 커지고 최대의 % Error가 발생한다. k_1/k_2 0이 될 때 최대의 % Error가 발생한다. 따라서 % Error의 범위는 식 (9)와 같이 된다. 식 (6)에서 k_1 은 주행레일의 길이가 길수록, 레일의 누설 접지저항이 작을수록 작아진다. 최대 오차는 변전소간 간격이 길고 차량이 변전소로부터 최대 거리에 있을 경우 발생한다. 따라서 DC 1500V 도시철도의

경우 변전소간 간격이 최대 5km 내외임을 고려하여 Fig. 4와 같이 DC 1500V 급전시스템의 변전소 간격이 5km, 차량의 위치는 변전소로부터 5km인 시스템에 대해 최대 % Error를 계산하였다. Table 1은 % error의 계산과정을 보여준다. Table 1에 의해서 계산된 최대 % error는 1.43%이며 이 값은 Fig. 4 및 Table 1의 조건일 경우이다. 실제로 관심사인 최대레일전위상승의 경우 즉 부하가 큰 경우에는 k_2 의 영향 때문에 % error가 이 값보다 작아지게 된다. 실제 % error 값은 환경에 따라 변하나 1.5%를 넘지 않는 것으로 판단된다.

Table 1. Estimation of the Maximum % Error of the algorithm

| 순서 | 항목 | 값 | 비고 |
|----|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1 | 주행레일 저항 | 0.017 Ω/km | 50kg, 2EA 병렬 본드저항을 0.08 |
| 2 | 누설 저항 | 10 $\Omega \cdot \text{km}$ | 100~10 $\Omega \cdot \text{km}$ |
| 3 | 주행레일 저항 R_N | 0.085 Ω | 5 km |
| 4 | 변전소 유효 접지저항 R_S | 2.0 Ω | 누설저항 10 $\Omega \cdot \text{km}$ |
| 5 | 차량 유효 접지저항 R_L | 4.0 Ω | 누설저항 10 $\Omega \cdot \text{km}$ |
| 6 | k_1 | 70.6 | |
| 7 | 최대 %P. U. error | 1.42 % | |

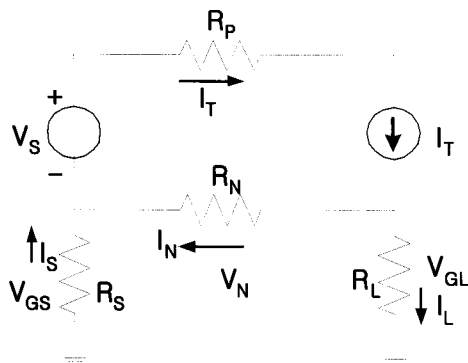


Fig. 1. Basic model for rail potential analysis

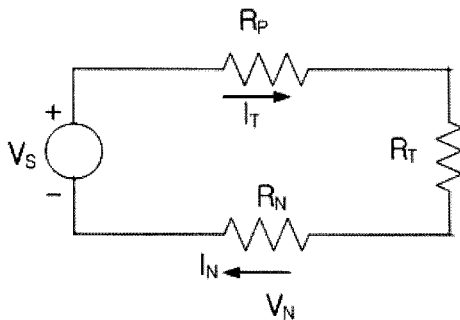


Fig. 2. Basic model without rail's leakage earth resistance. Train load is modeled as a resistance

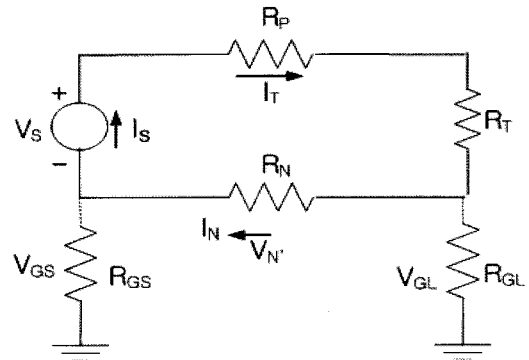


Fig. 3. Basic model with rail's leakage earth resistance.

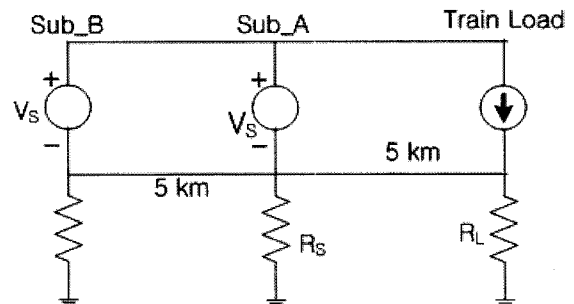


Fig. 4. Equivalent circuit to estimate % Error in the algorithm

2.2 레일전위상승 분석을 위한 컴퓨터 알고리즘

본 알고리즘에서 레일전위상승 분석은 2 단계로 진행된다. 본 알고리즘의 첫 단계에서는 급전시스템의 조류해석을 수행하여 차량 및 변전소에서의 인젝션(injection) 전류를 구한다. 다음 단계에서는 차량 및 변전소를 인젝션 전류원으로 대치하고 대지접지저항을 추가한 등가회로 작성하고 이 등가회로를 해석하여 레일전위를 구한다. 본 알고리즘에서는 계통 방정식을 단계별로 1번씩 2번 수립하는데 이것은 계통의 등가회로가 단계별로 다르기 때문이다. Fig. 5에서 (a)는 궁극적으로 해석되어야 하는 시스템인데 이것을 직접 해석하지 않고 첫 단계에서는 (b)와 같이 대지접지저항이 고려되지 않은 등가회로를 작성, 조류해석을 수행하고, 다음 단계에서는 (d)와 같이 이 조류해석 결과에서 얻어지는 인젝션 전류를 이용하여 변전소 및 차량을 이상 전류원으로 대치한 등가회로를 새로 작성한다. 이 새로운 등가회로를 해석하여 레일전위를 구한다. Fig. 6은 본 알고리즘의 흐름도이다. Fig. 6 흐름도의 스텝 3까지는 Fig. 5(b)에 해당되고 Fig. 5(d)는 알고리즘의 스텝4에 해당된다. Fig. 6의 알고리즘을 살펴보면 스텝 (1)~(3)은 일반적인 전력시뮬레이션에서 사용되는 조류해석 루틴이다. 스텝 3에서는 일반적으로 식 (10)과 같은 노드 방정식을 풀어서 $[V]$ 를 구한다. 여기서 $[G]$ 는 계통의 컨덕턴스 매트릭스, $[V]$ 는 노드 전위 벡터, $[I]$ 는 노드 인젝션 벡터이다. 식 (10)에

서 $[I]$ 는 상수로 주어지지 않고 차량의 요구 전력 P 로부터 식 (11)의 비선형식에 의해 계산되므로 식 (10)의 해를 위하여는 반복법이 사용된다. Fig. 6의 스텝 4에서는 스텝 2에서 만든 계통방정식과는 별개의 계통의 노드 방정식이 세워진다. 식 (10)과 구별하기 위하여 new라는 첨자를 붙여서 식 (9)와 같이 다시 썼다. $[G]_{new}$ 에는 급전선의 저항은 포함되지 않는다. 오직 레일 저항과 변전소 및 차량의 유효 접지저항만 포함된다. $[I]_{new}$ 는 Fig. 6 알고리즘의 스텝 3에서 구한 인젝션 전류 값이다. Fig. 6 스텝 5는 식 (12)의 해를 구하는 과정이다. 식 (12)에서 얻은 $[V]_{new}$ 가 변전소 및 차량 위치에서의 레일전위가 된다.

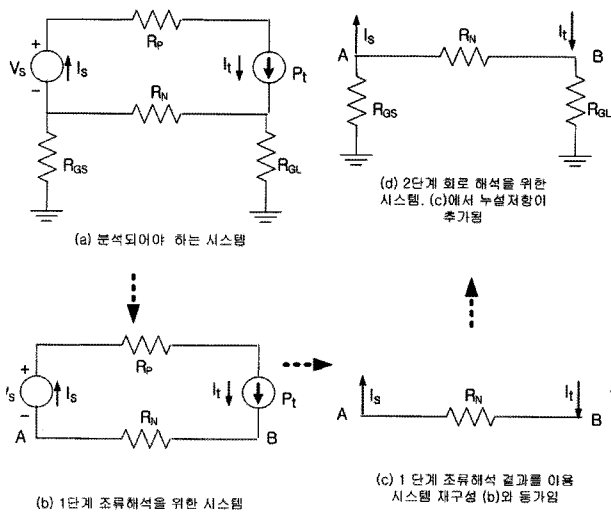


Fig. 5. Changes in system equivalent circuit in the algorithm

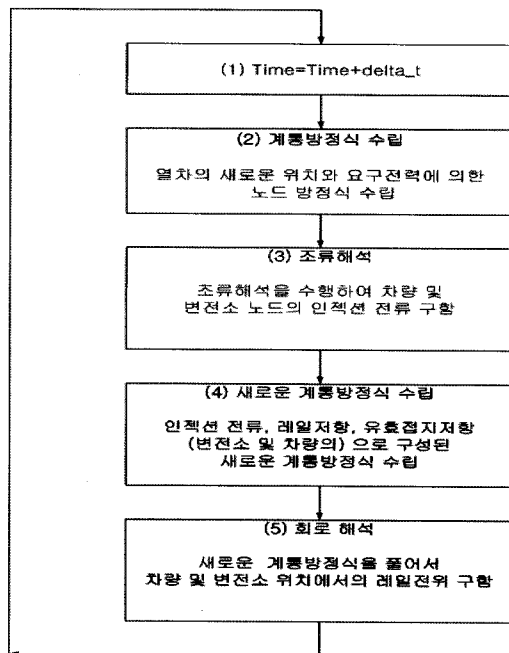


Fig. 6. Flow diagram of the algorithm

$$[G] \cdot [V] = [I] \tag{10}$$

$$I_t = -\frac{P_t}{V_t} \tag{11}$$

$$[G]_{new} \cdot [V]_{new} = [I]_{new} \tag{12}$$

사실 2단계로 나누지 않고 Fig. 5에서 (a) 시스템에 대하여 직접 조류해석을 수행할 수도 있고 그러면 더 정확한 해를 구할 수 있으나 본 알고리즘에서 (b) 시스템의 조류해석을 하고 다시 (d) 시스템을 작성하여 해를 구하는 이유는 다음과 같다. (a)는 노드 방정식 대신 루프 방정식을 세워서 회로 해석을 수행하여야 하는데 루프 방정식은 체계적인 컴퓨터 알고리즘 작성이 어렵다. 루프 연립 방정식도 반복법을 사용하여 해를 구하여야 되는데 루프 전류의 초기값 선정하는 것도 애매하다. 선정된 초기 값에 따라 수렴할 수도 있고 발산하여 해를 구하지 못할 수도 있다. 또한 (b)-(d) 시스템을 분석하여도 최대오차가 1.5% 정도 이므로 이 정도의 오차를 허용할 수 있는 업무에서는 정확도에 문제가 없다. 레일전위상승분석의 목적이 설계, 혹은 운영 과정에서 그 상승치를 예측하기 위함이라면 10% 내외의 오차는 허용될 수 있으며 본 알고리즘에서의 최대 오차는 1.5% 정도 이다. 또한 레일전위상승분석은 급전시뮬레이션과 함께 수행되어야지 운전 조건하에서의 레일전위상승 분석이 가능하다. 일반적으로 급전시뮬레이션에서는 주행 레일의 접지누설저항을 포함시키지 않고 조류해석을 수행하는 데, 이 경우 조류해석 결과에서 Fig. 5(b)의 인젝션 전류를 얻어지고 이를 이용하여 레일전위상승 분석이 수행된다.

2.3 알고리즘의 타당성 검토

본 알고리즘에 의한 시험 소프트웨어를 개발하였고 이 시험 소프트웨어를 사용한 레일전위상승 분석결과와 Simulink/SymPower에 의한 분석결과를 비교하여 % error를 계산하고 계산된 % error의 크기를 평가하여 알고리즘의 타당성을 판단하였다. 또한 2.1 항에서 제시된 % error의 예측치 비교하여 그 부합여부도 분석하였다. 먼저, 본 알고리즘에 의한 소프트웨어를 개발하여 시험 시스템을 대상으로 레일전위상승분석을 수행하고 동일한 시스템에 대하여 Simulink/SymPower Systems 소프트웨어를 이용하여 레일전위상승 값을 구하여 그 결과를 상호 비교하였다. 시험시스템 데이터는 Table 2에 제시되었고 Fig. 7에 도시되었다. Table 2의 시험시스템을 대상으로 수행된 조류해석 결과는 Table 3과 같다. Table 3의 조류해석결과는 Fig. 6

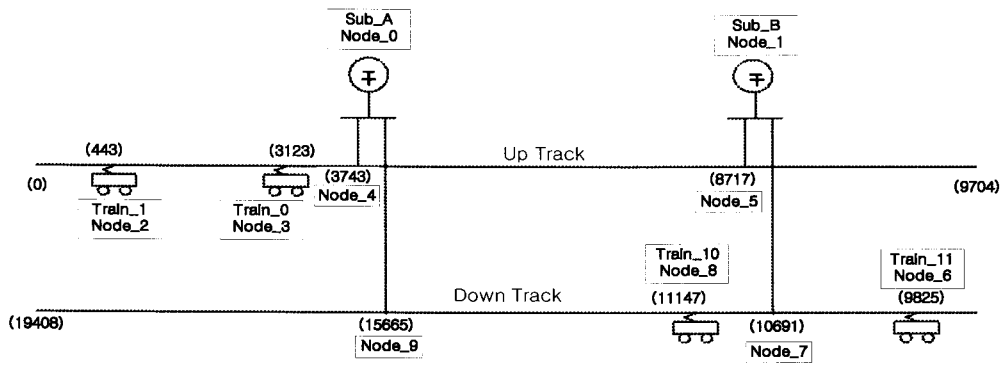


Fig. 7. Test system

알고리즘의 스텝 3의 결과이며 또한 Fig. 5(b)에 해당된다. Fig. 8에서는 Fig. 7에 접지 누설저항을 추가하고 Table 3의 조류해석 결과에 따라 변전소 및 차량이 전류 원으로 대치된 계통도이다. 이 계통도를 대상으로 본 알고리즘의 2단계 작업인 회로해석이 수행된다. 즉 Fig. 8은 Fig. 6 알고리즘의 스텝 4의 결과이며 또한 Fig. 5d)에 해당된다. Fig. 8에 대하여 회로해석을 수행하여 각 노드에서의 전위를 구한다. 결과는 Table 4에 제시되었다. 이 과정은 Fig. 6 알고리즘의 스텝 5에 해당된다. Fig. 9는 Table 2의 시험시스템을 대상으로 레일의 누설접지저항을 추가하여 작성된 SimuLink 모델이고 해석 결과가 마찬가지로 Table 4에 제시되었다. Fig. 9 저항 값에서 m, m₁, m₂ 등은 모두 밀리, 1/1000,를 나타내며 뒤에 붙는 _1, _2 등의 첨자는 SimuLink 소프트웨어에서 표기의 제한 때문에 붙은 것으로 실질적 의미는 없다. Table 4에서는 2 방법 사이에 최대 1% 정도의 차이가 있음을 보여준다. 1% 정도의 차이는 2.2 항에서 이미 예측되었고 허용범위 내에 있다는 것도 논의되었다.

Table 2. Train location and required power of the test system

| 노드 번호 | 위치 [m] | 요구전력 [P.U.] | 노드 타입 |
|-------|--------|-------------|-------------------|
| 0 | 3743 | | substation A |
| 1 | 8717 | | substation B |
| 2 | 443 | 1.6073 | Train_1/ 역행 |
| 3 | 3123 | -1.301 | Train_0/ 회생 |
| 4 | 3743 | | Sub_A와 상행 전차선 연결점 |
| 5 | 8717 | | Sub_B와 상행 전차선 연결점 |
| 6 | 9825 | 1.5788 | Train_11/ 역행 |
| 7 | 10691 | | Sub_B와 하행 전차선 연결점 |
| 8 | 11147 | 1.6331 | Train_10/ 역행 |
| 9 | 15665 | | Sub_A와 하행 전차선 연결점 |

시험시스템은 2개의 변전소에서 차량에 병렬로 DC 750V 전력을 공급한다. 주행레일의 길이는 9704m 복선이다. 정류기와 급전선 사이 케이블 저항은 0.00035Ω, 주행레일 및 급전선의 저항은 각각 0.007621Ω/km, 0.0067Ω/km이다. 대지누설저항은 10Ω/km로 한다. (Fig. 7 참조)

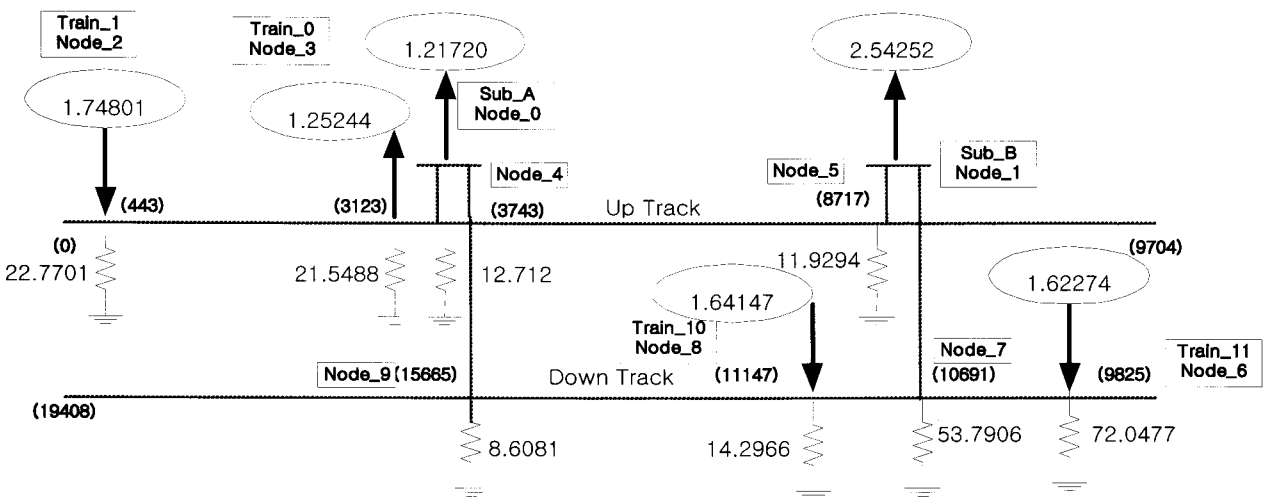


Fig. 8. Equivalent circuit of the test system in which substations and train loads are replaced with the injection current source. These injection currents are obtained from step 3 of algorithm flow diagram of fig. 6

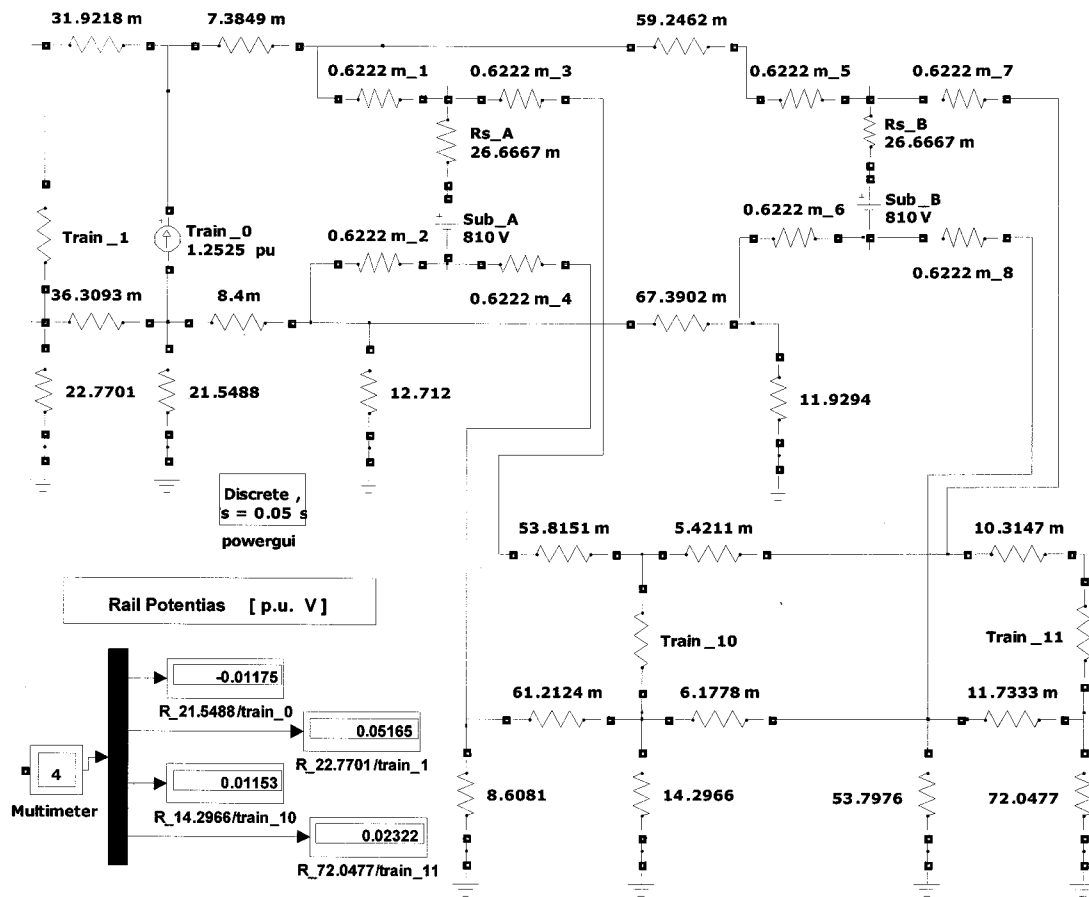


Fig. 9. Equivalent circuit of the test system using SimuLink/SymPower system s/w. Running rail's distributed leakage earth conductance are represented as lumped earth resistances at substation and train locations.

Table 3. Result of the load flow study in step 3 of the algorithm

| 노드 번호 | 전압 [P.U.] | 인제션 전류 [P.U.] | 노드 타입 |
|-------|-----------|---------------|-------------------|
| 0 | 1.047541 | 1.2172 | substation A |
| 1 | 1.012199 | 2.5425 | substation B |
| 2 | 0.919502 | -1.748 | Train_1/ 역행 |
| 3 | 1.038768 | 1.2524 | Train_0/ 회생 |
| 4 | 1.04659 | 0 | Sub_A와 상행 전차선 연결점 |
| 5 | 1.012534 | 0 | Sub_B와 상행 전차선 연결점 |
| 6 | 0.972923 | -1.6227 | Train_11/ 역행 |
| 7 | 1.008701 | 0 | Sub_B와 하행 전차선 연결점 |
| 8 | 0.9949 | -1.6415 | Train_10/ 역행 |
| 9 | 1.046978 | 0 | Sub_A와 하행 전차선 연결점 |

3. 결론

레일전위상승 분석을 위해서는 주행레일의 누설접지저항이 포함되어야 하는데 이 경우 체계적인 컴퓨터 해석 알고리즘 작성이 곤란하다. 우선 루프 방정식을 체계적으로

Table 4. Comparisons between the rail potential rise analysis results using the algorithm and the results using SimuLink symPower s/w

| Node No. | 본 알고리즘에 의한 레일전위 상승분석 [P.U.] | SimuLink/SymPower에 의한 레일전위 상승분석 [P.U.] | Error [%] | Remark |
|----------|-----------------------------|--|-----------|----------|
| 2 | 5.1765E-02 | 5.165E-02 | 0.22 | Train 1 |
| 3 | -1.1623E-02 | -1.175E-02 | 1.08 | Train_0 |
| 6 | 2.3328E-02 | 2.322E-02 | 0.47 | Train_11 |
| 8 | 1.1642E-02 | 1.153E-02 | 0.97 | Train 10 |

세우기 어려우며 루프방정식이 세워져도 초기전류 값을 가정할 수 있는 방법이 없다. 본 알고리즘에서는 레일전위 상승 분석은 누설접지저항을 고려하지 않은 상태에서 시스템을 분석하는 1 단계와 1단계 결과와 레일의 누설접지저항을 추가한 등가회로를 다시 만들어서 레일전위를 분석하는 2단계로 나누어 수행된다. 이렇게 함으로써 루프방정식이 사용하지 않을 수 있었다. 본 알고리즘의 정확도는 본문 2.2항에서의 이론적인 분석과 2.3 항에서의 시험에 의해 보

여 지듯이 최대 1% 정도이다. 레일전위상승 분석의 목적이 시스템 설계나 운영시 최대 레일전위상승을 예측하는 것이 목적인 경우 이러한 오차 수준은 허용된다고 판단된다.

기호 설명

- I_T : 차량 부하전류
- I_N : 주행레일에 흐르는 전류
- R_N : 주행레일의 전기저항
- R_P : DC 전원 공급시스템의 내부저항과 전원공급시스템에서 차량까지의 정극(positive) 급전선의 저항의 합
- R_L : 차량의 유효접지저항
- R_S : 변전소 부극의 유효접지저항
- V_N : 변전소와 차량사이의 주행레일 전위차, 레일의 대지 누설저항이 고려되지 않은 경우
- $V_{N'}$: 변전소와 차량사이의 주행레일 전위차, 레일의 대지 누설저항이 고려되는 경우
- V_{GS} : 변전소 정류기 부극의 전위
- V_{GL} : 차량 위치에서의 레일 전위

V_S : DC 전원 공급시스템의 전압

감사의 글

본 연구는 건설교통부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원(07도시철도표준화A01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Jian Guo Yu B.Sc.(1992), "Computer Analysis of touch voltages and stray currents for DC railways," thesis for Ph.D. University of Birmingham, July.
2. Kinh D. Pham, Palph S. Thomas, Walt E. Stinger(2003), "Operational and safety considerations in designing a light rail DC traction electrification system," pp.171-189, Proceedings 2003 IEEE/ASME Joint Rail Conference.

접수일(2009년 5월 18일), 수정일(2009년 8월 4일),
게재확정일(2009년 9월 23일)