

직류전기철도 급전시스템에서 레일전위 해석을 위한 모델링

(Modeling for the Analysis of Rail Potential in the DC Railway Power System)

조용기* · 최규형

(Woong-Ki Cho · Kyu-Hyoung Choi)

요 약

본 논문은 직류 전기철도 급전시스템에서 레일전위와 누설전류의 분석 기법을 제시하였다. 일반적으로 직류 전기철도 급전시스템에서는 운행용 레일을 귀로 전류(부극성)의 도체로 사용하고 있으므로 레일전위가 발생하고, 특히 차량 운행용 레일과 대지사이의 저항이 작은 경우에는 대지로 흐르는 누설전류가 문제가 된다. 이 레일전위 및 누설전류는 레일 주변에 설치된 지하 매설물에 영향을 미치며, 인체의 안전과도 관련이 있다. 이에 따라 직류 전기철도 급전시스템에서 레일전위와 누설전류를 억제하는 것은 전기철도 주변 환경 및 안전 측면에서 중요한 문제이다.

이상과 같은 관점에서, 직류 전기철도 급전시스템에 대하여 단독급전 및 병렬급전 상황에서 레일전위와 누설전류를 계산할 수 있는 알고리즘을 제안하였으며, 또한 열차주행시뮬레이션(TPS)과 연동하여 열차주행에 따라 부하전류가 변동되는 상황에서 레일전위와 누설전류를 정량적으로 분석할 수 있도록 하였다. 제안한 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였고, 직류전기철도 급전시스템에 대하여 사례 연구를 수행하였다.

Abstract

DC railway power supply system generally uses the running rails as negative-polarity return conductor for traction load current, and the induced rail potential and stray current cause serious problems to any electrified matter in the underground and also safety problems to human body.

This paper presents a new algorithm for the analysis of the rail potential and the stray current in DC railway power system operated under independent/parallel power feeding mode. The effect of load current fluctuation during train operation is also calculated by using TPS(Train Performance Simulation) program to analysis the variation of the railway potential and stray current along railway track. Simulation program is developed based on the proposed algorithm and case studies are provided.

Key Words : DC Electrical Railway, Rail Potential, Stray Current

* 주저자 : 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정, (주)한얼엔지니어링
Tel : 02-2025-2660, Fax : 02-2025-2664, E-mail : wkl@chol.com
접수일자 : 2010년 4월 1일, 1차심사 : 2010년 4월 13일, 심사완료 : 2010년 5월 10일

1. 서 론

전기철도는 공급전원의 종류에 따라 교류전원을 사용하는 방식과 직류전원을 사용하는 방식으로 구분할 수 있으며, 도시철도의 경우에 일반적으로 직류 급전 방식이 채용되어 운전되고 있다. 직류전기철도 시스템에서는 운행을 위한 레일이 일반적으로 전동차 부하에 공급된 전류의 귀로도체(Negative Conductor)로 사용된다. 레일을 귀로전류의 도체로 사용하는 측면에는 별도의 귀로전류 도체를 설치할 필요가 없다는 점에서 경제성을 고려한 것이다. 그러나 선로를 따라 대지위에 설치된 레일은 대지와 절연하여 설치가 되지만, 상당히 긴 거리를 대지와 평행으로 설치되어 있기 때문에 쉽게 레일로부터 대지로 전류가 누설되며, 이 전류가 누설전류(Stray Current or Leakage Current)이다. 이러한 누설전류는 대용량의 차량이 운행되면 부하전류가 커지므로 귀로 도체인 레일에는 상당히 큰 전류가 흐르게 되어 누설전류의 크기도 증가할 뿐만 아니라 누설전류에 의하여 레일의 주변에 설치된 지하 매설물에 전식을 일으키는 원인이 되며, 레일에 나타나는 전위에 의하여 주변에 있는 인체에 위험을 발생시킬 수도 있게 된다. 누설전류의 크기를 감소시키기 위하여 누설저항을 증가시키면 레일의 전위가 상승하게 되고, 레일전위의 상승을 억제하기 위하여 누설저항을 감소시킬 경우에는 누설전류가 커져서 레일의 주변에 설치된 지중 매설물에 전식을 일으키는 원인이 되므로 레일의 전위와 누설전류의 크기를 적절하게 유지하는 것이 중요한 문제이다.

직류전기철도 급전시스템에서 레일전위와 누설전류의 크기는 철도시스템의 운전 전압, 레일의 저항, 급전 변전소 사이의 거리 및 접지저항의 크기 등에 의하여 결정되며, 특히 차량 부하의 운전 상태(기동, 운전 및 정지 등)와 운전 위치 등에 의하여 크게 변화한다[1]. 이러한 직류전기철도 급전시스템에서 누설전류와 레일의 전위를 계산하기 위한 방법은 등가회로부터 간단하게 크기를 결정하는 방법[2-3]과 급전시스템을 분포정수회로로 등가화하여 전과방정식으로 구하는 방법[4-5], 직류전기철도 급전시스템의 등가회로에서 전력조류계산법으로 결정하는 방법[6-7] 등이 있다.

본 논문에서는 직류전기철도 급전시스템에서 누설 저항의 크기 및 차량 부하의 위치에 따른 급전, 레일 및 누설전류의 변화에 대하여 직류전기철도 급전시스템을 등가회로로 간략화하고, 간략화된 등가회로에 대하여 노드방정식으로 유도하여 해석하는 모델식을 유도하였으며, 유도된 모델식을 적용하여 해석 모델에 대한 프로그램을 개발하고 사례 시스템에 대하여 사례 연구를 수행하였다.

2. 접지방식별 레일전위 분포와 누설 전류

직류전기철도 급전시스템에서 접지방식은 누설전류의 크기와 레일의 전위 상승을 억제하여 인체의 위험 전압(접촉전압과 보폭전압)을 효과적으로 제어하기 위한 목적으로서 레일과 대지 사이의 누설저항과 더불어 매우 중요한 기능을 가지고 있다. 일반적으로 직류전기철도 급전시스템의 접지방식은 누설전류의 최소화와 인체 및 설비의 안전 확보 조건을 만족시키기 위한 대책으로 결정된다

2.1 비접지방식

직류전기철도 급전시스템에서 귀로전류(부극성) 도체인 레일과 대지를 접속하지 않는 방식으로서 등가적으로 접지방식보다 4배 정도 작은 누설전류가 발생한다. 레일전위는 차량위치(부하점)에서 대지전위보다 높은 양극성(+) 레일전위가 나타나고, 변전소 위치에서 대지전위보다 낮은 음극성(-) 레일전위가 나타난다. 직류전기철도 급전시스템에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 접지방식이다. 레일전위의 극성에 따라 누설전류도 방향이 다르게 나타난다.

2.1.1 비접지(Ungrounded or Floating) 단독급전 방식

그림 1에 보인 바와 같이 비접지 방식의 단독 급전 시스템에서 레일전위는 차량(부하)의 위치에서는 양극성(+)으로 급전점인 변전소에서는 부극성(-)으로 최대 레일전위의 값을 나타내며, 변전소와 차량 사이

의 거리에 비례하는 특성을 나타낸다. 레일전위를 저감시키기 위하여 부하전류와 레일의 저항을 감소시키고, 변전소의 간격을 단축하여야 한다.

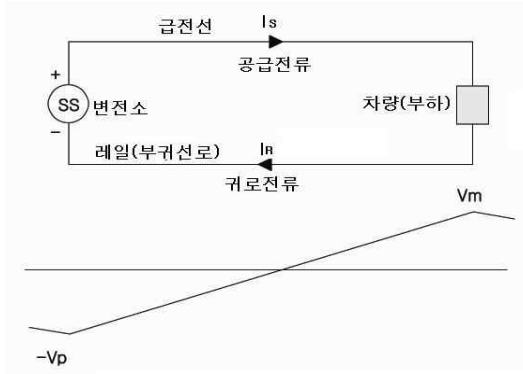


그림 1. 비접지 단독급전방식의 레일전위 분포
Fig. 1. Rail Potential of One Supply S/S

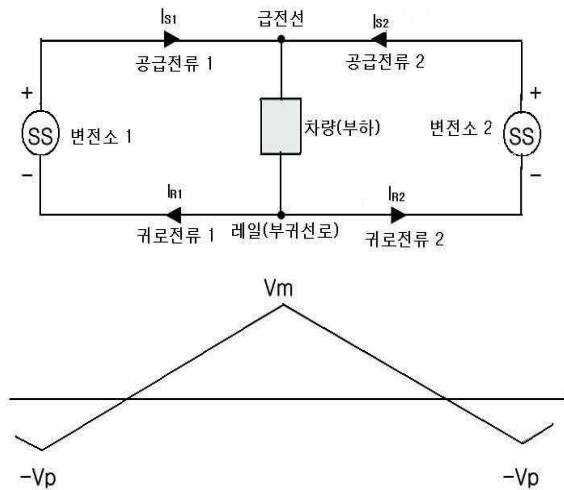


그림 2. 비접지 병렬 급전방식의 레일전위 분포
Fig. 2. Rail Potential of Two Supply S/S

2.1.2 비접지(Ungrounded or Floating) 병렬급전 방식

비접지 방식의 단독 급전시스템과 마찬가지로 레일 전위는 차량(부하)의 위치에서는 양극성(+)으로 급전 점인 변전소에서는 부극성(-)으로 최대 레일전위의 값을 나타내며, 변전소와 차량사이의 거리에 비례하는 특성을 나타낸다. 그림 2는 비접지 병렬급전 방식의

예를 보인 것으로서, 레일의 전위를 저감시키기 위하여 부하전류와 레일의 저항을 감소시키고, 변전소의 간격을 단축하여야 한다.

2.2 접지(Solid Grounding) 방식

직류전기철도 급전시스템에서 각 변전소의 귀로전류(부극성) 도체인 레일을 접지시스템과 매우 작은 저항을 갖도록 하여 연결하는 방식이다. 이 방식은 운전 레일이 대지와 평행으로 설치되어 부극성의 귀로가 효과적으로 형성이 되지만 누설전류가 증대되어 운행하고 있는 차량의 주변에 매설되어 있는 시설물에 대하여 전식을 발생할 확률이 높아진다. 레일의 전위는 차량(부하)의 위치에서 비접지방식보다 2배 정도의 전위가 나타나며, 변전소 위치에서는 레일전위가 0[V]이다. 그림 3은 접지방식의 레일전위 분포를 나타낸 것이다.

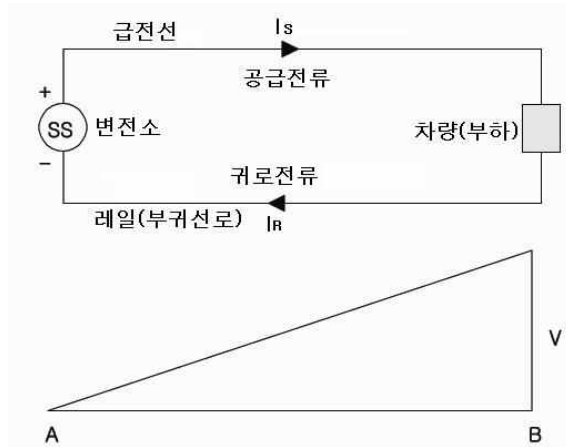


그림 3. 접지방식의 레일전위 분포
Fig. 3. Rail Potential of Solid Grounding

3. 급전시스템의 모델링

직류전기철도 급전시스템에서 누설전류의 분포를 계산하기 위해서는 급전용 변전소 사이의 거리, 레일의 저항, 접지방식, 차량의 위치나 레일의 조건 등과 같은 많은 파라미터를 알아야 한다.

3.1 단독급전 등가회로 모델

그림 4는 간략화된 직류전기철도 급전시스템의 등가회로를 보인 것으로서, 급전용 변전소와 차량이 연결된 상태이다[7].

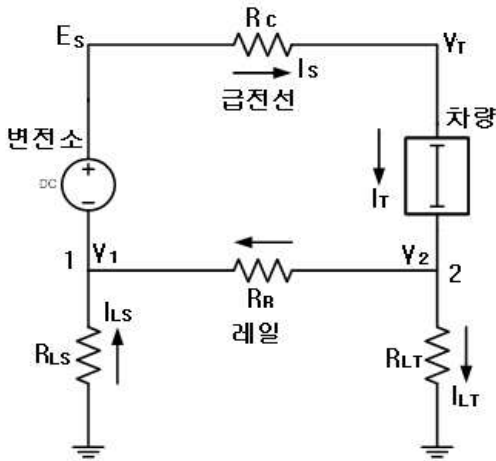


그림 4. 직류전기철도 급전시스템의 간략 등가회로
Fig. 4. Simple Equivalent Circuit of DC Railway System

그림 4의 직류전기철도 급전시스템의 등가회로에서 차량부하를 P [W]라고 하면 변전소에서 공급되는 전압 E_s 와 차량 부하전압 V_T 의 관계는 다음 식 (1)과 같이 표현된다. 따라서 변전소 공급전압 E_s 는 차량 부하전압 V_T 에 의하여 결정되는 종속전원이다.

$$E_s = V_T + R_C I_s \quad (1)$$

- 여기서, E_s : 변전소 공급전압
- V_T : 차량 부하전압
- I_s : 변전소 공급전류
- R_C : 급전선 저항

그림 4의 등가회로에서 노드 방정식을 유도하여 노드 전압 V_1 과 V_2 에 대하여 정리하면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_{LS}} + \frac{1}{R_R}\right) & -\frac{1}{R_R} \\ -\frac{1}{R_R} & \left(\frac{1}{R_R} + \frac{1}{R_{LT}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_C}(E_s - V_T) \\ \frac{1}{R_C}(E_s - V_T) \end{bmatrix} \quad (2)$$

- 여기서, V_1 : 노드 1의 전압
- V_2 : 노드 2의 전압
- R_{LS} : 급전용 변전소에서 누설저항
- R_C : 급전선 저항
- R_{LT} : 부하점(차량)에서 누설저항
- R_R : 레일 저항

식 (2)에서 각각의 노드 전압 V_1 과 V_2 를 구하면 레일을 통하여 흐르는 귀로전류 I_R 과 누설전류 $I_{LT} = I_{LS}$ 를 구할 수 있다.

$$I_{LS} = \frac{V_1}{R_{LS}} = \frac{V_2}{R_{LT}} \quad (3)$$

$$I_R = \frac{V_2 - V_1}{R_R} \quad (4)$$

3.2 병렬급전 등가회로 모델

직류전기철도 급전시스템은 변전소를 양쪽에 배치하고 변전소사이에서 차량(부하)이 운전되는 방식이 일반적이다. 따라서 그림 4의 간략화된 단독급전 방식의 등가회로에 의해서는 실제의 직류전기철도시스템에 대한 시뮬레이션을 통하여 레일전위의 분포나 누설전류를 계산하기가 어렵다. 물론 그림 4의 단순화된 직류전기철도 급전시스템의 등가회로에서는 식 (3)과 (4)에 의하여 레일의 귀로전류와 누설전류 등을 간단하게 구할 수 있으나, 직류전기철도 급전시스템이 매우 복잡한 사다리꼴의 등가회로로 모델링되면 여러 가지의 값(전류)을 구하는 문제는 단순한 계산 과정에 의하여 구할 수 있는 것이 아니며, 복잡한 계산 과정을 필요로 하기 때문에 일반적인 전기철도 급전시스템에 대한 해석을 위해서는 모델링이 필요하다.

본 논문에서는 일반적인 직류전기철도 급전시스템을 모델링하기 위하여 그림 5와 같은 등가회로를 제안

하였다. 급전선의 선로저항은 집중정수 회로로 표시하고, 부극성(-)인 귀로전류의 통로인 레일의 저항은 분포정수 회로로, 레일과 대지사이의 누설저항도 분포정수 회로로 표시하였다.

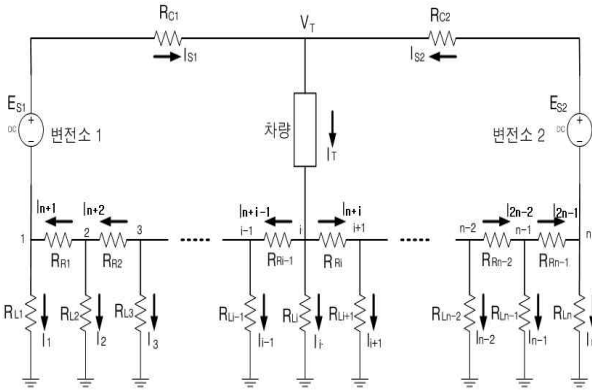


그림 5. 직류전기철도 급전시스템의 등가회로
Fig. 5. Equivalent Circuit of DC Railway Power System

그림 5의 직류전기철도 급전시스템의 등가회로에서 차량부하를 $P [W]$ 라고 하면 각각의 변전소로부터 공급되는 전압 E_{S1} 과 E_{S2} , 차량 부하전압 V_T 의 관계는 다음 식 (5)와 같이 표현되며, 차량에 공급되는 부하전압 V_T 는 각 변전소로부터 공급되는 전압이 같아야 하므로 각각의 변전소 공급전압 E_{S1} 과 E_{S2} 는 차량 부하전압 V_T 에 의하여 결정되는 종속전원이다.

$$E_{S1} = V_T + R_{C1} I_{S1} \quad (5)$$

$$E_{S2} = V_T + R_{C2} I_{S2}$$

- 여기서, E_{S1}, E_{S2} : 각 변전소의 공급전압
- V_T : 차량 부하전압
- I_{S1}, I_{S2} : 각 변전소의 공급전류
- R_{C1}, R_{C2} : 각 급전선의 저항

각각의 노드에 대하여 전류방정식을 유도하고, 각 노드의 전압에 대하여 식 (2)와 같은 방법으로 정리하면 식 (6)의 선형 대수 방정식이 된다.

$$[G] [V] = [b] \quad (6)$$

여기서, $[G]$: 급전시스템 콘덕턴스 행렬

$$G_{ii} = \sum_{j=1}^n g_{ij} : \text{각 노드에 연결된 콘덕턴스의 합}$$

$$G_{ij} = -g_{ij} : \text{노드와 노드 사이의 콘덕턴스}$$

$[V]$: 노드 전압 벡터

$[b]$: 공급 전류 벡터

공급 전류벡터 b 는 각 변전소가 연결된 노드에서 식 (5)에 의하여 각각

$$b_1 = -\frac{1}{R_{C1}} (E_{S1} - V_T) \quad (7)$$

$$b_n = -\frac{1}{R_{C2}} (E_{S2} - V_T) \quad (8)$$

및 차량이 위치한 노드에서

$$b_i = \frac{P_0}{V_T} \quad (9)$$

여기서, P_0 : 차량 부하 전력이며, 나머지 노드에서는 0이다.

공급 전류벡터 b 에서 각각의 요소 값을 식 (7)과 (8)에서 각 변전소의 공급전압 E_{S1} 과 E_{S2} 의 초기값을 가정하여 식 (6)으로부터 급전시스템 콘덕턴스 행렬의 역행렬에 의하여 각 노드의 전압을 구하고, 각 변전소의 공급전압 E_{S1} 과 E_{S2} 을 수정하는 반복 계산에 의하여 수렴이 되면 각각의 점에서 누설전류가 계산된다.

그림 6은 누설전류를 구하는 계산과정의 흐름도를 보인 것이다.

4. 사례 연구

직류전기철도 급전시스템의 접지방식에 대하여 모든 설비가 공통접지방식을 도입한 것으로 가정하고 주행레일을 귀로회로(부극성)로 사용하며, 대지와는 비접지 상태로 운전되는 직류전기철도 급전시스템의

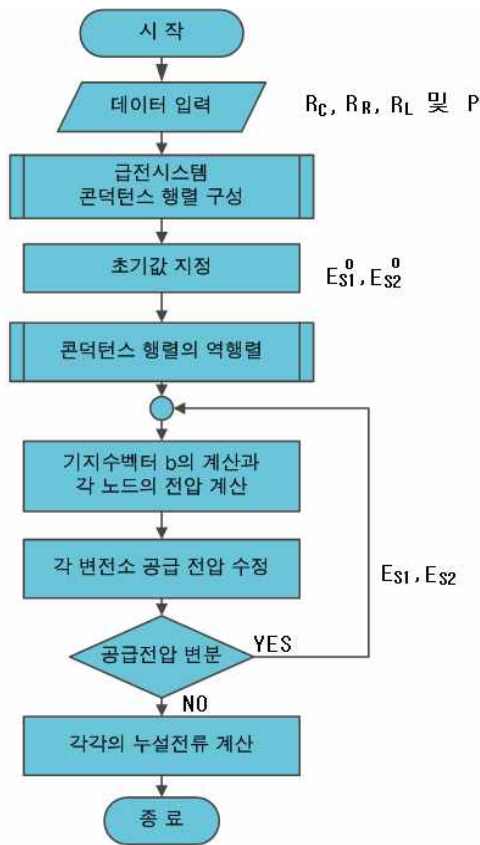


그림 6. 급전시스템 계산의 흐름도
Fig. 6. Flowchart of Simulation

차량부하의 위치에 따른 레일의 누설전류 분포를 본 논문에서 제안한 모델링에 의하여 계산하는 사례연구를 수행하였다.

4.1 급전시스템의 회로 모델

그림 7은 사례연구를 위한 병렬급전방식의 직류전기철도 급전시스템 회로 모델을 보인 것이다. 전기철도 급전시스템의 주행레일의 전기저항은 $0.0148[\Omega/\text{km}]$ 이고, 가공 급전선의 저항은 $0.0203[\Omega/\text{km}]$ 이다. 전기철도 급전시스템은 $4[\text{km}]$ 의 거리를 두고 급전변전소가 있으며, 전기철도 차량이 $1.5[\text{km}]$ 지점에 위치했을 때 차량부하는 약 $5,200[\text{kW}]$ 의 전력을 소비하는 상태를 가정하였다.

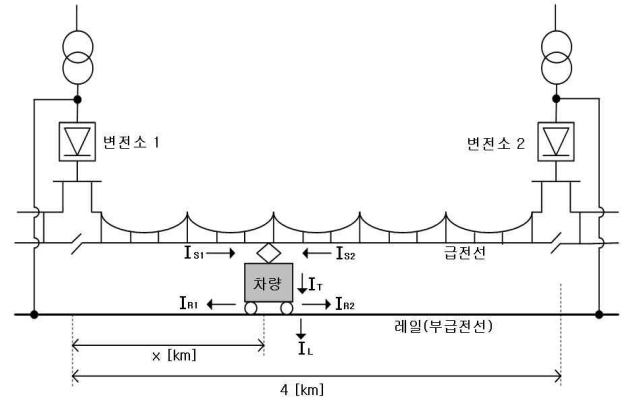


그림 7. 직류철도 급전시스템 모델
Fig. 7. Modeling of DC Railway Power System

4.2 시뮬레이션 조건

직류전기철도시스템에서 전차선/급전선의 운전 전압은 $1,500[\text{V}]$ 이고, 총 운전선로의 길이는 $4[\text{km}]$ 인 경우를 상정하였으며, 급전선 및 $60[\text{kg}]$ 의 레일에 대한 저항은 각각 $0.0203[\Omega/\text{km}]$ 및 $0.0148[\Omega/\text{km}]$ 으로 상정하였다.

또한, 레일의 누설저항은 $1[\Omega/\text{km}]$, $10[\Omega/\text{km}]$ 및 $100[\Omega/\text{km}]$ 의 세 가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 하였으며, 차량부하의 위치는 $1.5[\text{km}]$ 지점에 위치한 경우를 상정하였다.

4.3 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 알고리즘으로 시뮬레이션 프로그램을 작성하였으며, 직류전기철도 급전시스템에서 누설저항의 변화에 대하여 전기철도의 차량부하의 위치에 따른 급전전류와 누설전류의 분포를 계산하는 시뮬레이션을 하였다.

4.3.1 누설저항의 변화에 대한 급전전류의 분포

그림 8은 차량부하가 $1.5[\text{km}]$ 지점에 있고, 레일의 누설저항이 $1[\Omega/\text{km}]$, $10[\Omega/\text{km}]$ 및 $100[\Omega/\text{km}]$ 으로 변화시킨 경우에 대한 레일의 전류분포를 계산한 결과

이다. 레일의 누설저항의 변화에 따라 레일을 통하여 전원으로 흐르는 부극성 전류의 흐름이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 레일과 대지와의 누설저항의 크기에 따라 레일의 누설전류가 달라지기 때문에 레일의 전류분포가 많이 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉, 레일 누설저항이 커지면 누설전류가 작아져서 레일의 전류가 일정해지는 것을 볼 수 있다. 레일의 누설저항은 1 [Ω /km]로 작기 때문에 레일을 통해 누설되는 전류가 상대적으로 커서 거리에 따른 레일전류 크기가 크게 변하는 것을 볼 수 있다. 급전선으로부터 공급되는 부하전류는 차량부하와 가까운 변전소로부터 더 많이 공급받고, 먼 쪽 변전소로부터의 공급 부하전류는 상대적으로 작아지는 것을 확인할 수 있다.

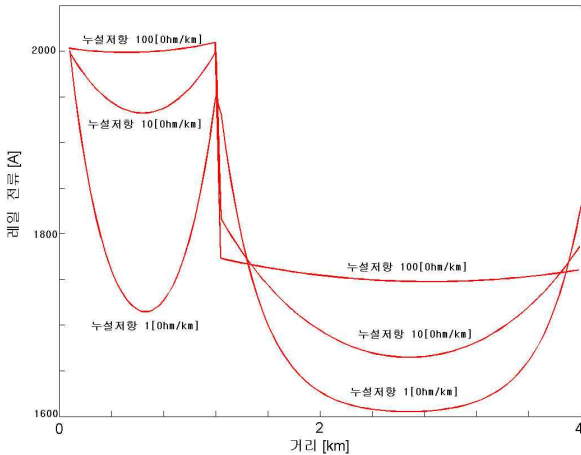


그림 8. 누설저항의 변화에 대한 레일전류 분포 변화
Fig. 8. Variation of Rail Current by Leakage Resistance

4.3.2 누설저항의 변화에 대한 누설전류의 분포

그림 9, 그림 10 및 그림 11은 사례연구 대상 직류전기철도 급전시스템에서 차량부하가 1.5[km] 지점에 위치한 경우에 누설저항의 변화에 따른 레일의 누설전류 밀도(100[m]당 누설전류)를 계산한 결과이다. 차량부하가 위치한 지점의 누설전류가 가장 크고, 급전용 변전소 부근에서는 누설전류 방향이 반대가 되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 사례연구 대상 급전시스템이 비접지 방식인 경우에 나타나는 현상을 확

인할 수 있는 내용이며, 누설저항의 크기에 반비례하여 누설전류의 크기가 감소하는 것도 확인할 수 있다.

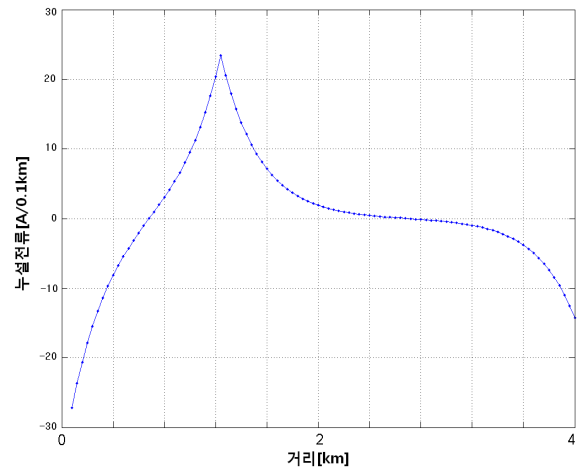


그림 9. 누설전류의 분포(1[Ω /km])
Fig. 9. Distribution of Stray Current(1[Ω /km])

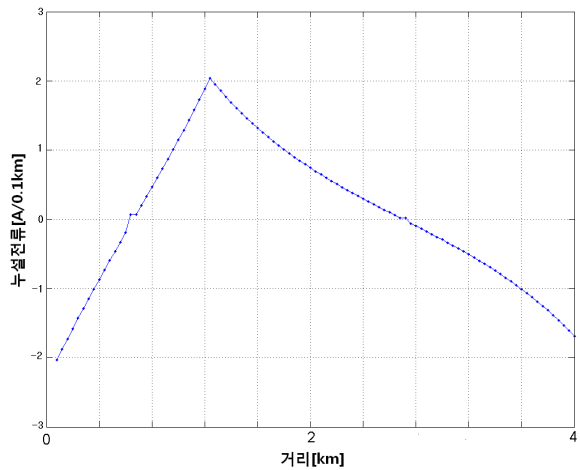


그림 10. 누설전류의 분포(10[Ω /km])
Fig. 10. Distribution of Stray Current(10[Ω /km])

4.4 연속적으로 운전하는 경우의 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 알고리즘으로 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 직류전기철도 급전시스템에서 차량부하의 위치변화에 따른 차량의 운행조건을 고려한 TPS(Train Performance Simulation) 시뮬레이션 결과를 적용하여 차량부하의 위치에 따른 급전

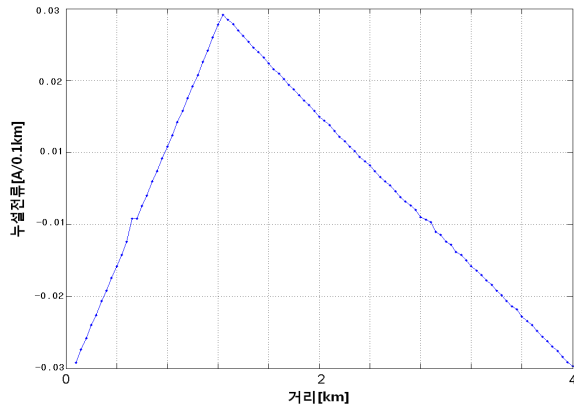


그림 11. 누설전류의 분포(100[Ω/km])
Fig. 11. Distribution of Stray Current(100[Ω/km])

전류와 누설전류의 변화를 검토하였다. TPS는 열차의 견인성능과 하중, 주행저항 등의 제원과 선로의 구배, 곡선 조건들을 고려하여 열차운행시 주행속도 및 소비전력을 시뮬레이션하는 프로그램이다.

그림 12는 사례 연구 대상 직류전기철도 급전시스템에서 0부터 4[km] 구간에서 기동, 역행 및 정지의 운전을 반복하여 운행하는 경우에 위치별 부하전류와 양쪽 급전변전소에서 공급되는 급전전류의 크기를 보인 것으로서, 차량의 위치와 가까운 급전변전소로부터 공급 전류의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다.

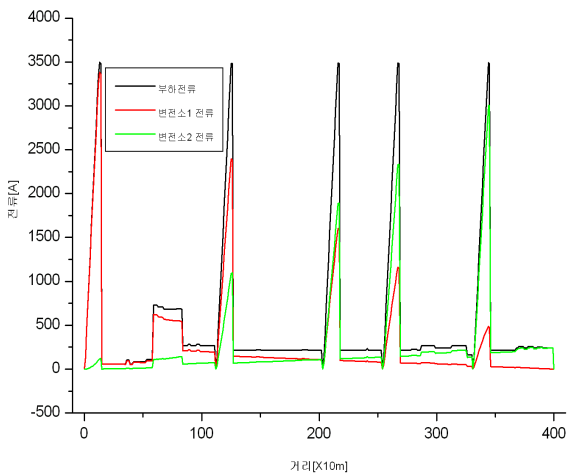


그림 12. 부하전류 및 각 급전전류의 변화
Fig. 12. Load and each Supply Current

그림 13은 연속적으로 운행하는 경우에 대한 누설전류의 크기를 차량의 위치별로 나타낸 것으로서 기동 및 역행 등으로 부하전류의 크기가 증가하면 누설전류의 크기도 증가하는 것을 확인할 수 있다.

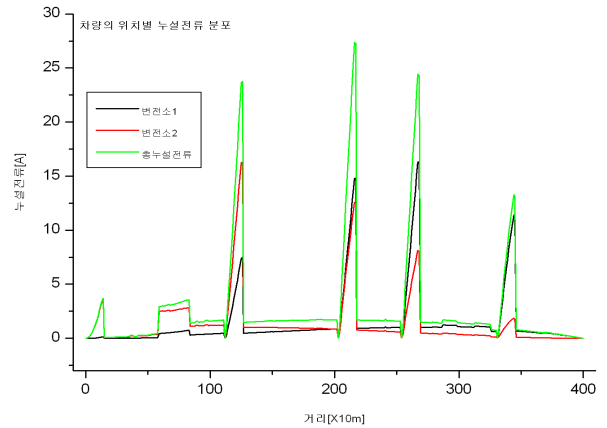


그림 13. 차량의 위치별 누설전류 분포
Fig. 13. Variation of Leakage Current by Position

5. 결 론

직류전기철도 급전시스템에서 부하전류의 귀로도체(부극성)로 레일을 사용하는 경우에 비접지방식을 채택한 급전시스템에서 공급전류 및 누설전류의 분포를 계산할 수 있는 수학적 모델링을 수립하였으며, 제안된 급전시스템의 공급전류, 누설전류 및 레일전위 해석을 위한 알고리즘을 이용하여 프로그램을 개발하고 사례연구 대상 급전시스템에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

- 1) 레일을 귀로(부극성)로 사용하는 직류전기철도 급전시스템에서 차량부하의 위치에 따라 각각의 변전소에서 공급되는 전류, 누설전류 및 레일전위 등을 해석을 위한 등가회로에 대하여 단순한 방법에 의한 알고리즘을 제안하였다.
- 2) 제안된 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 사례연구 대상 급전시스템을 설정하여 시뮬레이션한 결과 누설저항의 변화에 따라 누설전류의 변화 및 레일전류의 변화 등을

확인하였다.

- 3) 시뮬레이션 결과에 의하면 레일의 전위에 영향을 가장 많이 미치는 누설전류는 레일과 대지와 누설저항에 의한 것을 확인하였으며, 누설저항의 크기에 따라 누설전류의 크기도 크게 변화하는 것을 확인하였다.
- 4) 일정한 구간에서 운행하고 있는 차량부하에 대한 시뮬레이션 결과, 차량부하 위치에 따라 가까운 변전소에서 많은 부하전류를 공급받는 것을 확인하였으며, 부하차량의 위치에 따라서는 공급 변전소로부터 거리가 멀어질수록 누설전류의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 직류전기철도 급전시스템에 대한 누설전류 및 레일전위의 해석을 위하여 새로운 알고리즘을 제안하였으나, 추후 좀 더 세밀한 시뮬레이션을 위한 직류전기철도 급전시스템의 시뮬레이션 프로그램을 개발할 필요성이 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] K. D. Pham, R. S. Thomas and W. E. Stinger, "Analysis of stray current, track-to-earth potentials and substation negative grounding in DC traction electrification system", Proceedings of the 2001 IEEE/ASME Joint Railroad Conference, pp. 141~160, 2001.
- [2] Jian Guo Yu B. Sc, "Computer Analysis of touch voltages and stray currents for DC railways", Thesis for Ph.D. University of Birmingham, 1992.

- [3] C. S. Chang and L. F. Tian, "Worse-case identification of touch voltage and stray current of DC railway system using genetic algorithm", IEE Proc. Electrical Power Application, Vol. 146, No. 5, pp. 570~576, 1999.
- [4] Li Guoxin, Zhang Dongliang, etc., "Research on real-time measurement of key parameters of stray current in DC Traction system", Proc. of the 2009 IMSA, Nov. 21-22, 2009.
- [5] M. Niasati and A. Gholami, "Overview of stray current control in DC railway systems", International Conference on Railway Engineering 2008. pp. 1~6, ICRE 2008.
- [6] Bih-Yuan Ku, Jen-Sen Liu, "Solution of DC Power Flow for Non-grounded Traction Systems Using Chain-Rule Reduction of Ladder Circuit Jacobian Matrices", Proc. of the 2002 ASME/IEEE, Apr. 23-25, 2002.
- [7] Bih-Yuan Ku, Thomas Hsu, "Computation and Validation of Rail-to-Earth Potential for Diode-Grounded DC Traction System at TAIPEI Rapid Transit System", Proc. of the 2004 ASME/IEEE, Apr. 6-8, 2004.

◇ 저자소개 ◇



조용기(趙雄基)

1953년 12월 5일생. 2001년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2003년 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 졸업(석사). 2005년 동대학원 박사과정 수료. 1992년 3월~(주)한얼엔지니어링 대표.



최규형(崔圭亨)

1959년 1월 31일생. 1981년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 北海道 대학 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 8월~2005년 2월 한국철도기술연구원 수석연구원. 2005년~서울산업대학교 철도전기신호공학과 교수.