

직류전기철도 급전시스템에서 공급 및 누설전류 분포에 관한 연구

(A Study on the Supply and Stray Current Distribution of the DC Railway Power System)

조웅기* · 최규형

(Woong-Ki Cho · Kyu-Hyoung Choi)

요 약

본 논문은 직류전기철도 급전시스템에서 누설전류와 변전소로부터 공급되는 전류의 분포에 대하여 다루었다. 일반적으로 직류전기철도 급전시스템에서는 운행용 레일을 귀로 전류(부극성)의 도체로 사용하고 있으며, 이러한 조건은 추가적인 도체의 설치를 필요로 하지 않기 때문에 경제성을 고려한 것이다. 그러나 운행용 레일과 대지 사이의 저항이 작은 경우에는 대지로 흐르는 누설전류가 문제가 된다. 이 누설전류는 레일 주변에 설치된 지하 매설물에 영향을 미치며, 인체의 안전과도 관련이 있다. 따라서 직류전기철도 급전시스템에서 누설전류를 억제하는 것은 차량의 운전이나 안전 측면에서 중요한 문제이다.

본 논문에서는 직류전기철도 급전시스템에 대하여 CDEGS의 SPLIT 프로그램을 이용하여 레일의 전류 분포를 시뮬레이션하였고, 레일의 누설저항 크기에 따른 누설전류 변동치를 도출하였다.

Abstract

This paper presents the analysis of the current as stray current and supplied current of the substation, on the DC railway power system. In DC railway power supply system, the running rails are usually used as the return conductor(negative-polarity) for traction load current. This condition mainly focuses on economic considerations, since it does not require the installation of an additional return conductor. But, problems of low resistance between the running rails for the return conductor and earth allows a significant part of the return load current to leak into the earth. This current is normally called to as leakage or stray current. This stray currents creates serious problems for any electrified matter in the underground. Therefore, reduction of stray current of the DC railway power supply system is also of direct benefit to the operational and safety aspects of the DC railway systems.

In this paper, deal with the analysis of the current distribution on the DC railway power system applied the common grounding system, using SPLIT of CDEGS program.

Key Words : DC Railway Power System , Stray Current, SPLIT of CDEGS Program

* 주저자 : 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정, (주)한일엔지니어링
Tel : 02-2025-2660, Fax : 02-2025-2664, E-mail : wkl@chol.com
접수일자 : 2010년 4월 13일, 1차심사 : 2010년 4월 15일, 심사완료 : 2010년 5월 4일

1. 서 론

전기철도가 1880년대에 처음으로 독일에서 개발된 이후에 연료의 절약, 합리적인 전기에너지의 이용 및 철도의 경영개선 등의 관점에서 전철화에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 최근에는 세계적으로 환경에 대한 이슈화가 진행되면서 기존의 철도에 대한 전철화가 더욱더 큰 이슈가 되고 있다.

직류전기철도 시스템에서 운영을 위한 레일이 일반적으로 전동차 부하에 공급된 전류의 귀로 도체(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. 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 크기 및 레일 전위는 급전시스템의 전압, 레일의 저항, 급전용 변전소 사이의 거리, 접지저항 및 누설저항의 크기 등에 따라 변화하며, 특히 차량부하의 크기와 차량의 위치에 따라 변화하게 된다[1].

따라서 레일을 귀로전류의 도체로 사용하는 직류전기철도 급전시스템에서 누설전류와 인체의 위험을 방지하기 위하여 접지방식을 도입하게 되었다. 일반적으로 직류전기철도 급전시스템의 접지방식은 직접접지방식(Bonded System)과 비접지방식(Floating System)이 있으며, 직류전기철도의 최초에는 비접지방식을 주로 사용하였지만 최근에는 레일의 전위와 누설전류에 의한 문제를 방지하기 위하여 직접접지방식을 사용하고 있다. 그림 1은 직류전기철도 급전시스템에서 운영을 위한 레일을 귀로 도체로 사용되는 개요[2]를 보인 것이며, 그림 2는 직류전기철도 급전시

스템에서 직접 접지방식과 비접지방식에 대한 접지방식별 레일전위의 형태를 보인 것이다[3].

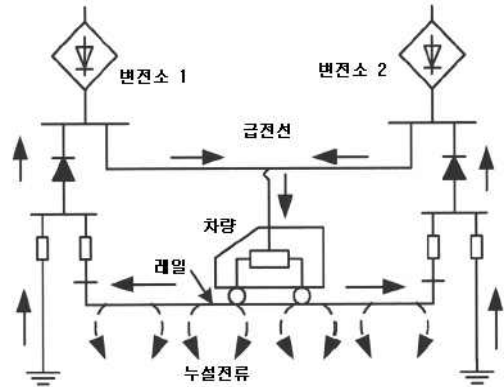


그림 1. 직류철도 급전시스템
Fig. 1. Distribution System of DC Rail Way

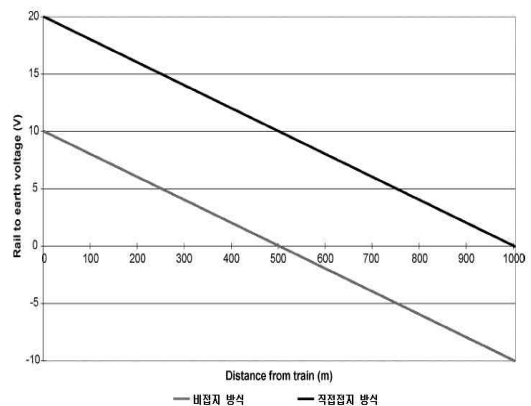


그림 2. 접지방식별 레일 전위
Fig. 2. Rail Potential by Grounding Method

최근에는 직류전기철도급전시스템에서 레일전위와 누설전류의 크기를 감소시키기 위하여 귀로용 레일과 접지전극 사이에 다이오드를 삽입하는 다이오드 방식과 사이리스터를 삽입하는 레일보호제어장치(RPCD : Rail Protection Control Device) 방식 등이 개발되어 사용되고 있다.

본 논문에서는 직류전기철도 급전시스템에서 접지방식에 대하여 정리하고, 공통접지 방식을 채택하는 직류철도 급전시스템에서 누설저항의 크기 및 차량부하의 위치에 따른 급전, 레일 및 누설전류의 변화에

대하여 캐나다 SES(Safe Engineering Services & technologies Ltd.)사의 접지시스템 해석 및 과도해석용 프로그램인 CDEGS(Current Distribution, Electromagnetic interference, Grounding and Soil structure analysis)의 SPLIT(Simulation of Power Lines & Terminal Stations) 프로그램[4]을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다.

2. 직류전기철도의 접지방식

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 다음 두 가지의 조건을 만족시키기 위하여 결정된다.

- 누설전류의 최소화
- 인체 및 설비의 안전 확보

전기철도 급전시스템의 접지방식은 접지를 필요로 하는 설비들에 대하여 각각의 설비를 별도로 접지하는 독립접지 방식과 모든 접지대상 설비를 같은 접지전극에 연결하는 공통접지 방식으로 구분할 수 있으며, 급전시스템의 변전소에서 귀로전류(부극성) 도체인 레일과 급전용 변전소를 연결하는 방식에 따라서 직접 접지방식, 비접지방식 및 다이오드 접지방식 등으로 구분할 수 있다[2, 5-6].

2.1 직접 접지방식

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 전식이 발생할 확률이 높아진다. 따라서 철도 급전용 변전소 근처의 지하 매설물과 차량 주변의 지하 매설물을 전기적으로 연결(본딩)하여 누설 직류전류의 전식

효과를 방지하여야 한다. 이 방식은 과거에 사용하던 접지방식으로서 최근에 직류전기철도 급전시스템의 접지방식에서는 채택하고 있지 않다.

2.2 비접지(Ungrounded or Floating) 방식

급전 변전소에서 귀로전류(부극성) 도체인 레일과 대지를 접속하지 않는 방식으로서, 정상 상태 및 이상 상태에서 항상 비접지 상태가 유지된다. 등가적으로 접지방식보다 4배 정도 작은 누설전류가 발생한다. 그러나 특히 급전선의 지락 고장 발생 시에 대지에 대하여 차량이나 운전 레일에 직류 전압이 상승하여 승객이나 운전원들에 대하여 위험을 초래할 수 있다. 이 방식은 특히 비정상 고장 상태에서 안전 때문에 현재는 채택되고 있지 않은 접지방식이다.

2.3 다이오드접지(Diode-Grounded) 방식

급전용 변전소에서 귀로전류(부극성) 도체인 레일과 대지 사이에 다이오드를 삽입하여 접지하는 방식으로, 레일주변에 금속 메쉬를 연속적으로 설치하여 급전용 변전소의 접지전극과 연결하는 경우에 금속메쉬 연결선과 접지전극을 다이오드를 통하여 접속하게 된다. 다이오드는 낮은 저항으로 연결하여 레일로부터 누설되어 대지로 흐르려는 누설전류를 방지하는 역할을 하게 된다. 그림 3은 이러한 원리에 의한 직류전기철도 급전시스템에 대한 다이오드접지 방식의 한 예를 보인 것이다.

누설전류의 크기를 감소시키기 위하여 다이오드접지 방식은 직접 접지방식을 개선하였지만, 다이오드가 누설전류의 통로 역할을 하기 때문에 레일 전위와 누설전류의 문제점은 그대로 존재하게 된다. 따라서 다이오드접지 방식과 비슷한 ‘자동 접지 스위칭 방법’과 ‘사이리스터접지 방법’이 개발되었으며, 정극성의 급전선이 지락 고장에 의하여 부극성 레일의 전위상승이 한계값인 60[V] 이상이 될 때까지는 비접지방식의

정상적인 운전 조건으로 동작되는 방식이다. 즉 부극성의 이상전압이 설정된 이상전압의 한계값 이내인 경우에는 정상적인 동작을 하게 되기 때문에 비접지 방식이 되어 누설전류가 최소화 되는 것이다.

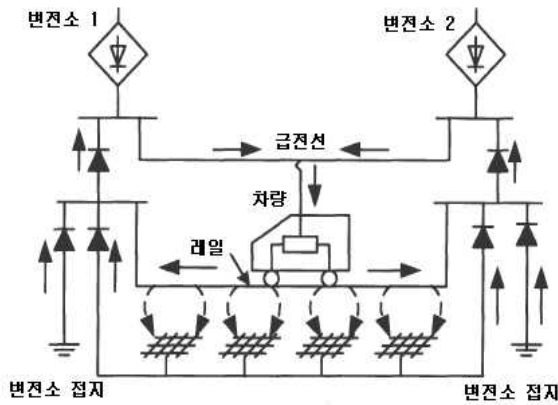


그림 3. 다이오드 접지방식
Fig. 3. Diode-Floating Grounding

3. 직류전기철도에서 공통접지시스템

직류전기철도에서는 전원과 운행차량의 위치 등에 따라 전차선에 흐르는 공급전류 또는 귀선회로 전류 등에 의하여 전자계 현상이 발생하기 때문에 위험전압으로부터 설비나 인체를 보호하기 위한 대책이 필요하다. 이러한 대책의 일환이 되는 것이 전기철도 급전시스템의 접지시스템이며, 각각의 설비에 대한 접지를 개별로 구성하느냐 혹은 통합적으로 연결하느냐에 따라 개별접지시스템과 공통접지시스템으로 구분할 수 있다.

일반적으로 직류전기철도 급전시스템에서 귀선회로는 접지설비와 절연이 되어 있으며, 급전시스템의 중·저압기기의 보호접지, 신호설비 및 통신설비의 보호접지 및 피뢰설비 접지 등의 모든 접지를 서로 연결된 공통접지시스템을 적용하게 되면 급전 전류나 귀선 전류 등에 의한 유도작용이 상호 연계가 되어 유도전압 등이 감소하게 된다.

그림 4는 전기철도 급전시스템에서 공통접지시스템의 개념을 보인 것이다.

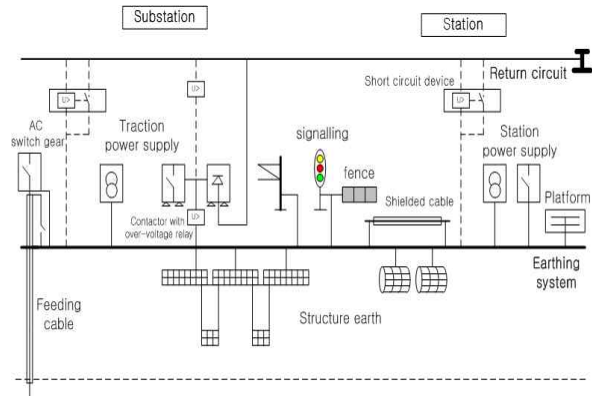


그림 4. 직류전기철도의 공통접지시스템
Fig. 4. Common Grounding System

4. 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.

그림 5는 간략화된 직류전기철도 급전시스템의 등가회로를 보인 것으로서, 급전용 변전소와 차량이 연결된 상태이다[7].

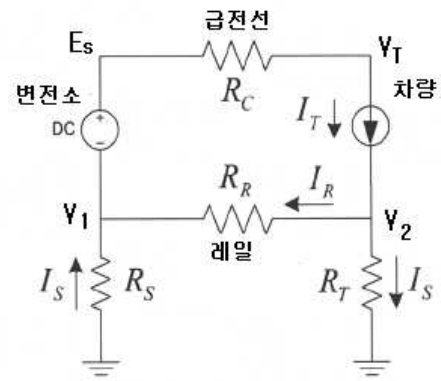


그림 5. 직류전기철도 급전시스템 등가회로
Fig. 5. Equivalent Circuit of DC Railway

그림 5의 직류전기철도 급전시스템의 등가회로에서 차량부하를 P 라고 하면 변전소에서 공급되는 전압 E_s 와 차량 부하전압 V_T 의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$E_S = V_T + R_C I_T \quad (1)$$

여기서, E_S : 변전소 공급전압
 V_T : 차량 부하전압
 I_T : 차량 부하전류
 R_C : 급전선 저항

그림 5의 등가회로에서 노드 방정식을 유도하여 노드 전압 V_1 과 V_2 에 대하여 정리하면 식 (2)와 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_R}\right) & -\frac{1}{R_R} \\ -\frac{1}{R_R} & \left(\frac{1}{R_R} + \frac{1}{R_T}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_C}(E_S - V_T) \\ \frac{1}{R_C}(E_S - V_T) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, V_1 : 노드 1의 전압
 V_2 : 노드 2의 전압
 R_S : 급전용 변전소 접지저항
 R_C : 급전선 저항
 R_T : 차량에서 본 접지저항
 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_S 를 구할 수 있다.

$$I_S = \frac{V_1}{R_S} = \frac{V_2}{R_T} \quad (3)$$

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

그림 5의 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 때문

에 전기철도 급전시스템에 대한 해석용 상용 프로그램 등을 사용하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 직류전기철도 급전시스템과 같은 복잡한 형태의 전력시스템에 대한 전류 분포 등을 계산할 수 있는 상용 프로그램인 캐나다 SES사의 SPLIT 프로그램을 이용하였다.

5. 사례 연구

직류전기철도 급전시스템의 접지방식에 대하여 모든 설비가 공통접지방식을 도입한 것으로 가정하여 직류전기철도의 차량부하의 위치에 따른 레일의 누설전류 분포를 계산하는 시뮬레이션을 하였다.

5.1 급전시스템의 회로 모델

그림 6은 직류전기철도 급전시스템의 회로 모델을 보인 것이다. 전기철도 차량의 부하는 56[kW]의 정전력 부하(= 750[V]×75[A])로 가정하였으며, 정전력 부하를 유지하도록 전차선(급전선)과 레일 사이의 저항은 약 1[Ω] 내외(≈ (750[V])²/ 56[kW])로 가정하였다. 급전용 변전소의 간격은 10[km]로 하고 그사이에 차량이 운행하고 있는 것으로 가정하였다.

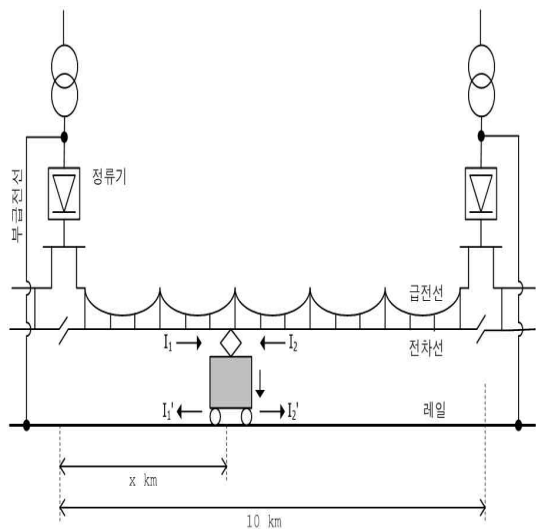


그림 6. 직류철도 급전시스템 모델
 Fig. 6. Modeling of DC Railway

5.2 시뮬레이션 조건

직류전기철도시스템에서 전차선/급전선의 운전 전압은 750[V]이고, 총 운전선로의 길이는 10[km]인 경우를 상정하였으며, 급전선, 전차선 및 레일의 저항은 각각 0.195[Ω/km], 0.109[Ω/km] 및 0.1745[Ω/km]으로 상정하였다.

또한, 레일의 누설저항은 1[Ω/km], 10[Ω/km] 및 100[Ω/km]의 세 가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 하였으며, 차량부하의 위치(x)는 부하전류가 75[A](부하 저항 1[Ω])인 전기차량 부하가 1[km]부터 9[km] 지점에 각각 위치한 경우를 상정하였다.

그림 6에 보인 직류전기철도 회로 모델에 대한 시뮬레이션을 위하여 캐나다 SES사에서 개발한 범용 회로해석 프로그램인 SPLITS을 이용하였다. 그림 7은 접지방식의 변화에 대한 직류전기철도의 급전시스템을 해석하기 위한 회로모델 해석법과 전자계 모델 해석법에 대하여 계산의 흐름을 비교하여 보여준 것이다.

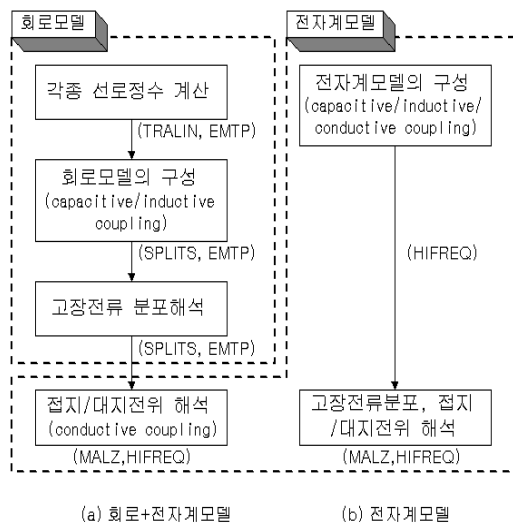


그림 7. 전기철도 급전시스템 해석 방법
Fig. 7. Analysis Method of DC Railway system

5.3 시뮬레이션 결과

직류전기철도 급전시스템에서 누설저항의 변화

에 대하여 전기철도의 차량부하의 위치에 따른 급전전류와 누설전류의 분포를 계산하는 시뮬레이션을 하였다.

5.3.1 누설저항의 변화에 대한 급전전류의 분포

그림 8은 차량부하(부하전류 75[A])가 4[km] 지점에 있고, 레일의 누설저항이 km당 1[Ω]인 경우에 급전선, 전차선 및 레일의 전류분포를 계산한 결과이다. 레일의 누설저항은 1[Ω/km]로 작기 때문에 레일을 통해 누설되는 전류가 상대적으로 커서 거리에 따른 레일 전류 크기가 크게 변하는 것을 볼 수 있다. 급전선과 전차선으로부터 공급되는 부하전류는 차량부하와 가까운 변전소로부터 더 많이 공급받고, 먼 쪽 변전소로부터의 공급 부하전류는 상대적으로 작아지는 것을 확인할 수 있다.

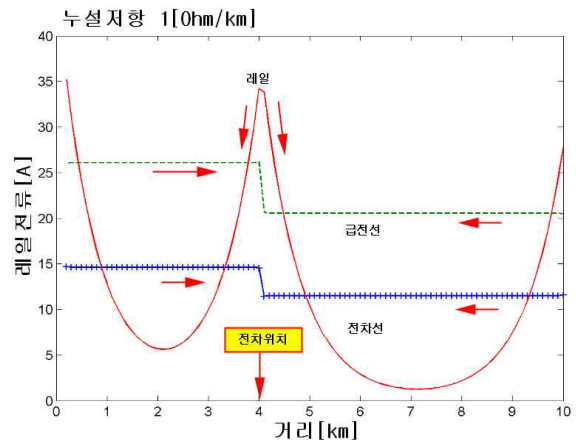


그림 8. 전류 분포(누설저항 1[Ω/km])
Fig. 8. Distribution of Supplied Current(1[Ω/km])

그림 9와 그림10은 레일의 누설저항이 각각 10[Ω/km]과 100[Ω/km]인 경우에 대한 급전회로의 전류 분포 시뮬레이션 결과를 보인 것이다. 급전선과 전차선 전류는 별 차이가 없으나 레일의 누설전류가 달라지기 때문에 레일의 전류분포가 많이 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉, 레일 누설저항이 커지면 누설 전류가 작아져서 레일의 전류가 일정해지는 것을 볼 수 있다.

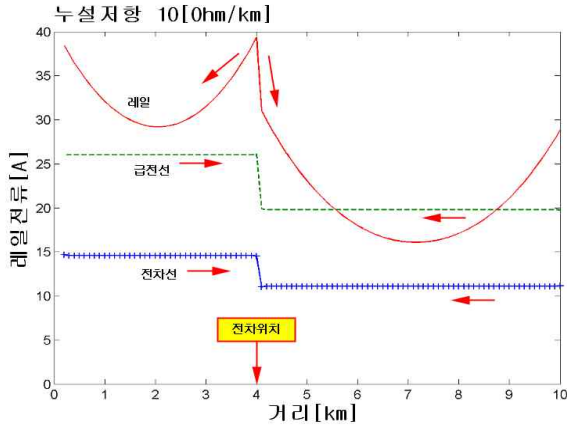


그림 9. 전류 분포(누설저항 10[Ω/km])
Fig. 9. Distribution of Supplied Current(10[Ω/km])

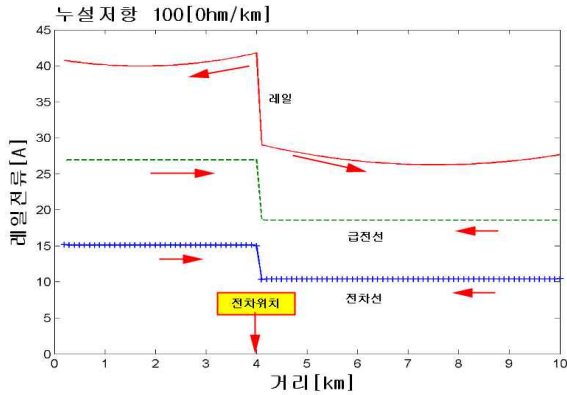


그림 10. 전류 분포(누설저항 100[Ω/km])
Fig. 10. Distribution of Supplied Current (100[Ω/km])

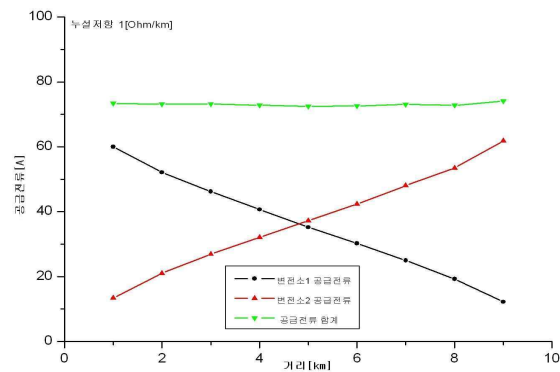


그림 11. 각 변전소의 공급전류 변화
Fig. 11. Variations of Supplied Current

그림 11은 누설저항이 1[Ω/km]인 경우에 각각의 직류전기철도 공급용 변전소로부터 공급되는 전류와 합계 공급전류의 크기를 차량부하의 위치에 따른 변화를 보인 것이다. 그림 11로부터도 차량부하의 위치가 가까운 변전소로부터 많은 부하전류를 공급받는 것을 확인할 수 있다.

5.3.2 누설저항의 변화에 대한 누설전류의 분포

그림 12는 직류전기철도 급전시스템에서 차량부하(부하전류 75[A])가 4[km] 지점에 위치한 경우에 위치별 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. 부하차량이 위치한 주변에서 레일의 누설전류는 약 4.78[A/0.1km]가 흐르는 것을 확인할 수 있다.

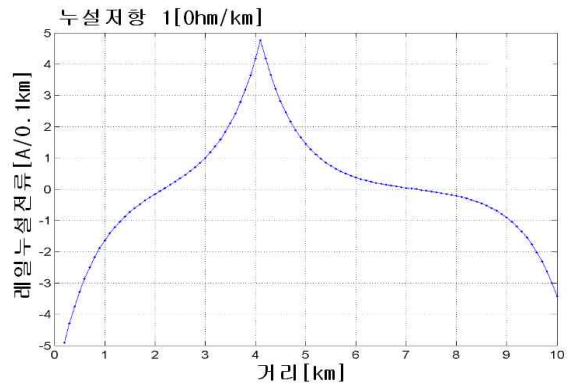


그림 12. 누설전류의 분포(1[Ω/km])
Fig. 12. Distribution of Stray Current(1[Ω/km])

그림 13과 그림 14는 레일의 누설저항이 각각 10[Ω/km] 및 100[Ω/km]인 경우의 레일 누설전류밀도를 보인 것이다. 부하차량이 위치한 부근에서 각각 1.15[A/0.1 km]와 0.17[A/0.1km]가 흐르는 것을 확인할 수 있어서 누설전류밀도가 1[Ω/km]인 경우에 비하여 각각 약 76[%]와 96[%] 수준으로 감소하는 것을 확인할 수 있어서 레일의 누설전류를 감소시키기 위한 대책으로 레일과 대지와의 접촉을 줄이기 위하여

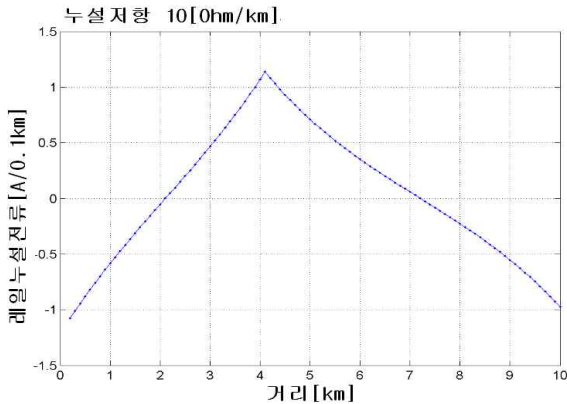


그림 13. 누설전류의 분포(10[Ω/km])
Fig. 13. Distribution of Stray Current(10[Ω/km])

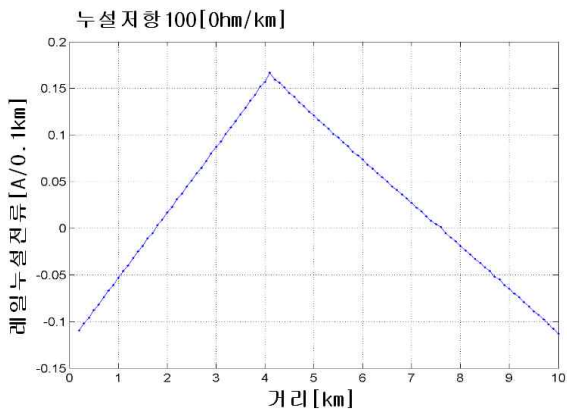


그림 14. 누설전류의 분포(100[Ω/km])
Fig. 14. Distribution of Stray Current(100[Ω/km])

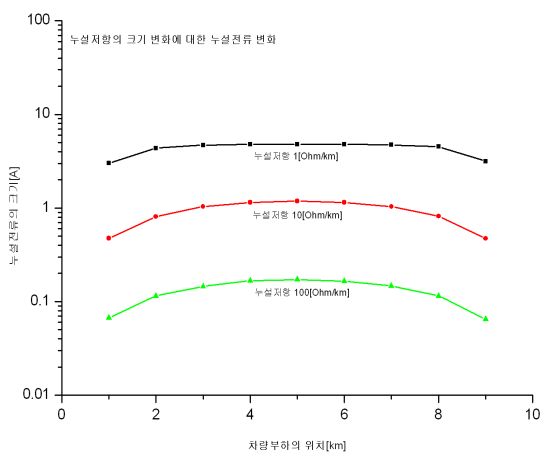


그림 15. 누설저항에 대한 누설전류의 변화
Fig. 15. Variations of Stray Current

절연패드 등을 사용하고, 귀로전류(부극성) 도체인 레일의 접속을 양호하게 하기 위하여 전기적인 용접과 본딩으로 처리하여야 할 것이다.

그림 15는 귀로도체(부극성)인 레일과 대지사이의 누설저항 변화에 대한 누설전류의 크기를 부하차량의 위치에 따라 변화하는 것을 보인 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 누설저항의 크기에 따라 누설전류의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 부하차량의 위치에 따라서는 공급 변전소로부터 거리가 멀어질수록 누설전류의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 최근에 세계적인 관심사가 되고 있는 환경 문제와 관련하여 대용량의 수송 능력을 위한 전기철도 중에서 직류전기철도의 급전시스템에 대하여 다룬 내용으로서, 부하전류의 귀로도체(부극성)로 레일을 사용하는 경우에 공통접지방식을 채택한 급전시스템의 공급전류 및 누설전류의 분포를 상용 프로그램 SPLITS을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

직류전기철도 급전시스템에서 차량부하의 위치별 각각의 변전소에서 공급되는 전류는 차량부하 위치에 따라 가까운 변전소에서 많은 부하전류를 공급받는 것을 확인하였으며, 누설저항의 크기에 따라 누설전류의 크기가 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 부하차량의 위치에 따라서는 공급 변전소로부터 거리가 멀어질수록 누설전류의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 누설전류에 의한 레일 주변의 지하 매설물에 영향을 미치는 레일의 누설전류를 감소시키기 위한 대책으로 레일과 대지와의 접속을 줄이기 위하여 절연패드 등을 사용하고, 귀로전류(부극성) 도체인 레일의 접속을 양호하게 하기 위하여 전기적인 용접과 본딩으로 처리하여야 할 것이다.

본 논문에서는 직류전기철도 급전시스템에 대한 해석을 위하여 상용 프로그램을 이용하였으나, 추후 직류전기철도 급전시스템의 해석을 위한 단순한 이론과 알고리즘을 정리하고 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] 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.
- [3] I. Cotton, C. Charalambous, P. Aylott and P. Ernst, "Stray current control in DC mass transit systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume: 54, pp. 722~730, 2005.
- [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, 2004.
- [5] K. S. Bahra, P. G. Batty, "Earthing and Bonding of Electrified Railways", International Conference on Developments in Mass Transit Systems, April, 1998.
- [6] CCITT Directives, "Inducing-currents and Voltages in Electrified Railway System", Geneva, 1989.
- [7] 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.

◇ 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 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 8월~2005년 2월 한국철도기술연구원 수석연구원. 2005년~서울산업대학교 철도전기신호공학과 교수.