

AT 교류 철도계통 내 다량 열차 운전시 새로운 동적전압 해석 알고리즘 연구

전용주\* 임성정\* 전명수\*\* 김태수\*\*\* 김재철\*  
 \*:송실대학교 \*\*:일렉컨설팅 \*\*\*:철도청

A Novel Simulation of Dynamic Voltages for Multiple-trains in AT-fed Railway Power Supply

Jeon. Yong-Joo\*, Rim. Seong-Jeoung\*, Jeon Myung-Soo\*\*, Kim Tae-Soo\*\*\*, Kim Jae-Chul\*  
 \*:Dept. of EE inSoongSill Univ \*\*:Elec-consulting \*\*\*: Korean National Railroad

**Abstract** - This paper presents a novel simulation of dynamic voltages in AT-fed railway power supply. Proposed algorithm is efficient and simple by using the circuit decoupling and iteration method. To verify the proposed method, we used real condition operating data and performed a several case studies.

Under train is constant power, we separated each AT section to calculate a loop current, train voltage on any position. Finally, this result utilizes a planning and operation of electrical railway systems.

1. 서 론

전기철도는 급전계통의 측면에서 보면 지속적으로 이동하는 집중부하이고 그 변화가 매우 심하며 해당 계통 내에 운행중인 다른 열차의 운전특성에도 영향을 다양하게 받게된다. 그러므로 급전계통에 나타나는 현상을 정확히 파악하기란 쉬운 일이 아니며 급전계통의 전기적 특성뿐만 아니라 운행조건 및 열차특성 등의 종합적인 시스템 해석이 필요하게 된다. 그 중 급전계통의 모델링은 계통해석에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있다.

과거 일본 전기철도 급전계통해석에 사용된 알고리즘의 경우를 살펴보면 회로 해석을 위해 계통을 등가변환시키는 방법을 사용한다[1]. 이 경우 모든 열차의 소비전류, 위치가 동일한 경우라는 가정이 내포되어있으며 등가 변환 중 나타나는 수식과정에서 전차선과 레일, 급전선의 임피던스들이 동일한 경우에 한하여 성립하는 수식이 되기 때문에 결과값이 근사값이 되고 적용에 제한사항이 발생하며 그 정확성이 떨어진다. 또한 R.J Hill의 경우는 급전계통의 모델링시 열차가 운행되는 AT구간 밖의 전류의 흐름은 고려되지 않아 계산값에 정확성이 떨어지게 된다[2].

본 논문에서는 AT 교류 급전 계통 내에 다량의 열차 운전시 동적 전압의 해석 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 회로를 분할하여 반복법을 수행하는 것으로 효과적이며 간단하다. 제안된 방법을 검증하기 위해서 실 계통 데이터를 사용한 사례연구를 수행하였다. 시뮬레이션 결과에서는 일정 시간대별 토오크와 속도를 이용한 열차의 전력을 도출하여 이 전력을 기준으로 각 열차의 위치별 전차선 전압과 전류를 구함으로써 열차의 상태를 파악할 수 있으며 이를 이용하여 전기철도 급전계통의 기초설계 및 시스템 운용에 활용할 수 있다.

2. AT 급전계통 모델

그림 1은 전형적인 교류 25kV AT 급전 계통도를 나타내었다. AT는 고정된 간격으로 설치하여 변전소의 공급구간을 증가시킨다. 대부분의 철도계통에서 AT는 2:1 권선비를 가지며, 2x25kV를 채택하고 있다. 매 공급구간은

서로 독립적이기 때문에 개별적인 해석이 가능하다.

그림 2에서는 AT 공급구간의 간격을 적절히 설계함으로써 전류의 흐름을 조절하여 시스템의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 매 전압강하는 명시된 범위 내에서 조정이 가능하다. 그림 2의 Zc1~Zc4는 전차선, Zr1~Zr4는 레일, Zf1~Zf4는 급전선의 해당구역별 임피던스를 의미한다.

2x25kV시스템은 +25kV의 전차선, 0V의 레일, -25kV의 급전선으로 구성되어 있다. 열차가 변전소(S/S)로부터 멀어지면 열차의 전력은 가장 가까운 AT로부터 공급받게 된다. AT는 전차선을 따라 분포되어있기 때문에 변전소와 같은 역할을 담당하며 전압강하를 줄일 수 있기 때문에 설계에 필요한 비용과 공간은 훨씬 감소한다. 또 다른 장점으로는 -25kV의 급전선으로 전차선 주변의 통상적인 전자기 장해가 급격히 감소하기 때문에 표준화된 급전계통으로 채택하고 있는 실정이다. 그러나 이 시스템에서는 전차선과 급전선이 있기 때문에 전류와 전압계산이 복잡하여, 조류 계산시 정확한 해를 얻기 위해서는 반복법이 필요하다.

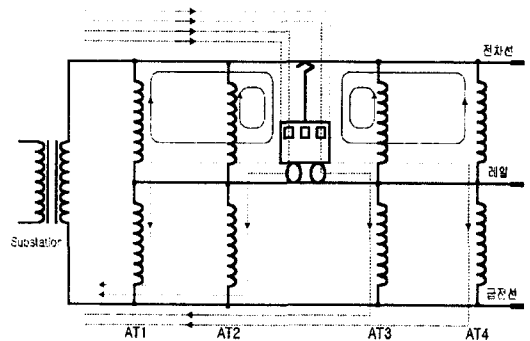


그림 1. 전형적인 AT 급전계통

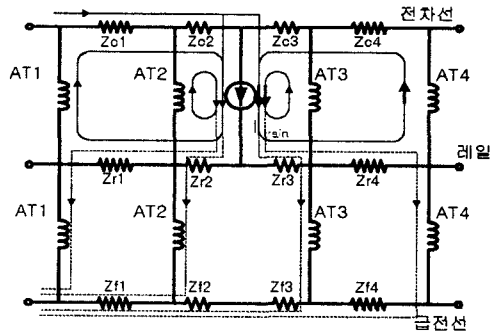


그림 2. AT계통의 전기적 등가회로

### 3. 제안된 알고리즘

한 변전소 구역 내 모든 AT 구간에서 선로, 레일, 급전 전압 및 전류 평가 모델을 작성하기 위한 첫 번째 단계로 AT 한 구간 또는 열차와 AT 구간내의 선로의 자기 임피던스와 상호임피던스, AT의 내부임피던스를 합산한 등가 임피던스를 계산한다. 각 AT가 등 간격으로 배치 되어있다면, 모든 AT 구간내의 합산된 임피던스는 같은 크기를 갖게 될 것이며 열차가 포함되어있는 AT 구간도 열차의 위치에 따라 일정한 규칙을 갖게 될 것이다. 다음으로 구간 내에 열차를 배치시켜 열차에 의한 구역별 전류를 계산한 후 이를 다량의 열차로 확장시켜 각 열차에 의해 흐르는 구역내의 전류를 방향에 따라 (+), (-) 부호를 적용하여 중첩의 정리로 합산한다.

두 번째로 계통 내 AT의 특성을 이용하여 전차선과 레일, 레일과 급전선의 두 부분으로 나누어보면 AT 특성으로 인해 전, 후자에 흐르는 각각의 전류는 동일하게 되므로 이를 분리하여 회로분할 알고리즘을 적용시키면 그림 3과 같이 6단자가 4단자로 해석되어 계산의 간략화가 가능해진다[3]. 그림 3에서 Z1, I1, Z2, I2, Z3, I3, Z4, I4는 각각 AT1-AT2, AT2-열차, 열차-AT3, AT3-AT4사이의 합성(자기+상호)임피던스와 전류를 의미한다.

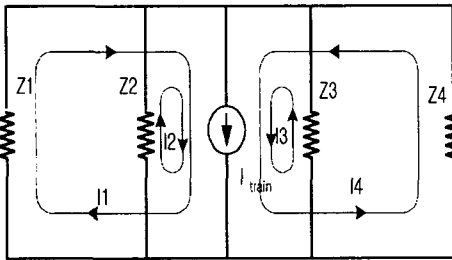


그림 3. 4단자로 변환된 전기회로

열차의 초기전압을 공급전압으로 가정하고 매 시간대 별 열차의 견인력으로부터 계산된 열차의 출력을 이용하여 열차의 전류를 결정한다. 이 전류로부터 등가회로를 흐르는 각각의 전류를 계산하여 구역별 전압강하를 구한 다음 이를 이용하여 열차전압을 재계산하는 반복법을 수행하여 실제에 가까운 열차전압 및 계통내의 전류를 계산한다.

계통의 선로조건에 따른 임피던스와 열차의 견인력, 출력 운전특성 등의 제반 수식은 참고문헌[4-6]을 사용하여 계산한 다음 등가회로내의 전류와 오차는 식(1), (2)를 사용하여 계산한다.

$$I'_{train} = 0.5 \times I_{train} = 0.5 \times \frac{P_{output}}{V_{train}} \quad \dots\dots (1)$$

$$I_n = \frac{\frac{1}{Z_n}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}} \times I'_{train} \quad \dots\dots (2)$$

식(1)에서  $I_{train}$ 은 4단자로 등가 변환된 회로의 전류이며  $I_{train}$ 은 원래 회로의 전류,  $V_{train}$ 은 열차의 초기전압 (가정 27.5[kv])이다. 식(2)의  $I_n$ ,  $Z_n$ 는 등가 회로 n번째 구간의 전류와 합성 임피던스이다. 식(2)를 그림 3에 적용하여 열차전류( $I_{train}$ )를 구하면 계산에 필요한 모든 전류를 얻을 수 있으며 이 전류를 이용하여 각 선로사이와 열차와 선로사이의 임피던스를 고려한 구역별 임피던스가 고려된 전압강하를 구해낼 수 있다.

이러한 열차전압을 구하는 절차를 그림 4에 나타내었

다. 그림 4에서 선로정보에는 전차선, 레일, 급전선의 상호, 자기 임피던스, 전원정보에는 공급전원의 전원 계통 임피던스, AT 내부 임피던스, 그리고 열차정보에는 견인력, 열차 총중량, 선로조건에 따른 합성저항, 전동기 효율, 회전관성 등의 데이터를 사용한다.

그림 4의 오차율과 비교반복에 있어서 수렴조건으로는 식 (3)을 적용한다.

$$|(V_{train}^{new} - V_{train}^{old})| < \epsilon \quad \dots\dots (3)$$

여기서,  $\epsilon$ 는 설정한 허용오차,  $V_{train}^{new}$ 는 개선된 전압값,  $V_{train}^{old}$ 는 이전의 전압값을 나타낸다. 이러한 반복루프에서 구해진 전압강하값을 이용하여 허용오차를 만족할 때까지 반복을 계속한다.

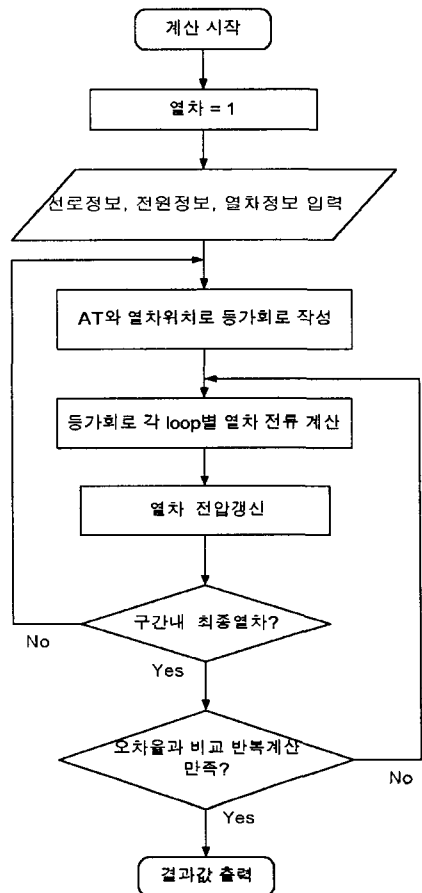


그림4. 제안된 알고리즘의 순서도

### 4. 사례연구

결과의 타당성 및 검증을 위하여 선로의 구성과 공급전원의 특성, 선로의 임피던스, 열차의 특성 등의 예제 계통[6]은 금정역~남태령까지의 구간을 모의하였다. 주어진 선로 데이터는 표 1과 같다.

예제 계통은 열차 1대가 운전중이며 매 시간별 열차의 견인력 특성과 선로의 각종 조건들이 적용이 되었으며 또한 등가회로도 매 시간마다 작성되어 각 루프별 전류의 흐름과 전압강하를 계산하였다. 또한 열차의 견인력을 최대한으로 하기 위해 차량은 10량으로 구성하였으며 승객도 만차를 기준으로 계산하였다.

표 1. 각종 임피던스

임피던스 종류	크기
전원	$2.36 + j19.5 [\Omega]$
AT내부	$0.0287 + 0.44912 [\Omega]$
전차선	$0.194 + j0.731 [\Omega/km]$
레일	$0.009 + j0.467 [\Omega/km]$
급전선	$0.122 + j0.587 [\Omega/km]$
전차선-레일	$0.053 + j0.373 [\Omega/km]$
레일-급전선	$0.051 + j0.361 [\Omega/km]$
급전선-전차선	$0.058 + j0.369 [\Omega/km]$

그림 5는 차량운행에 따른 매순간의 위치를 계산한 것으로 급전역을 출발하여 남태령에 도착하는 열차의 속도를 나타낸 것이다.

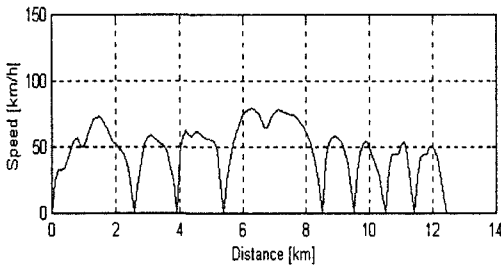


그림 5. 구간내 운행 열차의 속도

열차의 속도 곡선으로부터 가속도 특성 곡선을 구한 후 이를 이용하여 열차의 견인력특성 곡선을 구해보면 가속도 특성곡선에 선로의 조건들 즉 구배, 곡선, 주행저항이 추가된 형태가 되어 그래프의 형태가 유사함을 확인할 수 있다. 견인력 특성 곡선을 그림 6에 나타내었다.

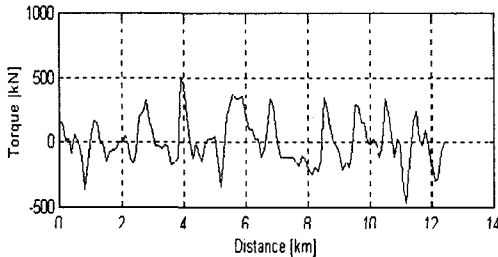


그림 6. 열차의 견인력특성 곡선

계산된 견인력과 속도를 이용하여 열차의 출력곡선을 도출하여 보면 그림 7과 같이 열차가 기동시나 상 구배시에는 양의 출력이 발생하여 에너지를 소모하게 되고 감속이나 하 구배시에는 음의 출력이 발생하여 회생전력이 발생함을 볼 수 있다.

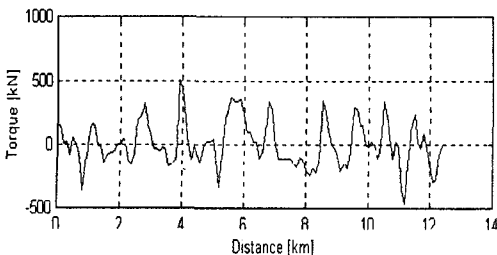


그림 7. 열차의 유효전력 소비곡선

매 시간대별 열차의 출력을 이용하여 열차 전류를 계산한 후 등가회로에 적용하여 각 루프별 전압강하를 계산하여 열차의 전압을 계산한 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 보는바와 같이 회생전력이 발생 시에는 열차의 전압이 상승됨을 볼 수 있었으며 전력소모가 심한 구간에서는 열차의 전압강하가 심해짐을 알 수 있었다.

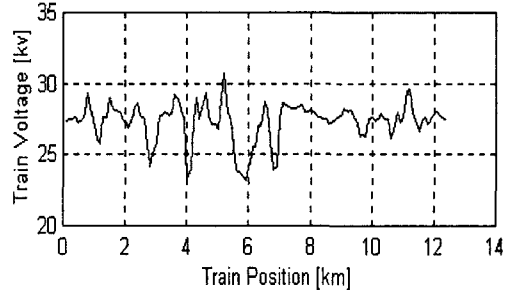


그림 8. 열차 위치별 열차 전압

## 5. 결 론

본 논문에서는 AT 교류 급전 계통 내에 다량의 열차 운전 시 동적전압의 해석 알고리즘을 제안하였다. 급전 계통 해석의 중요한 알고리즘인 새로운 모델링 기법으로 키르히호프, 중첩의 정리와 회로분할법에 이은 반복법을 수행하였다. 그 결과 계통 내 열차 운행 시 시간별 위치에 따른 전류의 흐름을 파악할 수 있었으며 이를 통하여 해당조건에 따라 열차 운행 시 정확한 열차의 상태를 파악할 수 있었다. 향후 연구과제로는 다량의 열차에 대한 다양한 사례연구를 통하여 알고리즘의 정확성 검증과 기존의 계통과 신설되는 계통에 적용하여 보조 변압기의 위치 선정 및 변전소의 설치간격 등 기본적인 철도계통의 설계와 운영에 높은 신뢰성의 자료를 제공하도록 할 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 윤재영, 최홍관, "급전회로망 해석기법을 활용한 전철계통해석", 한국철도학회 2000년도 춘계학술대회, pp.108-115, 2000.
- [2] R. J. Hill, I. H. Cevic, "On-Line Simulation of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.42, No.3, August 1993.
- [3] Pao-Hsiang Hsi et al., "Simulating On-Line Dynamic Voltages of Multiple Trains under Real Operating Conditions for AC Railways", IEEE Transactions on Power systems, Vol.14, No.2, May 1999.
- [4] 철도청, 경부선 동대구-부산간 전철, 전력설비 기본설계 보고서(별첨), 1998.
- [5] 김양수 외, 전기철도공학, 동일출판사, 1999.
- [6] 한국철도기술연구원, 전류 Map을 이용한 전차선로 관리시스템 구축 연구(1차년도 보고서), 철도청, 1998. 12.