

## AT 급전계통 전기철도 해석 알고리즘 연구

추동욱\* 김재철\*\* 김낙경\*\*\*  
\*경문대학 \*\*송실대학교 \*\*\* (주) 대동기술단

### A study on algorithm of AT feeding systems

Dong-Woog Choo Jae-Chul Kim Nak-Kyung Kim  
Kyung-Moon college Soong-Sil University Dae Dong co.Ltd.

**Abstract** - In this paper, the modified simulation algorithms of the Auto Transformer (AT) feeding electric train were proposed. To obtain terminal voltage of train by using equivalent circuit of the AT feeding system, the iterative method is proposed for which determine the train voltages. The train voltages are iteratively calculated from the system voltage drop and line impedance. In the case study, the proposed method is verified from actual operation data of the Kwa-Chon line. Also it is verified that the proposed method can be extent to the multi-train simulation tool. The terminal voltage of the multi-train can be calculated by using superposition principle and it is easily applied to the proposed method. Therefore, the proposed method can be a solution for the complexity of the circuit analysis in the existing methods.

본 논문에서는 정상상태의 전차선로를 해석하므로 전차를 정 전력 부하로 취급하였으며 정 전력 원은 전압이 일정하다고 가정하는 경우 일정전류를 흘리므로 정전류 원으로 취급한다. 계통에 존재하는 AT의 경우 정전압 원으로 취급하였으며, 전원 변전소의 변압기 내부 임피던스와 ( $Z_S$ ), AT의 내부임피던스 ( $Z_{AT}$ ) 등을 고려한 등가회로를 제안하였다. 등가변환을 위한 첫 단계는 AT의 위치와 변전소의 공급구간 열차의 위치 등의 계통의 구성을 확인하는 것이다. 그림 1은 교류 급전계통의 공급 구역 내 AT가 4개 설치되어있는 단선도의 전형적인 전류 흐름 모습이다. 열차가 모든 AT의 어떤 구간에 존재하여도 열차전류는 한 변전소 구역 내 모든 AT를 통하여 임피던스의 크기에 반비례하여 분배된다 [2].

### 1. 서 론

세계적으로 교통 문제와 공해 문제가 심각하게 대두되면서 전기철도가 대안으로 제시되기 시작하였다. 전기철도는 대중교통의 확충과 공해 문제를 해결할 수 있는 최적의 교통 수단이다. 서울시의 경우 2000년 통계에 의하면 하루 400만 명 정도의 인구가 전기철도를 이용하고 있어 수송 분담율 측면에서 약 30% 이상을 차지하게 되었다. 전기철도의 방식에는 직류 방식과 교류 방식이 있으며 교류 전기 철도의 방식으로는 직접 급전방식, 흡상변압기 급전방식, 단권변압기 급전방식의 세가지가 대표적이다. 그 중 가장 일반적이고 장거리 급전과, 유도장해 측면에서도 유리한 AT(단권변압기) 급전방식이 가장 많이 시설되고 있으며, 경부고속철도의 경우도 AT급전방식이 도입된다[1]. AT 급전방식에서 급전구간내의 열차에 걸리는 전압이 허용 기준[4] 이상으로 떨어지게 되면 열차의 운전이 문제가 발생하게된다. 따라서 열차의 상황에 따라 급전구간 내에서 열차의 전압이 얼마나 인가되는지를 알아보는 것이 대단히 중요하다. AT급전방식에서는 일반 송배전 선로의 회로해석 방법으론 해석이 곤란하다. 본 논문에서는 AT급전계통의 등가화와 또 계통의 전류 분포에 따른 전압강하 계산의 알고리즘을 제안하였으며, 시험 계통으로 안산-과천선에서 열차의 속도와, 선로 구배, 곡선 등의 실험데이터를 이용하여 전력을 계산하고 이를 통해 급전계통의 전압 분포를 알아보았다. 또 임의로 12(km)마다 4개의 AT가 존재하는 모의 구간을 설정하여 열차운행 위치에서의 열차전압을 모의하였고, 전압을 계산하는 알고리즘을 제안하여 예제 계통에 적용하였다[3].

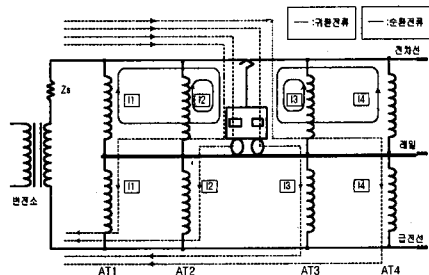


그림 1 대표적인 AT 급전계통  
Fig. 1 Representation of AT feeding system

AT의 특성상, 각 AT에 의해 공급되는 전류는 2개로 분리되며 동등한 크기와 위상 요소를 가진다. 순환전류 ( $I_{loop}^{(k)}$ )는 AT의 위쪽코일 25(kV) 전압 원에 의해 순환되는 전류이며 귀환전류 ( $I_{return}^{(k)}$ )는 AT의 아래쪽 코일을 통해 전원 단으로 귀환되는 전류이다. 그림 1에서 열차전류 ( $I_{train}^{(k)}$ )는 식 (1)과 같이 Gauss-Seidel 법에 의해 구한다.

$$(1) \quad I_{train}^{(k+1)} = \left( \frac{P_{train(n)}}{V_{train}^{(k)} \times \cos \theta} \right)^* \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^4 I_{loop}^{(k)} = \sum_{n=1}^4 I_{return}^{(k)} = 0.5 \times I_{train}^{(k)} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^4 I_i^{(k)} = \frac{1}{2} \times I_{train}^{(k)} \quad (3)$$

전차를 정전력 부하로 해석하는 경우, 전차에 걸리는 전압을 구하는 방법은 일반적으로 수치해석법중의 하나인 Gauss-Seidel법을 사용한다. 식 (2)는 순환되는 전류와 귀환되는 전류의 관계를 나

### 2. 본 론

#### 2.1 AT 급전계통의 등가회로

타내고 식 (3)은 모든 구간의 전류의 합은 열차 전류의 반임을 나타낸다. 그림 1에서 각 AT로 흐르는 전류를 구하기 위해 AT와 AT 사이의 한 구간 또는 열차와 AT 구간내 선로의 자기 임피던스와 상호임피던스( $Z_M$ ), AT의 내부임피던스( $Z_{in}$ )를 합산한 등가 임피던스를 계산한다. 전차선, 레일, 급전선의 자기 임피던스를 각각  $Z_c$ ,  $Z_r$ ,  $Z_f$ , 전차선-레일, 레일-급전선, 급전선-전차선의 상호 임피던스( $Z_M$ )를 각각  $Z_{cr}$ ,  $Z_{rf}$ ,  $Z_{fc}$ 라 하면,  $I_{train}$ 과 n번째 전압원 사이의 합산된 등가임피던스는  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  값으로 표현되며 열차의 위치에 따라 변화하게 된다. 각각의 등가 임피던스는 순환전류 루프에 의한 등가 임피던스를 사용하였다.

**2.2 구간별 열차전압계산을 위한 전류 분포**  
열차가 급전시스템의 구간간을 통하여 각각의 구간에 위치시 전류의 분포를 보면 그림 2, 3, 4와 같이 나타난다.

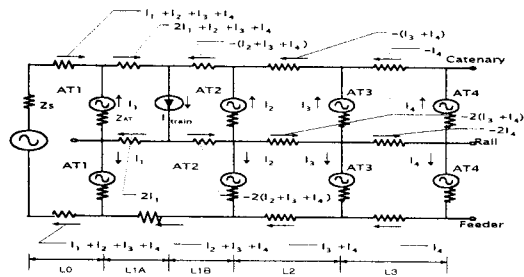


그림 2 AT1-AT2 사이에 열차 위치시 전류 분포  
Fig. 2 Current distribution map on train located in AT1-AT2

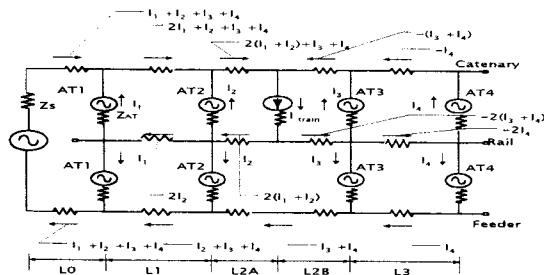


그림 3 AT2-AT3 사이에 열차 위치시 전류 분포  
Fig. 3 Current distribution map on train located in AT2-AT3

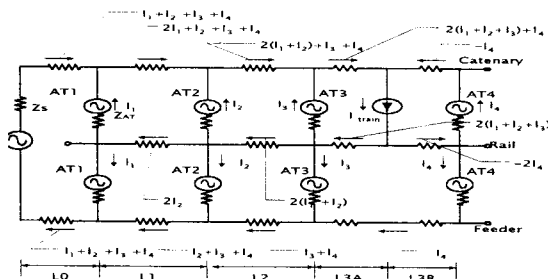


그림 4 AT3-AT4 사이에 열차 위치시 전류 분포  
Fig. 4 Current distribution map on train

located in AT3-AT4

**2.3 사례연구**

**2.3.1 열차의 운행상황을 고려한 해석**

제안된 알고리즘에 의해 사례연구를 한 계통은 그림 5와 같은 과천-안산선의 열차운행 데이터를 이용하여 열차의 소모전력과 회생전력을 계산하고 이를 바탕으로 계통 전압에 걸친 전압을 모의하였으며 사용된 선로와 변전소의 임피던스 값은 표 1과 같다.

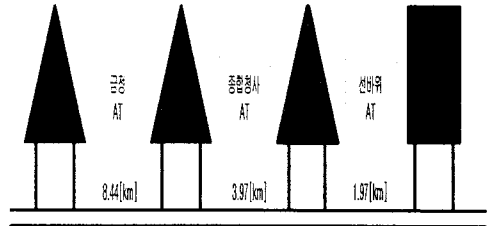


그림 5 과천-안산선의 모의구간  
Fig. 5 Simulation section of Kwachon- Ansan line

표 1 계통의 임피던스 값  
Table 1 Values of system impedance

임피던스 종류	크기
전차선 ( $Z_c$ )	$0.1771 + j0.7485 [\Omega/\text{km}]$
레일 ( $Z_r$ )	$0.2470 + j0.8520 [\Omega/\text{km}]$
급전선 ( $Z_f$ )	$0.3597 + j0.9576 [\Omega/\text{km}]$
전차선-레일 ( $Z_{cr}$ )	$0.0587 + j0.3778 [\Omega/\text{km}]$
레일-급전선 ( $Z_{rf}$ )	$0.0586 + j0.3646 [\Omega/\text{km}]$
급전선-전차선 ( $Z_{fc}$ )	$0.0582 + j0.4699 [\Omega/\text{km}]$
전원 ( $Z_s$ )	$0.146 + j3.365 [\Omega]$
AT내부 ( $Z_{AT}$ )	$0.0287 + j0.44912 [\Omega]$

그림 6은 열차의 운행에 따른 전력을 나타내며 회생시는 음(-) 값을 가지며, 역행시는 양(+)의 값을 가지게 된다. 그림 7은 계통의 전압 분포를 나타낸다.

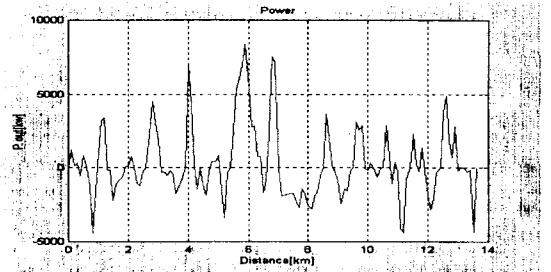


그림 6 열차 전력 곡선  
Fig. 6 Curve of train power

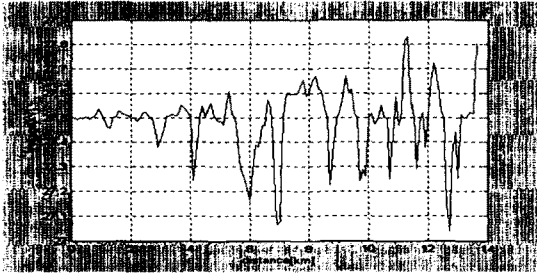


그림 7 열차 전압 분포 곡선  
Fig. 7 Train voltage distribution curve

그림 7에서 전압이 공급전압 27.5[kv]를 중심으로 회생전력시에는 계통의 전압이 상승하고, 역행시는 전압이 강하하는 경향을 보이고 있다.

### 2.3.2 열차의 운행상황을 고려하지 않은 다수열차 해석

그림 2, 3, 4에서 AT의 배치 간격이 각각 12[km]이고, 열차의 소비전력이 8[MW]인 다량 열차가 운행하는 경우 계통의 전압 분포를 알아보기 위하여 열차가 1대, 2대, 3대의 경우를 모의해본다. 그림 8은 급전계통에서 열차 1대가 18[km]지점에 위치한 경우이고, 그림 9는 2대의 열차가 18, 42[km]에 위치한 경우, 그림 10은 3대의 열차가 18, 32, 40[km] 지점에 각각 위치한 경우이다.

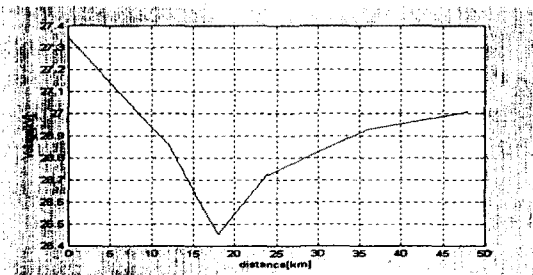


그림 8 18[km] 지점 열차 위치 시 계통전압  
Fig. 8 System voltage on distance  
(train on each 18 position)

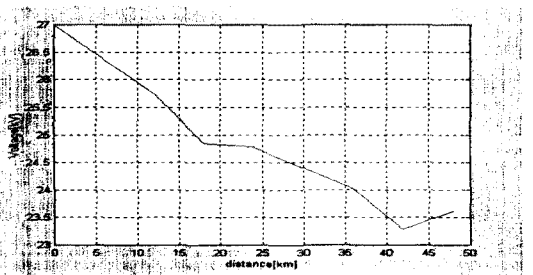


그림 9 18, 42[km] 지점 열차 위치 시 계통전압  
Fig. 9 System voltage on distance  
(train on each 18, 42[km] position)

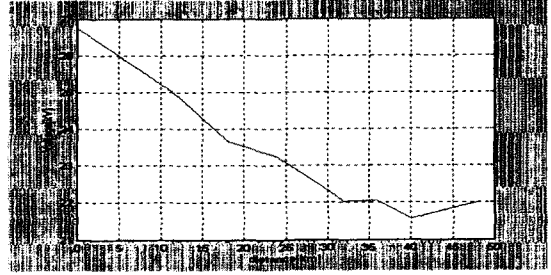


그림 10 18, 32, 40[km] 지점 열차 위치 시 계통전압  
Fig. 10 System voltage on distance  
(train on each 18, 32, 40[km] position)

그림에서 열차의 전압 초기치가 27.5[kv]이나 시작 지점에서 떨어지는 이유는 변압기의 내부 임피던스 때문이다. 전원으로부터 열차의 지점까지 전압이 계속 떨어지다가 열차를 지나 AT에 가까워지면 다시 전압이 상승하거나 감소정도가 둔화하는 것은 AT의 특성이 고려된 사항이다[4].

### 3. 결 론

본 논문에서는 AT 교류 급전 계통에서 열차의 위치별 전류의 분포를 기준으로 급전계통을 전기적으로 등가화시켜 모델링을 했고, 급전계통 내 다수의 열차 운전 시 동적 전압의 해석 알고리즘을 제안하였다. 급전계통 해석에 있어 가장 중요한 시스템의 전기적 등가모델링 기법과 계통 내의 AT로 분할되는 열차전류의 흐름에 대해 분석하였고 AT의 해당위치별 전압강하를 고려하였다. 또한 전차의 대수, 전차의 위치변화에 따라 언제든지 열차 전압의 계산이 가능한 대수 방정식을 일반화된 형식으로 유도하였으며 다수의 열차 운행시 열차의 상호 작용을 고려한 계통 전체 전압분포를 도출하는 방법을 제시하였고 이를 합산하여 다량열차의 해석을 도모하였다. 프로그램의 작성과정에서는 선로조건, 열차조건, 계통해석 부분을 개별적으로 작성하여 차후 수정 및 보안을 간편하게 작성하였다. 차 후 연구 문제로는 열차의 특성에 대한 자세한 모델링으로 알고리즘의 정확성 확보와 실측 데이터와의 비교를 통한 정확성 검증이 필요하다. 이를 기존의 계통과 신설되는 계통에 적용하면 전력용 변압기의 위치, 용량 선정 및 변전소의 설치간격 등 기본적인 급전계통의 설계와 운영에 높은 신뢰성의 자료를 제공할 수 있을 것이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 한국고속철도 건설공단, "고속철도 연구 보고서(전기분야)", 1996.2
- [2] R. J. Hill, I. H. Cevik, "On-Line Simulation of Voltage Regulation in Auto transformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.42, No.3, pp. 365-372, 1993
- [3] 추동욱, 김재철, 전용주, 임성정, 김태수, "교류 전기의 AT 급전계통 내 다수열차 운행 모의알고리즘연구", 대한전기학회지, Trans. KIEE, Vol. 50P, No.2, 2001.6
- [4] 철도청, "전기철도 전력 시설규정", 2000.1
- [5] 손필영 외 1인 "AT 급전방식의 유도전압계산 알고리즘에 관한연구" 대한전기학회 논문지 Vol.37 No.12, 1998