

AT 급전계통 해석 알고리즘 연구

A Study on Algorithm of AT Feeding Systems

秋 東 旭* · 金載哲**

(Dong-Wook Choo · Jae-Chul Kim)

Abstract - In this paper, the modified simulation algorithms of the Auto Transformer (AT) feeding electric train system 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 impedancce. 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. .

Key Words :Train voltage, Equivalent circuit, loop-current, return-current, voltage drop

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 분담 율 측면에서 약 30% 이상을 차지하게 되었다. 전기철도의 방식에는 직류 방식과 교류 방식이 있으며 교류 전기 철도의 방식으로는 직접 급전방식, BT(흡상변압기) 급전방식, AT(단권변압기) 급전방식의 세 가지가 대표적이다. 그 중 가장 일반적이고 장거리 급전과, 유도장해 측면에서도 유리한 AT급전방식이 표준방식으로 가장 많이 채택되고 있으며, 경부고속철도의 경우도 AT급전방식이 도입된다[1]. AT 급전방식에서 급전구간내의 전차에 걸리는 전압이 허용 기준[4] 이상으로 떨어지게 되면 전차의 운전이 문제가 발생하게된다. 따라서 전차의 상황에 따라 급전구간 내에서 전차의 전압이 얼마나 인가되는지를 알아보는 것이 대단히 중요하다. AT급전방식에서는 일반 송배전 선로와는 다르게 구성되어 있어 일반 송배전 선로의 회로해석 방법으론 해석이 곤란하다. 본 논문에서는 AT급전계통의 등가회로와 계통의 전류 분포에 따른 전압강

하 계산의 알고리즘을 제안하였으며, 시험 계통으로 과천선에서 전차의 속도와, 선로 구배, 곡선 등의 실데이터를 이용하여 전력을 계산하고 이를 통해 급전계통의 전압 분포를 알아 보았다. 또 임의의 시험계통으로 4개의 AT가 12[km] 간격으로 존재하는 모의 구간을 설정하여 소비전력이 8[MW]의 전차를 상정하여 전차운행을 적용하였다.

2. 본 론

2.1 AT 급전계통의 등가회로 및 알고리즘등가회로 구성

본 논문에서는 정상상태의 전차선로를 해석하므로 전차를 정 전력 부하로 취급하였으며 정 전력 원은 전압이 일정하다고 가정하는 경우 일정전류를 흘리므로 정 전류 원으로 취급한다. 계통에 존재하는 AT의 경우 정 전압 원으로 취급하였으며, 전원 변전소의 변압기 내부임피던스와(Z_S), AT의 내부임피던스(Z_{AT}) 등을 고려한 등가회로를 제안하였다. 등가변환을 위한 첫 단계는 AT의 위치와 변전소의 공급구간 전차의 위치 등의 계통의 구성을 확인하는 것이다. 그림 1은 제안된 등가회로를 나타내며 전차전류가 급전계통 내의 모든 AT를 통해 전류가 분배되는 것을 나타내고있다. 전차전류는 전차가 모든 AT의 어떤 구간에 존재하여도 한 변전소 구역 내 모든 AT를 통하여 임피던스의 크기에 반비례하여 분배된다[2].

* 正 會 員 : 京文大學 電氣科 助教授 · 工博

**正 會 員 : 崇實大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受H字 : 2001年 10月 16日

最終完了 : 2002年 1月 16日

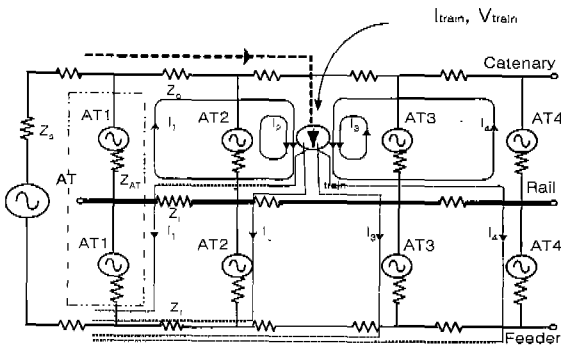


그림 1 AT 급전계통의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of AT feeding System

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 전차전류($I_{train}^{(k)}$)는 식 (1)과 같이 Gauss-Seidel 법에 의해 구 한다.

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

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

$$V_{section(i)drop}^{(k)} = I_{section(i)}^{(k)} \times Z_{section(i)} \quad (3)$$

$$V_{droptot(i)}^{(k)} = \sum V_{section(i)drop}^{(k)} \quad (4)$$

$$V_{train}^{(k+1)} = V_{train}^{(k)} - V_{droptot(i)}^{(k)} \quad (5)$$

전차를 정전력 부하로 해석하였으며, 전차에 걸리는 전압을 구하는 방법은 일반적으로 수치해석법중의 하나인 Gauss-Seidel법을 사용하였다. 식(1)은 전차가 n[km]에 위치한 경우 전차의 소비전력이 $P_{train(n)}$ 인 전차의 전류를 구하는 식이고, 식 (2)는 전차 전류와 순환전류,귀환전류 사이의 관계를 나타낸다. 식 (3)은 그림3, 4, 5에서 나타낸 전차의 위치 n[km]가, i번째의 AT 구간에 위치하느냐에 따른 전압강하의 값을 나타내며, 식(4)는 그 위치에서의 급전계통의 전체적인 전압강하를 나타낸다. 식(5)는 전차의 전압을 나타낸다. 그림 1에서 각 AT로 흐르는 전류를 구하기 위해 AT와 AT 사이의 한 구간 또는 전차와 AT 구간내 선로의 자기 임피던스와 상호임피던스(Z_M), AT의 임피던스(Z_{AT})를 합산한 등가 임피던스를 계산한다. 전차선, 레일, 급전선의 자기 임피던스를 각각 Z_c , Z_r , Z_f , 전차선-레일, 레일-급전선, 급전선-전차선의 상호 임피던스를 각각 Z_{cr} , Z_{rf} , Z_{fc} 라 하면, 전차와 각각의 전압원인 AT 사이의 합산된 등가임피던스는 Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 값으로 표현되며 전차의 위치에 따라 변화하게 된다.

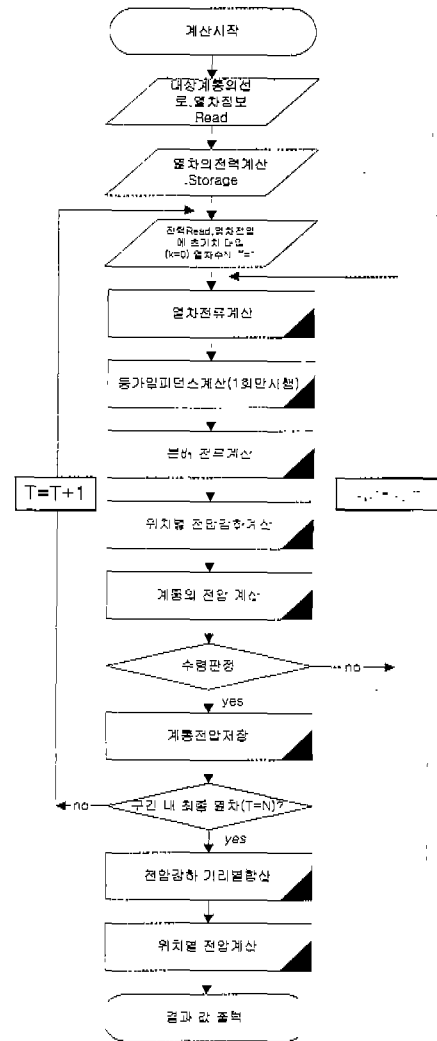


그림 2 제안된 알고리즘 흐름도
Fig. 2 Flow chart of represented algorithm

각각의 등가 임피던스는 순환전류 부피에 의한 등가 임피던스를 사용하였다. 본 논문에서 제안된 등가회로에 따라 계통의 전압을 계산하는 알고리즘의 흐름은 그림 2와 같다.

2.2 구간별 전차전압계산을 위한 전류 분포

전차가 급전계통의 전구간을 통하여 각각의 구간에 위치시 전류의 분포를 보면 그림 3, 4, 5와 같이 나타낸다. 전원으로부터 전차의 위치에 따라 그림 3, 4, 5와 같이 전류의 분포가 이루어지며 이에 따라 전류 분포에 따라 전압강하를 계산한다. 전압계산 알고리즘은 식(3), (4), (5)를 적용하였다. 그림2에서 반복법에 위한 수렴 판정 조건은 식(6)과 같다. 전류의 분배는 식(7)과 같이 임피던스의 크기에 반비례하여 이루어진다.

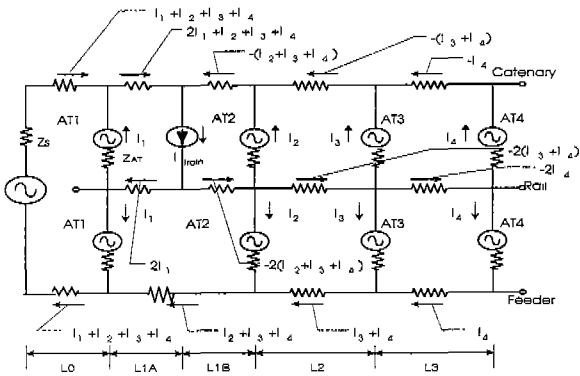


그림 3 AT1-AT2 사이에 전차 위치 시 전류 분포
 Fig. 3 Current distribution map on train located in AT1-AT2

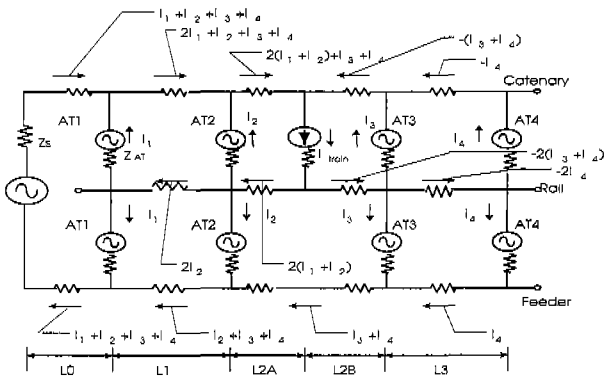


그림 4 AT2-AT3 사이에 전차 위치 시 전류 분포
 Fig. 4 Current distribution map on train located in AT2 -AT3

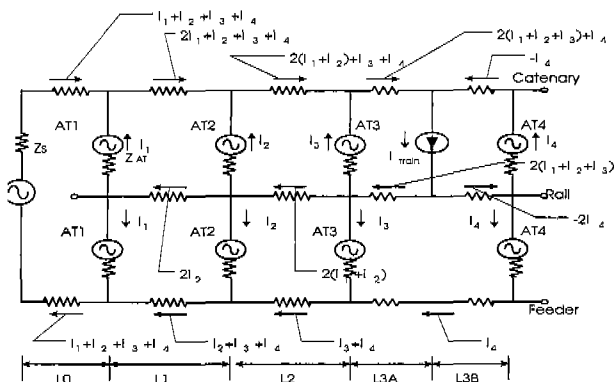


그림 5 AT3-AT4 사이에 전차 위치시 전류 분포
 Fig. 5 Current distribution map on train located in AT3-AT4

$$V_{train}^{(k+1)} - V_{train}^{(k)} \leq \epsilon \quad (6)$$

$$I_i^{(k)} = \frac{\frac{1}{Z_i}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4}} \times I_{train}^{(k)} \quad (7)$$

2.3 사례연구

2.3.1 전차의 운행상황을 고려한 해석1

제한된 알고리즘에 의한 사례연구1 계통은 그림 6과 같은 과천선에 전차운행 데이터를 이용하여 전차의 소모전력과 회생전력을 계산하고 이를 바탕으로 계통 전반에 걸친 전압을 모의하였으며 사용된 선로와 변전소의 임피던스 값은 표 1과 같다.

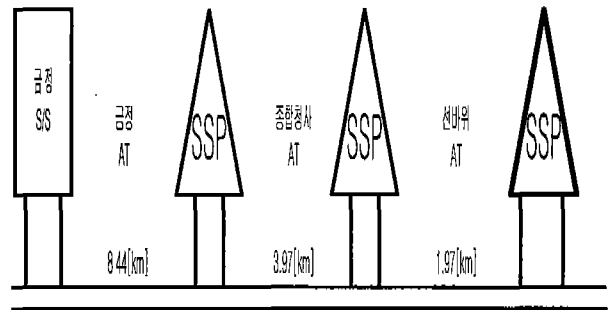


그림 6 과천선의 모의구간
 Fig. 6 Simulation section of Kwachon line

표 1 계통의 임피던스 값

Table 1 Values of system

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

그림 7, 8, 9, 10은 각각 거리별 속도, 레일의 구매, 전차의 시간별 위치, 견인전동기의 견인력은 나타내며 11은 이들을 사용하여 계산된 전차의 전력을 나타낸다. 그림 12는 제한된 알고리즘에 의해 구해진 전차의 전압 분포를 나타낸다. 그림 11에서 전차가 역행 시는 양(+)을 나타내고, 회생제동 시에는 음(-)을 나타낸다. 그림 12에서 전차의 전압이 역행 시는 감소하고, 전차가 회생 제동 시는 전차의 전압이 상승하게 됨을 보여주고 있다.

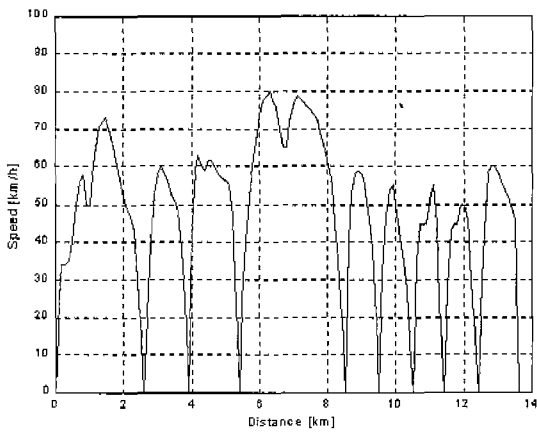


그림 7 전차의 거리별 속도
Fig. 7 Velocity of train on distance

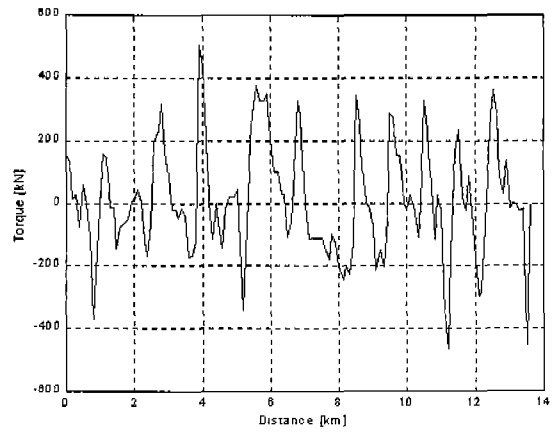


그림 10 권인전동기 권인력
Fig. 10 Torque of Traction Motor

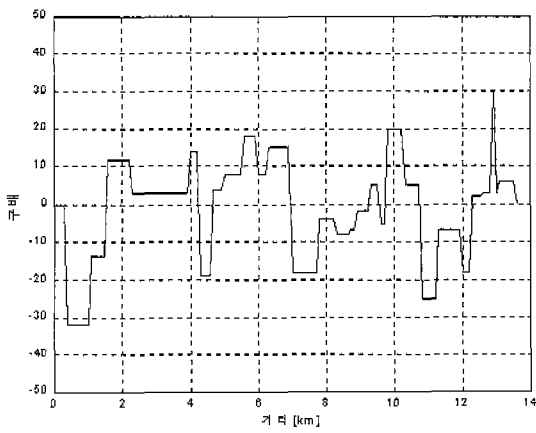


그림 8 레일의 구배
Fig. 8 Slop of Rail

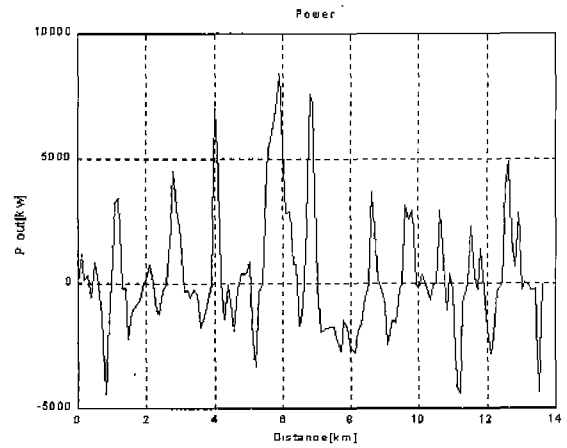


그림 11 전차의 전력
Fig. 11 Power of Train

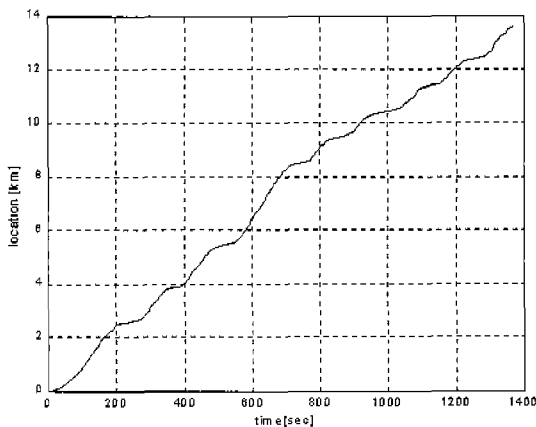


그림 9 시간별 전차의 위치
Fig. 9 Location of train on Distance

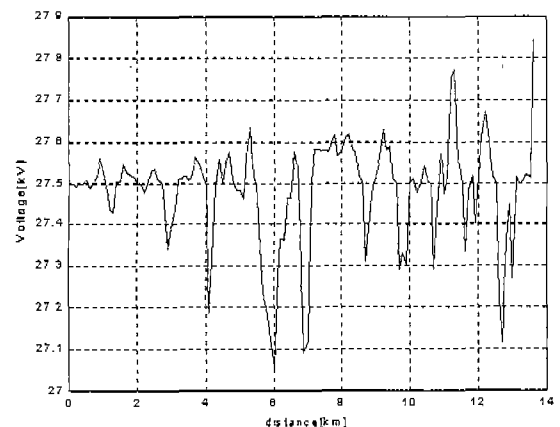


그림 12 거리별 전차전압
Fig. 12 Voltage of Train on Distance

2.3.2 전차의 운행상황을 고려하지 않은 다수전차 해석2

본 해석에 적용된 선로의 배치는 그림 3, 4, 5에서 주변전 소로부터 첫 번째 AT까지는 2[km], AT와 AT 사이의 간격은 12[km]이다. 전차의 소비전력은 8[MW]로 가정하고 다량 전차가 운행하는 경우 계통의 전압 분포를 알아보기 위하여 전차가 1대, 2대, 3대의 경우를 모의해석 하였다. 그림 13은 급전계통에서 전차 1대가 16[km]지점에 위치한 경우이고, 그림 14는 1대의 전차가 28[km]에 위치한 경우, 그림 15는 2대의 전차가 17, 28[km] 지점에 각각 위치한 경우이다. 그림 16은 2대의 전차가 8, 34[km] 지점에 위치한 경우이며 그림 17은 3대의 전차가 8, 20, 32[km]에 위치한 경우이다.

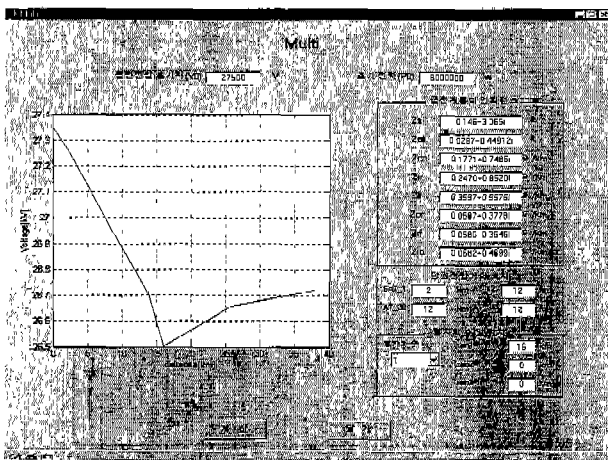


그림 13 16[km] 지점 전차 위치 시 계통전압
Fig. 13 System voltage on distance (train on each 16[km] position)

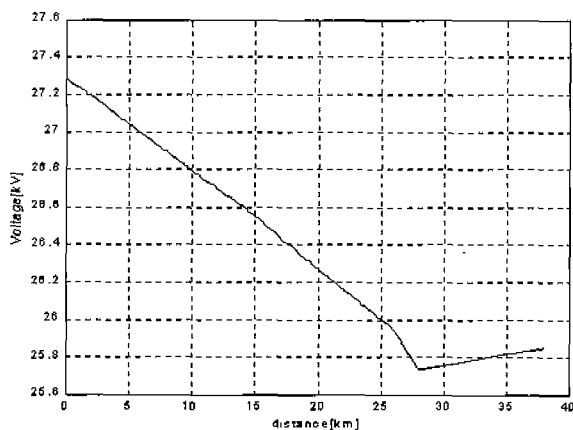


그림 14 28[km] 지점 전차 위치 시 계통전압
Fig. 14 System voltage on distance (train on each 28[km] position)

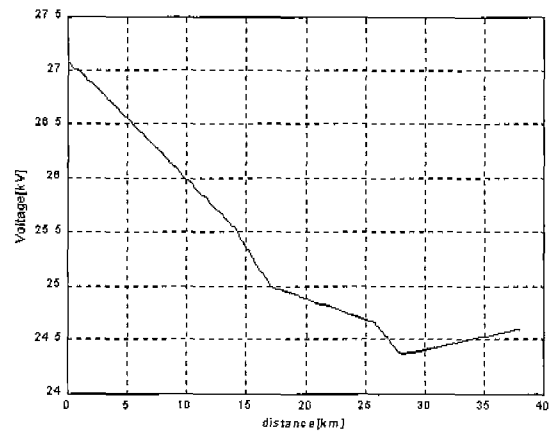


그림 15 17, 28[km] 지점 전차 위치 시 계통전압
Fig. 15 System voltage on distance (train on each 17, 28[km] position)

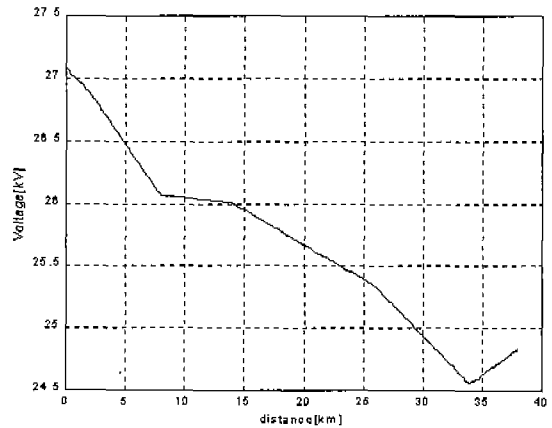


그림 16 8, 34[km] 지점 전차 위치 시 계통전압
Fig. 16 System voltage on distance (train on each 8, 34[km] position)

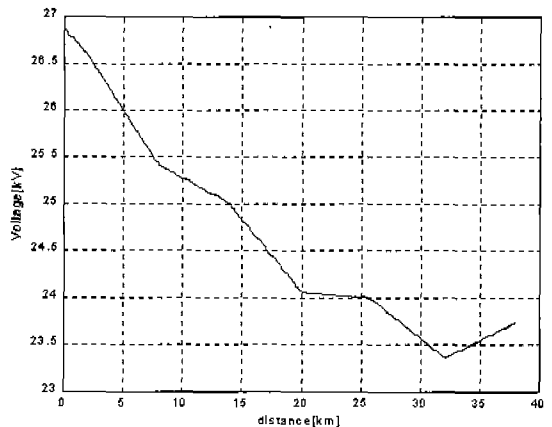


그림 17 8, 20, 32[km] 지점 전차 위치 시 계통전압
Fig. 17 System voltage on distance (train on each 8, 20, 32[km] position)

그림에서 전차의 전압 초기치가 27.5[kv]이나 시작 지점에서 떨어지는 이유는 변압기의 내부 임피던스 때문이다. 전원에서부터 전차의 지점까지 전압이 계속 떨어지다가 전차를 지나 AT에 가까워지면 다시 전압이 상승하거나 감소정도가 둔화하는 것은 AT의 특성이 고려된 사항[4] 이 잘 나타나고 있다..

3. 결 론

본 논문에서는 AT 교류 급전 계통에서 전차의 위치별 전류의 분포를 기준으로 급전계통을 전기적으로 등가화 시켜 모델링을 했고, 급전계통 내 다수의 전차 운전 시 동적 전압의 해석 알고리즘을 제안하였다. 급전계통 해석에 있어 가장 중요한 시스템의 전기적 등가모델링 기법과 계통 내의 AT로 분할되는 전차전류의 흐름에 대해 분석하였고 AT의 해당위치별 전압강하를 고려하였다. 또한 전차의 대수, 전차의 위치 변화에 따라 언제든지 전차 전압의 계산이 가능하도록 하였으며, 다수의 전차 운행 시 전차의 상호 작용을 고려한 계통 전체 전압분포를 도출하는 방법을 제시하였고 이를 합산하여 다량전차의 해석을 도모하였다. 제안된 알고리즘에 의한 프로그램은 GUI 환경을 구축하여 일반사용자도 간단한 I/O 변환에 의해 AT 급전계통의 해석이 가능하도록 하였다. 차후의 문제로는 전차의 특성에 대한 자세한 모델링으로 알고리즘의 정확성 확보와 실측데이터와의 비교를 통한 정확성 검증이 필요하다. 이를 기존의 계통과 신설되는 계통에 적용하면 전력용 변압기의 위치, 용량 선정 및 변전소의 설치간격, 급전가능 거리 등 기본적인 급전계통의 설계와 운영에 높은 신뢰성의 자료를 제공할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 한국고속철도 건설공단, "고속철도 연구보고서 (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 다수전차 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
- [6] 임성정, 김재철, 추동욱 외 2인, "전기철도 시스템에서 직격뢰에 대한 가공지선의 뇌피 효과", 한국 조명.전기설비 학회 논문지. vol15, No.3, pp91-96. 2001년.5월.

저 자 소 개



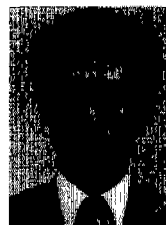
추 동 욱 (秋 東 旭)

1960년 1월 29일생. 1984년 2월 충남대학교 전기과 졸업. 2001년 8월 숭실대학교 대학원졸업(공학). 2002년 현재 경문대학 전기과 조교수.

Tel : 031-610-8032

Fax : 031-610-8039

E-mail : choodw@kmc.ac.kr



김 재 철 (金 在 哲)

1955년 7월 22일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과졸업. 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과졸업(공학). 현재 숭실대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 02-820-0647

E-mail : jckim@ee.ssu.ac.kr