

정전력모형을 이용한 전기철도 시스템의 회로 모델링 및 해석기법

A Modeling and Analysis of Electric Railway System Using Constant Power Model

홍재승* 김주락** 오광해*** 창상훈**** 김정훈*****
Hong, Jae-Seung Kim, Joorak Oh, Kwang-Hae Chang, Sang-Hoon Kim, Jung-Hoon

ABSTRACT

This paper presents a simulation method with constant power model for the train load. In power system simulation loads could be modeled as a constant power, constant current, constant Impedance or a function of voltage and frequency. At this time, however, representing a train load as the function is difficult because of the lack of data. Therefore as a first step, simulation method with a constant power model for a train is studied, and the test result is compared with the simulation result using the constant Impedance model.

1. 서 론

전차는 급전계통에서 보면 이동과 정지를 반복하는 집중부하이므로 전기적 변화가 매우 심하고, 한 급전구간에 여러 편성의 차량이 운행할 때에는 차량간의 상호영향으로 특성이 수시로 변하는 특징을 가지고 있다. 따라서 급전계통에서 나타나는 현상을 정확히 분석하기 위해서는 전기적 특성분석과 함께 열차의 견인력, 운전특성 및 운행 스케줄, 선로상태(구배, 곡선, 터널 등) 등을 고려한 종합적인 해석이 필요하다. 이러한 전기철도 급전계통해석 시뮬레이션은 급전설비의 용량 결정과 기존 시스템에서의 열차운용계획 변경 시 전력소모량의 변화와 계통 측면에서 공급 가능성의 여부를 검토하는데 사용된다.

전기철도 급전계통 해석은 정태해석방법, 과도해석방법이 있고, 고장해석이 필요하다. 그러나 장시간의 time-step해석을 해야하므로 일반적으로 전기차의 위치를 고정시키고 해석하는 정상상태 해석방법이 이용되고 있다. 본 논문에서도 정태적인 해석방법을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으나 장기적으로는 동태적인 해석방법을 도입하여 급전계통을 해석하는 것이 보다 정교한 시뮬레이션이 될 것이다.

전기철도 급전계통의 설계에 있어 열차주행 성능과 관련하여 검토해야 할 사항은 급전계통의 전

* 한국철도기술연구원, 연구원, 경량전철연구팀, 비회원
** 홍익대학교 전기제어공학과 박사과정, 비회원
*** 한국철도기술연구원, 선임연구원, 철도전력연구팀, 정회원
**** 한국철도기술연구원, 책임연구원, 철도전력연구팀, 정회원
***** 홍익대학교 전기제어공학과 교수, 정회원

압강하로서 지금까지는 한 대의 열차에 대한 평균값을 근거로 근사적인 방법으로 해석하여 정당성을 인정받기에 부족하였고[1], 전차 소비전력의 대부분을 차지하는 견인전동기를 정임피던스 모델로 해석하여 전기적 부하를 제대로 반영하지 못하는 등의 문제점을 안고 있었다.[2,3] 전기차에서 요구되는 견인력을 일정전류 부하로 표현하는 것이 불가능한 전기철도 부하는 최근 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)차량의 도입으로 역률이 거의 1에 가까운 정전력부하 형태를 나타내고 있어 기존개발한 회로모델이 이를 반영하였다. 또한 정전력 부하의 특성을 표현하기 위해 전압크기에 따라서 전기차 부하의 임피던스 값을 변경하는 방법을 이용하여 반복적으로 푸는 수치해석방법을 도입하여 전압강하 해석의 정교함을 사례연구로 입증하고자 한다.

2. 정전력부하로 표현된 전차

그림 1은 전차 세 대가 운전중인 선로를 전기회로로 등가화한 것으로, 전원의 경우 내부임피던스를 포함한 정전압원으로 표현하였으며, 전차선, 레일, 급전선 등은 자체 및 상호 임피던스로 표현된다.[4,5] 기존의 전차선로의 해석은 전차를 정임피던스로 보아 회로를 해석하였으나 본 논문에서는 견인 전동기의 정전력특성을 반영하여 전차의 전압을 구하는 형태의 회로적 접근법을 사용한다.

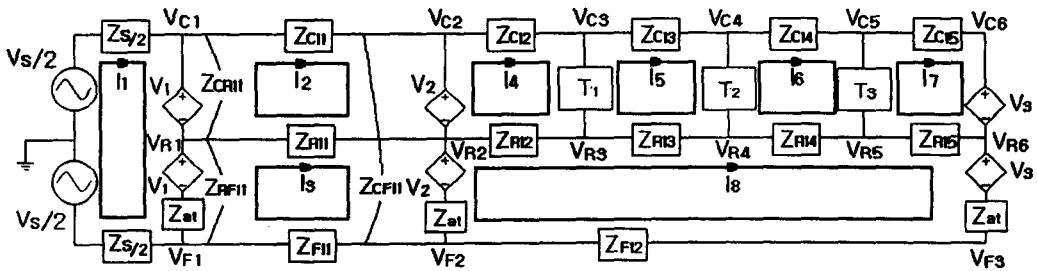


그림 1. 전차선로의 회로 모델링

2.1 부하모델링과 전차

전기철도는 전력시스템 측면에서 보면 전기에너지를 소비하는 하나의 부하로 표현된다. 최근 전력시스템에서는 기존의 단순한 부하의 표현으로서는 안정도 해석과 조류계산의 결과의 신뢰성이 떨어진다는 연구 결과에 의해 시스템의 전압과 주파수에 따라 변화하는 부하전력의 수식적 모델링에 대한 연구가 수행되었다.[6-8] 따라서 전차선로의 해석에서도 전동기에 의해 구동되는 전차의 특성과 현상을 정확하게 반영한 회로적 모델링을 구현하는 것이 보다 정밀한 시스템 해석에 도움이 될 것이다. 전력시스템에서 부하의 정식화된 수식적 모델링으로는 ZIP모델, 지수함수 모델, 다항식 모델 등이 있으나 물리적인 개념이 확실하여 가장 많이 사용되어왔고, 전차의 모델링에도 가장 적합한 것으로 판단되는 ZIP 모델을 차량의 부하적 특성을 나타내는 데 이용하기로 한다. ZIP 모델에 대한 수식은 식 (1)~(3)과 같다.

$$P = K_p \quad : \quad \text{정전력 모델} \quad (1)$$

$$P = K_I V \quad : \quad \text{정전류 모델} \quad (2)$$

$$P = K_Y V^2 \quad : \quad \text{정어드미턴스 모델} \quad (3)$$

ZIP 모델에는 식(1)에서와 같이 정전력, 정전류, 정임피던스, 복합 모델 등이 있으나 본 논문에서는 식(1)의 정전력 모델을 사용하기로 한다. 그 이유는 전차는 정태적인 부하가 아닌 시간에 따라 변화하는 동태부하이지만, 운행 스케줄에 의해 전구간에서 운전속도가 규정되어 있어서 일정 위치에서는 항상 동일한 전력을 소비하고, 역률 또한 1에 가까운 값을 가지는 정전력부하이기 때문이다. 또한 전동기가 전기적 출력을 일정하게 유지하려 한다는 특성을 반영하기 위해서도 전차의 소비전력을 일정값으로 모델링하는 정전력 모델을 도입하는 것이 타당할 것이다.

2.2 전차의 소비전력

전차의 소비전력을 정전력 모델로 등가화한 후에는 전차의 각 위치별 소비전력을 표준운전 선도의 운행차량의 기점에서의 출발 및 도착시간을 기반으로 식(4)~(6)에 의해 구하게 된다. 식(4)는 전차가 가속을 할 때의 유효전력이고, 식(5)는 감속할 때의 유효전력을 나타낸다.[9]

$$P_E = 2.722 \times 10^{-3} F v / \eta \quad (4)$$

$$P_B = 2.722 \times 10^{-3} B_m v \times \eta \quad (5)$$

$$Q = P \times \sqrt{1 - \cos^2 \phi} \quad (6)$$

단, P_E : 역행시 유효전력 [kW]

P_B : 회생시 유효전력 [kW]

Q : 무효전력 [kvar]

F : 차량의 견인력 [N]

B_m : 회생제동력 [N]

v : 차량의 속도 [km/h]

η : 차량의 효율

$\cos \phi$: 차량의 역률

3. 정전력부하로 표현된 전차선로의 해석

회로모델로 등가화된 급전계통의 해석은 한 구간에 전차대수에 따라 미지수 및 식의 개수가 변하는 방정식의 해를 구하는 문제이다. 만약 전차의 대수가 M 이라면 미지수, 방정식 모두 $M+5$ 개로 표현된다. 이러한 문제의 해를 찾기위해 본 논문에서는 수치해석기법중 Gauss법 이용하기로 한다. 특히 Gauss법은 해의 안전성이 보장되는 장점이 있으며, 본 문제에 가장 적합한 방법이라고 사료된다. 식(7)은 Gauss법의 기본 형태이다.

$$x = f(x) \quad (7)$$

식(7)과 같은 Gauss법에 정식화된 전기철도 급전계통 해석문제를 적용하는 것은 다음과 같다. 전차가 소비하는 전력이 식(4)~(6)으로 계산되기 때문에, 전차 양단 전압의 초기치를 지정하여 반복계산으로 해를 구하게 되면 전차의 모든 전기량을 계산할 수 있게 된다. 따라서 구하고자하는 해 x 는 전차에 걸리는 전압 V_T 로 적용된다. 다음 식(8)은 페로해석법을 이용하여 정리한 수식이다.

$$\begin{aligned}
 f_1(I_{Loop1}, I_{Loop2}, \dots, I_{Loopn}, V_{T1}, V_{T2}, \dots, V_{TM}) &= V_S \\
 f_2(I_{Loop1}, I_{Loop2}, \dots, I_{Loopn}, V_{T1}, V_{T2}, \dots, V_{TM}) &= 0 \\
 &\vdots \\
 f_n(I_{Loop1}, I_{Loop2}, \dots, I_{Loopn}, V_{T1}, V_{T2}, \dots, V_{TM}) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

위 식을 이용하여 $I_{Loop1} \sim I_{Loopn}$ 를 구하여 전차에 걸리는 전압을 계산하여 전차에 걸리는 전압과 비교를 한다. 여기서 설정한 오차보다 크면 계산을 다시 수행하게 된다. 그림 2는 정전력부하를 적용한 전차선로를 해석하기 위해 사용된 계산 흐름도이다.

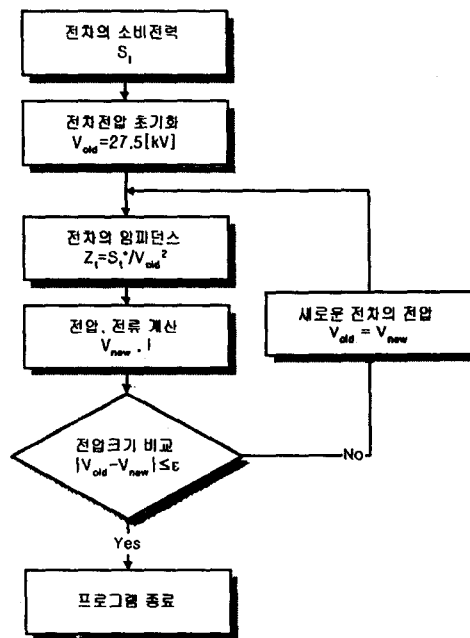


그림 2. 계산 흐름도

4. 사례연구

전기차의 정전력모델이 정임피던스모델에 비하여 보다 향상된 결과를 나타냄을 보이기 위해 현재 운행중인 4호선의 안산선을 사례시스템으로 선정하였다.

4.1 입력자료

4.1.1 회로자료

전기철도의 급전계통을 등가화한 회로에 사례시스템을 적용하기 위한 각 임피던스의 값과 소비전력값은 다음과 표 1, 2와 같다. 전차의 위치와 소비전력을 계산하기 위하여 정차시간은 20초, 운행간격은 2분으로 설정하여 계산하였다. 따라서 500초 후의 전차의 위치와 전차의 소비전력은 표 2와 같다. 또한 전차의 총 중량은 견인력을 최대로 하기 위하여 10량 구성, 승객이 만차인 경우를 기준으로 한 559[ton]으로 선정하였다. 이 때, 전차는 두 번째 단권변압기와 세 번째 단권변압기 사이에 존재한다. 세 번째의 전차는 회생제동에 해당된다.

표 1 임피던스의 크기

종류	크기	단위
전원임피던스(ZS)	2.36+j19.5	[Ω]
단권변압기 내부임피던스(Zat)	0.0287+j0.44912	[Ω]
전차선의 임피던스(ZC)	0.194+j0.731	[Ω/km]
레일의 임피던스(ZR)	0.009+j0.467	[Ω/km]
급전선의 임피던스(ZF)	0.122+j0.587	[Ω/km]
전차선-레일의 임피던스(ZCR)	0.053+j0.373	[Ω/km]
전차선-급전선의 임피던스(ZCF)	0.051+j0.361	[Ω/km]
레일-급전선의 임피던스(ZRF)	0.058+j0.369	[Ω/km]

표 2. 전차의 위치 및 소비전력

전차	위치	유효전력	무효전력
Train1	16.0[km]	5105.651[kW]	720.240[kvar]
Train2	17.2[km]	1788.615[kW]	252.315[kvar]
Train3	18.3[km]	-831.676[kW]	-117.322[kvar]

4.2 결과분석

4.2.1 Gauss 해석결과

그림 1에 표 1, 2의 입력자료를 대입하여 전차선로 각 마디의 전압을 구하면 표 3과 같다.

표 3 정전력모델로 해석한 각 마디의 전압

종류	크기[V]	위상각	종류	크기[V]	위상각	종류	크기[V]	위상각
V _{C1}	27118	-2.23	V _{R1}	3.4906	-142.71	V _{F1}	27118	177.77
V _{C2}	26899	-3.12	V _{R2}	45.2403	-106.16	V _{F2}	26933	177.15
V _{C3}	26722	-3.73	V _{R3}	35.3862	136.38	V _{F3}	26781	176.43
V _{C4}	26720	-3.72	V _{R4}	30.0644	141.41			
V _{C5}	26732	-3.66	V _{R5}	20.6929	162.98			
V _{C6}	26742	-3.63	V _{R6}	18.1935	-166.06			

반복계산에 의한 단권변압기와 각 열차의 양단 전압은 그림 3과 같다.

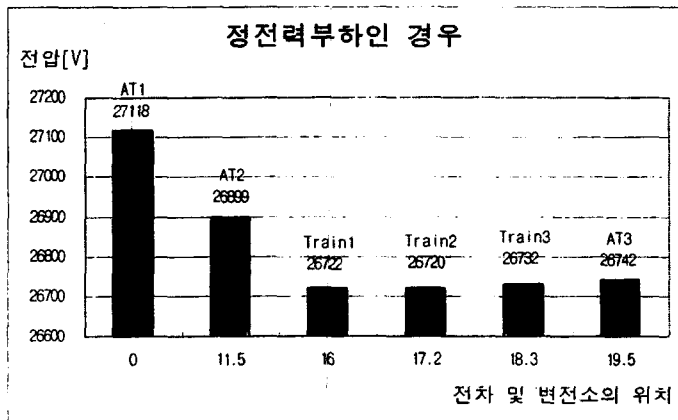


그림 3 정전력모델로 해석한 전차선의 전압

4.2.2 정전력모델과 정임피던스모델과의 결과비교

전차의 모델방법에 따라 계산결과의 차이를 비교하기 위하여 전차를 정임피던스모델로 취급하였다.[5] 전차는 정전력모델을 해석한 경우와 같은 위치에 있으며, 전차의 초기전압은 27.5[kV]로 가정하였다. 계산결과는 다음과 같다.

표 4 정임피던스모델로 해석한 각 마디의 전압

종류	크기[V]	위상각	종류	크기[V]	위상각	종류	크기[V]	위상각
V _{C1}	27140	-2.12	V _{R1}	3.3073	-142.51	V _{F1}	27140	177.88
V _{C2}	26934	-2.95	V _{R2}	42.8647	-105.96	V _{F2}	26966	177.30
V _{C3}	26765	-3.53	V _{R3}	33.5295	136.57	V _{F3}	26822	176.62
V _{C4}	26763	-3.53	V _{R4}	28.4849	141.61			
V _{C5}	26775	-3.47	V _{R5}	19.6053	163.18			
V _{C6}	26785	-3.44	V _{R6}	17.2382	-165.85			

계산결과를 살펴보면, 전압의 차이는 0.19[V]~43[V]까지 차이가 나지만, 레일에서 V_{R6}의 경우 5.25[%]의 오차가 발생함을 알 수 있다. 그림 4는 두 방법에서 전차 양단에 걸리는 전압을 표시했다.

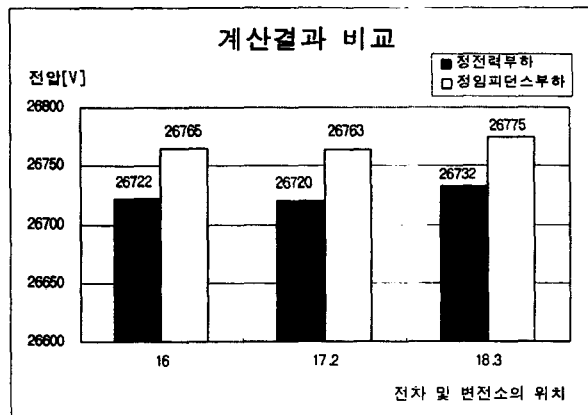


그림 4 계산결과 비교

계산결과를 비교하면 그래프의 곡선은 같은 형태를 나타내지만, 정전력부하를 도입하여 전차의 전압을 변화시키면서 반복수행을 통한 결과가 정임피던스부하인 경우보다 정밀하다고 판단할 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문은 전차급전시스템의 시뮬레이터 구축을 위한 해석기법에 대한 연구로서, 전차를 정임피던스모델로 등가화한 기존의 연구와 달리 견인전동기의 특성을 반영한 정전력 모델로서 전차를 모델링하였다. 제안한 방법은 사례연구에서와 같이 정임피던스모델로 등가화했을 때보다 최대 5.25[%]의 차이가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 정태해석에서도 부하의 모델링방법에 따라 결과에 차이가 있다.

본 연구결과는 정태적인 방법으로 전차운행에 따른 급전계통의 전기량을 해석하는 알고리즘으로, 동특성해석으로 확장시 초기치로 사용할 수 있을 것이다. 또한 고장상태, 과도

상태 등에서의 급전계통을 해석하는 경우 전차의 모델링 및 해석에 초석이 될 것이다. 이와 같은 향후 연구를 위해서는 전차에 대한 전압-주파수 특성을 해석하기 위한 실측실험 및 분석이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. R. J. Hill, I. H. Cecik(1993), "On-Line Simulation of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol 42 No.3, pp.365-372.
2. 오광해, 창상훈, 한문섭, 이장무, "전철부하에 기인된 계통 전압불평형 평가기법", 대한전기학회 하계학술대회논문집 C권, pp. 787-789, 1997.
3. Jun-Min Cha, Sang-Hoon Chang, Kwang-Hae Oh, "Assesment of Autotransformer-Fed Eletric Traction systems Using Thevenin's Equivalent Circuit" ICEE98 Proceedings Vol I, pp. 504-507, 1998.
4. 홍재승, 김정훈, 김발호, 창상훈, "일반회로해석법을 위한 전차선로 모델링 및 정교한 해석에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회논문집, pp. 300-302, 1999.
5. 김정훈, 김발호, 오광해, 창상훈, "정교한 전차선로의 회로모델링 및 범용성 해석 기법 개발" 대한철도학회 추계학술대회논문집, pp. 296-301, 1999.
6. C.Concordia. "Representation of Loads", IEEE PES Winter Meeting 1975, Paper 75 CHO 970-4-PWR
7. General Eletric Co., "Load Models for Power Flow and Transient Stability Computer Studies", EL-5003, Vol. 1-4, EPRI Project 847-7, 1987
8. Bong-Yong Lee, Jung-Hoon Kim, Keon-Bo Shim "System Wide Load Models for Flows and Transient Stability in Korea's Power System" IEEE International Conference on Power System Technology, Vol 1, pp183-188, Sept 1991
9. 철도청, 전류 MAP을 이용한 전차선로 관리시스템 구축 연구, 1998