PSCAD/EMTDC를 이용한 전기철도 전력공급시스템 해석모델개발

論 文
55A-11-3

Development of Analysis Model for Metro Railway Power System Using PSCAD/EMTDC

張 吉 洙* · 車 濬 敏†
(Gilsoo Jang · Jun-Min Cha)

Abstract - A direct current electric power system is one of the most important power source in a metro railway system. As railway system is growing up today, the importance of DC electric power system is emphasized. The study for systemization and standardization of design and operation technique in DC electric power system is undergoing nowadays. For these studies, the development of standard analysis model for metro railway electric power system is required. In this paper, a standard analysis model for metro railway electric power system which is using PSCAD/EMTDC program is proposed. The proposed model is explained and the validity is shown by using the case studies.

Key Words : PSCAD/EMTDC, DC Power System, Metro Railway, Analysis Model

1. 서 론

전기철도의 전력공급시스템은 전기철도부하의 중요한 전력공급원으로서, 최근의 수도권 및 지방도시 전기철도 확충 및 운용 상황 등을 고려해 볼 때, 정확한 전력 공급시스템 해석의 필요성이 부각되고 있는 실정이다. 그러므로, 전기철도 전력공급시스템 설계 및 운용기술을 체계화하고 표준화하기 위한 연구가 진행 중이다. 이러한 연구를 뒷받침하기 위해서는 전기철도 전력 공급시스템의 표준해석 모델개발이 필요하며, 그러한 필요성에 따라 전력계통의 전자기적 과도현상 분석을 위해 많이 사용되고 있는 상용 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 전기철도의 전력 공급 해석 모델을 개발하였다. 본 논문에서는 개발된 해석 모델을 설명하고 사례 연구를 통해 해석 모델의 유용성을 보이고자 한다.

2. 직류 구간 급전시스템 해석 모델 개발

급전시스템의 안정적 전력 공급 능력과 전력 품질의 해석을 위해서는 해석 모델의 개발이 필수적이며, 이에 따라 전자기적 과도현상 해석에 적합한 상용 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 직류 구간 급전시스템 해석 모델을 구성하고자 한다.

* 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 副敎授 · 工博
† 교신저자, 正 會 員 : 大眞大 工大 電氣情報시스템工學科 副敎授 · 工博
E-mail : chamin@daejin.ac.kr
接受日字 : 2006年 9月 28日
最終完了 : 2006年 10月 12日

본 연구에서 대상으로 하는 직류 구간 급전시스템은 변전소(SS: Sub-Station), 구분소 (SP : Sectioning Post), 급전타이 포스트 (TP : Tie-Post), 정류 포스트 (RP : Rectifying Post) 등의 활용여부에 따라 구성된 다음의 4개 시스템이다.

① 변전소만으로 구성된 시스템
② 구분 급전 시스템
③ Tie 급전시스템
④ 정류 포스트 활용시스템

2.1 직류 구간 급전시스템의 PSCAD/EMTDC 해석 모델의 개발

직류 구간 급전시스템의 PSCAD/EMTDC 해석 모델의 대상으로서 다른 형태의 해석 모델로 구성 변경이 용이한 서울지하철공사 제 3호선 직류 구간 급전시스템(지축역 - 수서역)을 선정하였다. 직류 구간 급전시스템의 구분에 있어서 변전소만을 이용한 급전시스템과 정류포스트를 이용한 급전시스템의 혼합 형태에 해당한다. 표준 해석 모델의 대상으로 제 3호선 계통을 선정하였지만 PSCAD/EMTDC는 매우 유연한 GUI 환경을 지니고 있어 다른 계통 또한 쉽게 구성이 가능하다. 직류 구간 급전시스템이 매우 유사한 구성을 지니는 특성상 제 3호선 계통의 구성만으로도 다른 직류 구간 급전시스템의 기본적인 구성은 갖춘 것으로 볼 수 있다.

직류 방식의 변전 전압은 다음 표 1의 조건을 만족하도록 구성하였다.

표 1 직류 방식의 변전 전압

Table 1 Voltage of Direct Current system

수전 전압	22.9 kV
단락 용량	200 MVA 이상
변동 범위	1.1 ~ 1.65 kV

변전소 등가 임피던스는 한국전력공사 자료에 근거하였고, 다음 표 2에 정리하였다.

표 2 변전소 등가 임피던스

Table 2 Equivalent impedance of sub stations

한전측		지하철측	154/22.9 kV Tr 2차 계통누계임피던스	
변전소명	선로명	변전소명	Z1	
불광	불철	지축역	0.352	36.697
은평	은철#1	연신내역	0.240	34.055
현저	현철	독립문역	0.079	33.378
원남	북철	종로3가역	0.227	34.561
신당	약철	약수역	0.064	27.072
반포	압철	압구정역	0.058	34.142
반포	반철	고속터미널역	0.058	34.142
양지	서철	남부터미널역	0.161	27.799
개포	대청	대청역	0.287	33.957
수서	수철	수서역	0.148	37.408

구성을 위한 전제조건은 아래의 6개항과 같으며, 변압기 사양은 "1.695 MVA, 22.9/0.59 kV, 10.0%" 이고, 정류기 사양은 "12 pulse diode 정류기, DC 정격전압 1.5 kV"이다.

① 변전소 전원을 테브난 등가전원으로 구성.

② 전기차 부하는 고정 저항 모델로 구현.

③ 12 pulse diode 정류기 사용.

④ 레일 임피던스는 역간 케이블로 구성.

⑤ 역간 결선은 지중 케이블로 연결: 역간 거리는 5 km로 설정하고, 대지 저항은 전형적인 100.0 Ω-m로 선택하였으며, Relative ground permeablity는 1.0으로 하였다.

⑥ 소내 부하는 R=227.16, L=110.01 의 부하를 역당 수개의 병렬 연결로 구성(부하 역률 0.9)

2.2 PSCAD/EMTDC 모델

지하철 3호선의 전력 계통을 12 subsystem으로 구성한 PSCAD/EMTDC draft를 구성하였다.

급전시스템의 타당성 테스트를 위한 기본적인 모의로서 부하는 고정 저항으로 가정한다. 고정 저항의 크기는 다음과 같은 세 부류로 구분할 수 있다.

① R = 0.10 Ω (전차 선로 급전 분기 간격 500 m 구간 사고점 저항)

② R = 0.50 Ω (정상 전기차 운행시 저항)

③ R = 1.0E+6 Ω

2.3. 모의 결과

계통 사고 없이 부하 상태에 따른 모의를 실시하였으며, 상기 각 조건에 따른 지축역(SS1), 고속터미널역(SS8) 그리고 수서역(SS12)의 DC 전류 및 전압의 모의 결과는 다음과 같다. 전동차는 지축역에서 한 대가 달리고 있다고 가정한다.

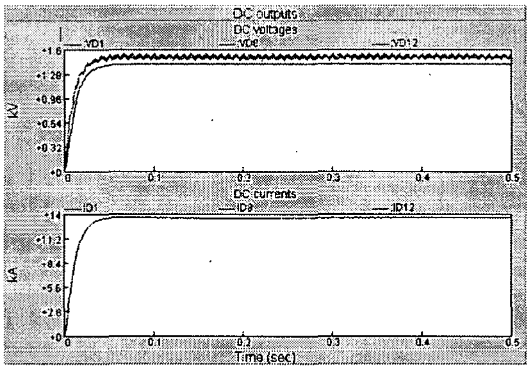

그림 1 부하 R=0.10Ω인 경우의 DC 전압

Fig. 1 Case for the load R=0.10Ω

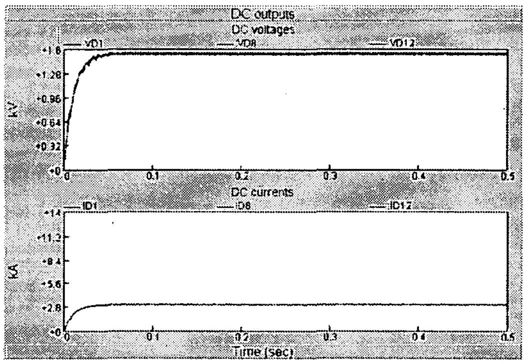

그림 2 부하 R=0.50Ω인 경우의 DC 전압

Fig. 2 Case for the load R=0.50Ω

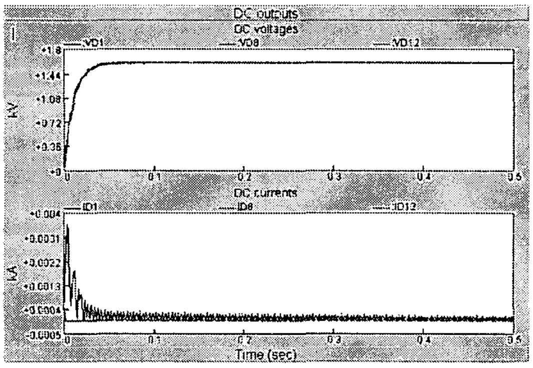

그림 3 부하 R=1.0E+6Ω인 경우의 DC 전압

Fig. 3 Case for the load R=1.0E+6Ω

2.4 분석

22.9 kV의 변전소 전압을 정류를 거쳐 DC 방식으로 급전하는데, 정상적인 운전을 한다고 볼 수 있는 0.50 Ω 정도의 전동차 운행 시에 1500 V 정도의 DC 전압이 형성됨을 알 수 있다. 이에 상당하는 DC 전류는 3000 kA 정도가 되었다. 이는 실측값과 매우 유사한 값임을 알 수 있다. 또한 급전선 사고를 가정한 모의의 경우 전압 강하가 상당히 나타남을 보여주었고, 무부하 상태를 가정한 모의의 경우 정격전압에 대한 전압 상승을 보여주고 있다.

3. 전동차 부하 모델 개발

위에서 구성한 직류 구간 급전시스템 해석 모델은 급전의 대상이 되는 전동차 부하의 동특성을 획일적으로 고정 저항으로 취급하는 것에 한계가 있다고 보여진다. 이러한 이유로 부하의 동특성을 주입하고자 전동차 부하 모델을 기존의 고정 저항 모델에서 전압 인덱스(dP/dV)를 사용하는 변형 Fixed load 모델과 정전력 부하 모델을 적용하고자 한다.

3.1 모델 구성의 전제 조건

부하 모델 자체의 타당성을 검증하기 위하여 일단 다음과 같은 전제 하에 모의하였다.

① 급전 전압의 정격은 1,500 V로서 이상 DC 전원으로 가정한다.(Rth=0.001Ω)

② 급전 전압의 변동은 측정된 한국철도기술연구원 자료에 근거하여 0.9 pu부터 1.1 pu까지의 범위에서 임의로 가정하였고, 변동의 시점 또한 임의로 택할 수 있다.

3.2 고정 저항 모델

저항은 0.5 Ω에서 1.0 Ω까지의 고정 저항을 사용한다. 정상 운전시 전기차 부하의 저항값은 0.5 Ω 정도로 보았다.

다음의 그림 4는 고정 저항 모델을 사용한 PSCAD/EMTDC Draft이다.

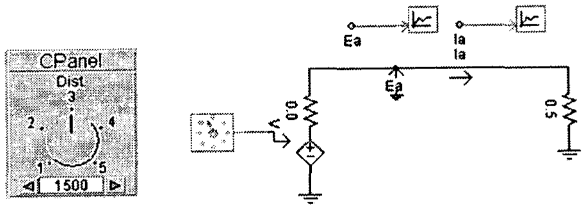

그림 4 고정 저항 모델 (R = 0.5Ω)
Fig. 4 Fixed load model (R = 0.5Ω)

3.3 변형 Fixed load 모델

다음의 그림 5는 정전력 부하를 표방한 변형 Fixed load 모델을 사용한 PSCAD/EMTDC Draft이다.

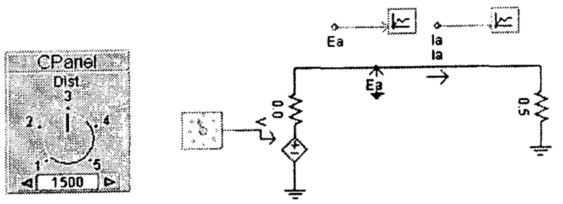

그림 5 고정 저항 모델 (R = 0.5Ω)
Fig. 5 Fixed load model (R = 0.5Ω)

상기 모델은 외부 파일의 데이터를 읽어 들여 부하의 전력을 입력받아 전압 인덱스와 주파수 인덱스에 따라 동작하도록 구현된 PSCAD/EMTDC 표준 Fixed load 모델을 조금 변형한 모델이다. 일정한 측정 시간에 따라 측정된 전압, 전류 데이터를 읽어 들여 부하에 정격 전력을 넘겨주도록 하였다.

이 부하에 입력된 일부의 데이터는 다음의 표 3과 같다. 모의 시간을 고려하여 실제 1초 간격이었던 TIME 항목을 10분의 1로 줄인 0.1 초 간격으로 바꾸었다.

표 3 측정된 자료
Table 3 Measured data

TIME	Volt(V)	Current(A)	Power(MW)
0.0	1484	734	1.09
0.1	1501	792	1.19
0.2	1501	1202	1.80
0.3	1500	1612	2.42
0.4	1493	3059	4.57
0.5	1511	3071	4.64

표 3의 데이터를 예를 들어 부하 모델의 동작을 설명하면, 모의 시간이 첫 타임 스텝일 때 첫 줄의 전압, 전류를 읽어 들여 순시 전력을 계산하고, 시간이 흘러 다음 0.1 초를 넘어설 때 새로이 순시전력을 계산하여 Fload 모델에 넘겨주는 형식을 취하였다.

이 부하는 다음 그림 6과 같은 파라미터를 갖는다. 외부 데이터 입력을 받게 되어 있고, 정격 전압을 입력하게 되어 있다. 중요한 파라미터로서 ZIP 모델의 voltage index와 frequency index가 있다. dP/dV에 해당하는 값을 0으로 넣어 정전력 부하로 동작하도록 하였다.

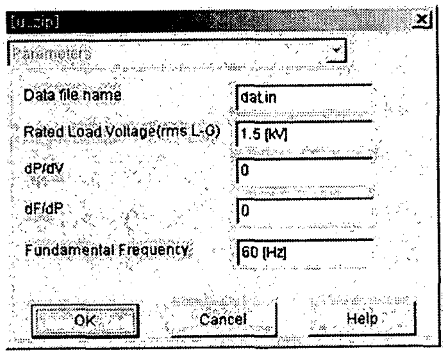

그림 6 부하 파라미터 입력 창
Fig. 6 Parameter input window

3.4 정전력 부하 모델

다음의 그림 7은 정전력 부하 모델을 사용한 PSCAD/EMTDC Draft이다.

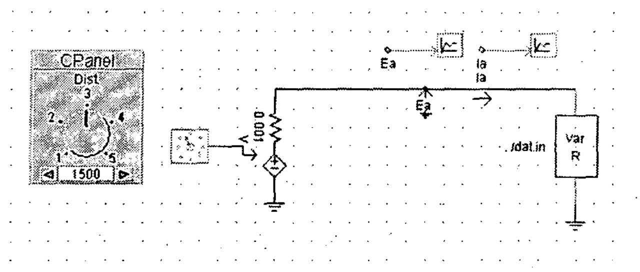

그림 7 정전력 부하 모델
Fig. 7 Constant power load model

상기 모델은 변형 고정 부하 모델과 마찬가지로 외부 파일 입력을 받아 들여 주어진 데이터를 기준으로 동작하도록 하였다. 동작 알고리듬은 다음과 같다. 주어진 외부 데이터 파일에 있는 첫 전압을 읽어 들인다. 이것을 V_0라 하자. 부하는 정전력이므로 P_0라는 전력을 담당하고 있다고 보자. 이로부터 R_1를 계산할 수 있다. 이 계산된 저항 값으로부터 회로 방정식을 풀게 되면 새로운 전압 V_1을 구하게 되고, 이 값으로부터 다시 P_0를 내도록 새로운 저항 값(R_n)을 구한다. 이 루틴을 계속 밟다가 $P_{new}(=V_n+12/R_n)$과 P_0의 차이가 정해진 오차범위 안에 들 경우 부하의 저항값을 R_n으로 선택한다.

PSCAD/EMTDC는 회로 방정식을 매 타임스텝마다 풀어주는 동적 시뮬레이션을 행하여 한 타임스텝에 상기와 같은 루틴을 한번에 밟을 수는 없으므로, 일정 스텝 후에 R_n으로 수렴하게 될 것이다. 다시 말해 V_0에 변동이 발생하는 시점에서 어느 정도의 스텝의 값은 계산과정으로 치부하고 무시할 수 있다고 본다. 안정되는 그 때의 값부터는 적정한 값으로 보아야 한다.

3.5 모의 결과 및 분석

급전 전압의 외란은 0.9 pu부터 1.1 pu까지의 임의 크기와 임의 시간으로 수동 입력하였고, 고정저항모델의 결과는 다음 그림 8과 같다.

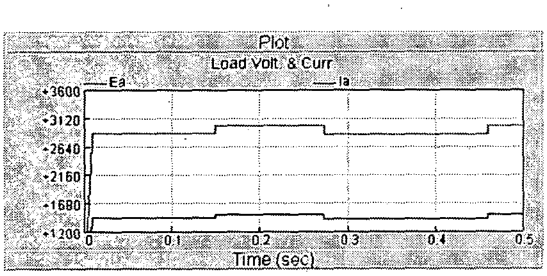

그림 8 고정저항모델의 전압과 전류 파형(R=0.50Ω)
Fig. 8 Voltage and Current wave of fixed load model (R=0.50Ω)

전압은 정격에 해당하는 1500 V 정도를 유지하는 반면 부하 전류의 크기는 상당히 차이를 보일 수 있음을 알 수 있다. 정상적인 운전 시에는 3000 A 정도의 값을 보인다. 따라서 전동차는 0.5 Ω에서 1.0 Ω 정도의 가변 저항 부하로 보는 것이 타당하다.

고정 저항 부하의 경우는 고정값을 사용함으로 전동차의 동특성을 전혀 고려할 수 없지만, 확장 고정 부하 모델의 경우는 입력 파일에 따라 부하 변동의 여지가 있다. 하지만 주어진 서브루틴 (tldm34)을 사용하는 관계로 내부 코드를 변경할 수 없다. 따라서 정전력 부하로 동작시키기에는 무리가 있는 것으로 보여진다. 모의 결과 역시 전압 변동에 비례하는 전류 변화를 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구는 도시철도 직류 구간 급전시스템의 표준 해석모델 개발이며 해석모델 구성은 서울지하철공사 제 3호선 직류 구간 급전시스템을 대상으로 하였다. 본 연구에서 개발된 철도 급전시스템 시뮬레이션 모델은 다양한 급전 및 운전 방식에 대한 검토와 구성 기기들의 교체 및 개선 등에 폭 넓게 사용될 수 있으며, 전기 철도에 의한 주변 지역에서의 전기 품질 문제에 대한 해석과 보상 방안 수립에도 사용될 수 있다. 또한, 본 연구에서 개발된 전동차 부하 모델은 부하를 고정 저항으로 보던 한계를 넘어 전동차의 동특성을 반영하기 위하여 새로운 부하 모델을 제안하였다.

참 고 문 헌

[1] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems Plenum Press, 1984.
[2] Hamoud, G., Probabilistic assessment of inter-connection assistance between power systems, IEEE Transactionsn PS, Vol. 13, No. 2, pp. 535-542, May 1998.
[3] Yin, C.K., Mazumdar, M., Reliability computations for interconnected generating systems via large deviation approximation, IEEE Transactions on PS,Vol. 4, No.1, pp. 1-8, Feb. 1989.
[4] Alex Lago-Gonzalez, Singh, C., The Extended Decomposition - Simulation Approach for Multi-Area Reliability Calculation, IEEE Transactions on PS, Vol. 5, No.3, pp.1024-1031, Aug 1990.
[5] PSCAD/EMTDC Manual, HVDC, 2005.

저 자 소 개

장 길 수 (張 吉 洙)
1967년 10월 26일생. 1991년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 미 Iowa 주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공박). 2000년~현재 고려대 전기공학과 부교수
Tel : 02-3290-3246
Fax : 02-3290-3692
E-mail : gjang@korea.ac.kr

차 준 민 (車 濬 敏)
1964년 5월 9일생. 1989년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 대진대 전기정보시스템공학과 부교수
Tel : 031-539-1915
Fax : 031-539-1910
E-mail : chamin@daejin.ac.kr