

도시철도 DC 급전시스템 해석 모델 개발

Development of Analysis Model for Metro Railway DC Electric Power System

차 준 민* 김 형 철**
Cha, Jun Min Kim, Hyung Chul

ABSTRACT

The DC electric power system is the most important power source in a metro railway system. As metro railway system is expanded recently, the importance of DC electric power system is emphasized. Furthermore, 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 developed. The developed model is explained and the validity is shown by using the case studies.

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

2.1 직류 구간 급전시스템의 PSCAD/EMTDC 해석 모델의 개발

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

* 대전대학교 전기정보시스템공학과 부교수, 정회원

E-mail : chamin@daejin.ac.kr

TEL : (031)539-1915 FAX : (031)539-1910

** 한국철도기술연구원 전기연구본부 선임연구원, 정회원

2.1.1 해석 대상

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 구성 또한 쉽게 구성 가능하다. 직류 구간 급전시스템이 매우 유사한 구성을 지니는 특성상 제 3호선 계통의 구성만으로도 다른 직류 구간 급전시스템의 기본적인 구성은 갖춘 것으로 볼 수 있다.

2.1.2 모델 구성의 전제 조건

① 변전소 전원을 테브난 등가전원으로 구성.

직류 방식의 변전 전압은 수전전압 22.9[kV], 단락용량 200 [MVA] 이상, 그리고 변동범위는 1.1 ~ 1.65 [kV]으로 구성하였고, 변전소 등가 임피던스는 한국전력공사 자료에 근거하였다.

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 permeability는 1.0으로 하였다.

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

2.1.3 기기 사양

① 변압기 사양

: 1.695 MVA, 22.9/0.59 kV, 10.0%

② 정류기 사양

: 12 pulse diode 정류기, DC 정격전압 1.5 kV

2.1.4 PSCAD/EMTDC 모델

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

2.2 모의 결과 및 분석

2.2.1 부하 조건

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

2.2.2 모의 결과

I. 계통 사고 없이 부하 상태에 따른 모의

상기 각 조건에 따른 지축역(SS1), 고속터미널역(SS8) 그리고 수서역(SS12)의 DC 전류 및 전압의 모의를 실시하였으며, 전동차는 지축역에서 한 대가 달리고 있다고 가정한다.

II. 지축역과 고속터미널역 한전 변전소 동시 사고 모의

본 사고는 지축역과 고속터미널역 변전소가 동시에 사고가 발생하여 각각의 차단기가 동작하였을 때를 가정한다. 사고 시점은 상기 사고와 마찬가지로이다.

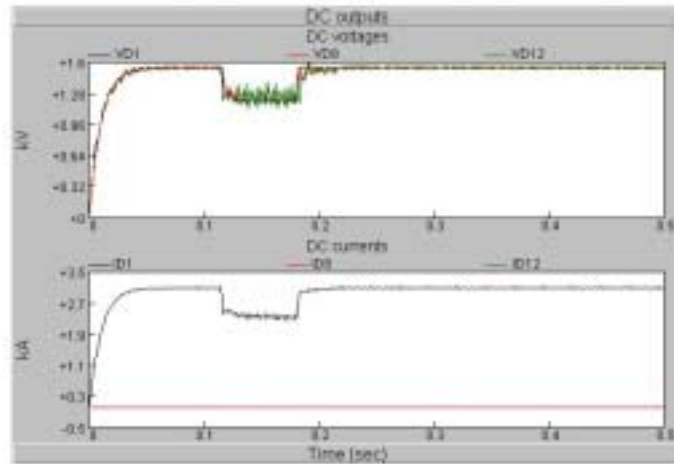


그림 1 SS1 M1과 SS8M2 차단기 동작

III. 지축역 소내 전원 정전 사고 모의

본 모의는 지축역 소내 부하가 탈락하였을 때 전차선 전압 전류를 모의한 것이다.

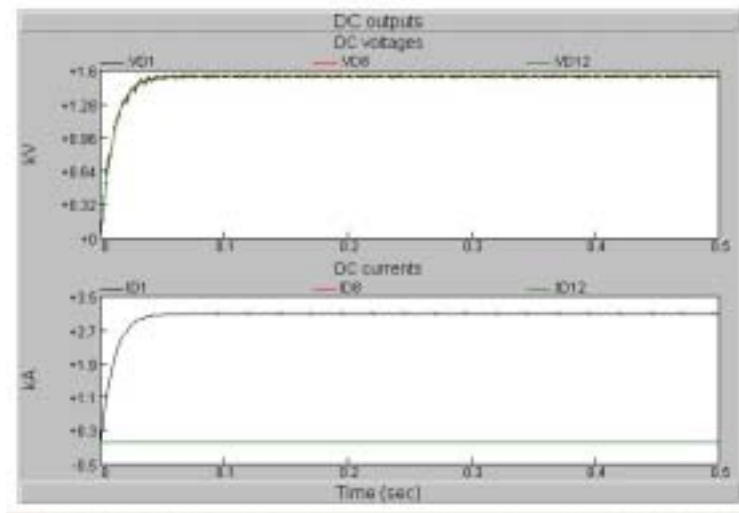


그림 2 SS1 L1 차단기 동작

2.2.3 분석

22.9 kV의 변전소 전압을 정류를 거쳐 DC 방식으로 급전하는데, 정상적인 운전을 한다고 볼 수 있는 0.50 Ω 정도의 전기차 운행 시에 1500 V 정도의 DC 전압이 형성됨을 알 수 있다. 이에 상당하는 DC 전류는 3000 kA 남짓이 되었다. 이는 실측값과 매우 유사함을 알 수 있다. 또한 급전선 사고를 가정한 I번 모의의 ①의 경우 전압 강하가 상당히 나타남을 보여주었고, 무부하 상태를 가정한 I번 모의의 ③의 경우 정격 전압에 대한 전압 상승을 보여주고 있다. II와 III과 같이 변전소 전원이 탈락되는 경우 급격한 전압 하락을 보여준다. IV의 경우 소내 부하가 탈락되었음에도 불구하고 전차선 전압과 전류에는 영향을 주지 않고 있음을 보여주고 있다.

3. 전동차 부하 모델 개발

3.1 목적

제 2장에서 타당한 직류 구간 급전시스템 해석 모델이 구성된 바 있다. 하지만, 상기에서는 급전의 대상이 되는 전동차 부하의 동특성을 확일적으로 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 적용해 보려 한다.

3.2 모델 구성의 전제 조건

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

- ① 급전 전압의 정격은 1,500 V로서 이상 DC 전원으로 가정한다.($R_{th}=0.001\Omega$)
- ② 급전 전압의 변동은 측정된 자료*에 근거하여 0.9 pu부터 1.1 pu까지의 범위에서 임의로 가정하였고, 변동의 시점 또한 임의로 택할 수 있다>(*의 출처는 한국철도기술연구원).

3.3 PSCAD/EMTDC 전동차 부하 모델의 개발

3.3.1. 고정 저항 모델

저항값은 0.5 Ω 에서 1.0 Ω 까지의 고정 저항을 사용한다. 정상 운전시 전기차 부하의 저항값은 0.5 Ω 정도로 보았다.

다음의 그림 3은 고정 저항 모델을 사용한 PSCAD/EMTDC Draft이다.

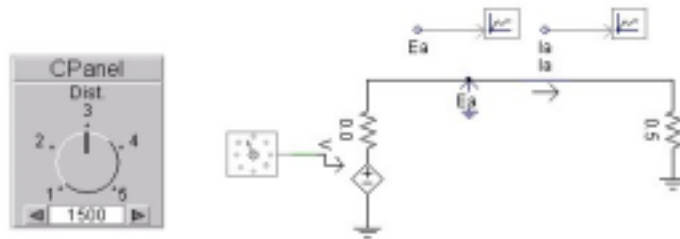


그림 3 고정 저항 모델 ($R = 0.5 \Omega$)

3.3.2. 변형 Fixed load 모델

다음의 그림 4는 정전력 부하를 표방한 변형 Fixed load 모델을 사용한 PSCAD/EMTDC Draft이다.

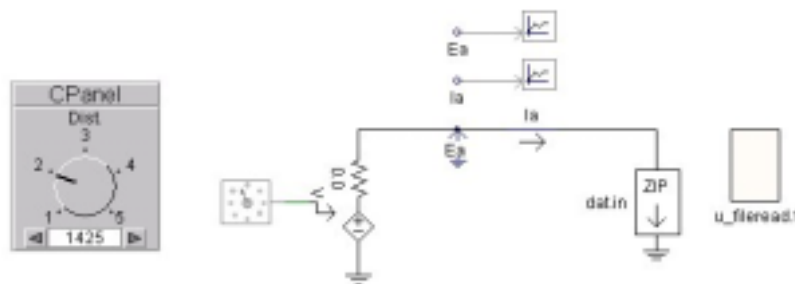


그림 4 변형 Fixed 부하 모델 (외부 파일 사용)

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 1과 같다. 모의 시간을 고려하여 실제 1초 간격이었던 TIME 항목을 10분의 1로 줄인 0.1 초 간격으로 바꾸었다.

표 1 측정된 자료의 일부

TIME	Volt(V)	Curr(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 새로운 순시 전력을 계산하여 Fload 모델에 넘겨주는 형식을 취하였다.

이 부하는 다음 그림 14와 같은 파라미터를 가진다. 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 줌으로써 이 부하는 정전력 부하로 동작하리라 보았다.

3.3.3 정전력 부하 모델

다음의 그림 5는 정전력 부하 모델을 사용한 PSCAD/EMTDC Draft이다.

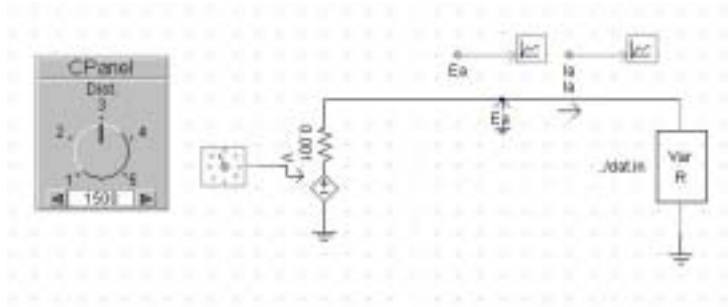


그림 5 정전력 부하 모델

상기 모델은 변형 Fixed load 모델과 마찬가지로 외부 파일 입력을 받아 들여 주어진 데이터를 기준으로 동작하도록 하였다. 동작 알고리즘은 다음과 같다. 주어진 외부 데이터 파일에 있는 첫 전압을 읽어 들인다. 이것을 V_0 라 하자. 부하는 정전력이므로 P_0 라는 전력을 담당하고 있다고 보자. 이로부터 R_1 를 계산할 수 있다. 이 계산된 저항값으로부터 회로 방정식을 풀게 되면 새로운 전압 V_1 을 구하게 되고, 이 값으로부터 다시 P_0 를 내도록 새로운 저항값(R_n)을 구한다. 이 루틴을 계속 밟다가 $P_{new}(=V_{n+1}^2/R_n)$ 과 P_0 의 차이가 정해진 오차범위 안에 들 경우 부하의 저항값을 R_n 으로 선택한다.

PSCAD/EMTDC는 회로 방정식을 매 타임스텝마다 풀어주는 동적모의(dynamic simulation)을 행하여 한 타임스텝에 상기와 같은 루틴을 한번에 밟을 수는 없으므로, 일정 스텝 후에 R_n 으로 수렴하게 될 것이다. 다시 말해 V_0 에 변동이 발생하는 시점에서 어느 정도의 스텝의 값은 계산과정으로 치부하고 무시할 수 있다고 본다. 안정되는 그 때의 값부터는 적절한 값으로 보아야 한다.

작성된 컴포넌트의 branch 전압은 EMTDC의 내장함수인 VBRANCH를 이용하였다.

3.4 모의 결과 및 분석

3.4.1 모의 결과

급전 전압의 외란은 0.9 pu부터 1.1 pu까지의 임의 크기와 임의 시간으로 수동 입력하였다.

가. 고정 저항 모델

$R = 0.50 \Omega$ (정상 운전 시 전동차 저항 가정)일 때, 모의된 결과는 다음 그림 6과 같다.

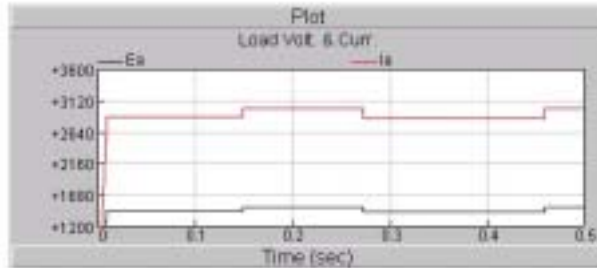


그림 6 고정저항모델의 전압과 전류 파형($R=0.50\Omega$)

나. 변형 Fixed load 모델

데이터 입력 파일에 따라 모의된 이 모델의 결과는 다음과 같다.

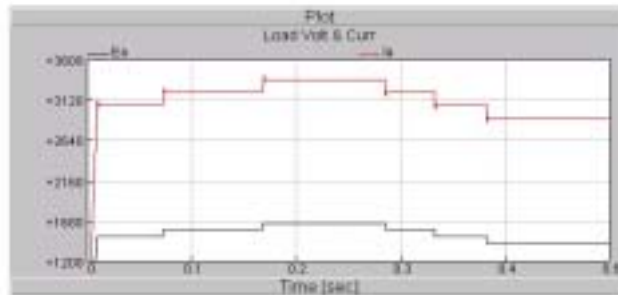


그림 7 Fixed load model의 전압과 전류 파형

3.4.2 분석

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

고정 저항 부하의 경우는 고정값을 사용함으로써 해서 전동차의 동특성을 전혀 고려할 수 없지만, 확장 Fixed load 모델의 경우는 입력 파일에 따라 부하 변동의 여지가 있다. 하지만 주어진 subroutine(tldm34)을 사용하는 관계로 내부 코드를 변경할 수 없는 관계로 정전력 부하로 동작시키기에는 무리가 있는 것으로 보여진다. 모의 결과 역시 전압 변동에 비례하는 전류 변화를 보여주고 있다. 마지막 모델인 정전력 부하 모델은 전압 변동에 전류가 정전력을 반영하는 변동을 보여주고 있음을 알 수 있다. 매 타임 스텝마다 일정한 정전력을 내고 있는 것을 모의 결과는 보여주고 있다. 전기차의 동특성을 정전력 부하 모델이 보다 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 이 모델의 경우 각 타임 스텝마다 적정 저항을 계산하는 루틴을 따른 것이 아니라 시간의 흐름에 따라 적정 저항을 찾아갈 수 밖에 없는 PSCAD/EMTDC의 제약에 따라 외부 데이터 파일의 기준 전압이 변동할 때 이후 어느 정도의 스텝 동안의 출력값은 무시해야 하는 문제가 있다. 모의 결과에서 보여지듯 0.1 간격마다 마치 switching transients 같은 현상이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 하지만 부분적인 문제를 제외한 전체적인 모의 결과는 부하모델이 정전력 부하로서 동작하고 있음을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구는 도시철도 직류 구간 급전시스템의 표준 해석 모델 개발이며 해석모델 구성은 서울지하철공사 제 3호선 직류 구간 급전시스템을 대상으로 하였다. 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 저항로 보던 한계를 넘어 전동차의 동특성을 반영하기 위하여 새로운 부하 모델의 제안하였다. 제안된 부하 모델은 변형 Fixed load 모델과 정전력 부하 모델이다. 전자의 경우는 정전력 부하로서 동작한다고 보기는 어렵다. 이것의 문제점은 입력으로부터 Fixed load 모델로 넘겨주는 정격 전력이 첫 타임 스텝에서 결정되는 것이다. 이것을 수정하려면 PSCAD/EMTDC의 표준 모델인 Fixed load의 표준 subroutine에 변화를 주어야 하는데 이것은 불가능하다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 후자에 해당하는 정전력 부하 모델이 개발되었다.

GUI(Graphical User Interface)를 이용하여 사용자가 쉽게 접근, 사용하도록 만든 PSCAD/EMTDC를 사용하여 구성하였으므로 본 모의에서 보여주지 못한 여러 가지 계통 구성 및 사고 모의가 가능하다.

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 interconnection 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.