

EMTP를 이용한 전압 불안정 현상의 동적 시뮬레이션

허정용, 권오상, 김철환
성균관대학교, 차세대전력기술연구센터

A Dynamic Simulation of Voltage Instability using EMTP

J.Y. Heo, O.S. Kwon, C.H. Kim
Sungkyunkwan University, NPT Center

Abstract - Voltage instability has been studied for some decade now. But, there is not generally accepted definition of voltage instability because of the complex phenomenon and the variety of ways in which it can manifest itself. Both IEEE and CIGRE have the respective definitions. The areas of voltage instability research are the analysis, simulation and countermeasure of voltage instability.

In this paper, we perform a dynamic simulation of voltage instability and voltage collapse using EMTP MODELS. The exponential load model is designed with MODELS and this load model is connected with test power system. The result shows the process of voltage change in time domain when the voltage instability or voltage collapse occurs.

1. 서 론

전압 불안정 현상은 비교적 최근에 연구되어지고 있는 분야로서[1], 전압 불안정 현상은 복잡하고, 다양한 원인에 의해 발생하며 다른 불안정 현상과 구분하기 어려운 경우도 있다. 따라서, 전압 불안정에 대한 정확한 정의가 아직 존재하지 않으며[2], CIGRE와 IEEE에서는 서로 다르게 정의를 내리고 있다[1,3]. 현재 전압 불안정 현상에 관한 연구는 전압 불안정 현상의 분석, 시뮬레이션 및 대책 등의 분야에서 이루어지고 있다. 예를 들면, 전압 안정도 마진의 계산을 위한 다양한 방법과 전압 안정도 향상을 위한 부하차단, 무효전력 보상 등과 같은 전압 안정도 제어에 관한 연구가 수행되고 있다[4].

전압 불안정 현상은 전력계통의 다양한 요소에 의해 영향을 받으므로, 이 현상을 시뮬레이션하기 위해서는 전력계통의 각 구성 요소에 대한 정확한 모델이 필요하다. 전압 불안정을 시뮬레이션 하기 위한 방법으로는 먼저 정상 상태에서의 해석에 의한 정적 시뮬레이션(static simulation)이 있다. 이 방법은 전압 불안정을 분석하고 안정도 지수를 구하는 데는 도움이 되지만, 실제 현상에 대한 정확한 시뮬레이션을 할 수 없고 시간 영역에서의 상태 변화를 알 수가 없는 단점이 있다[2]. 다른 방법으로는 시간 영역에서의 변화를 볼 수 있는 동적 시뮬레이션(dynamic simulation)이 있다. 하지만, 이 방법은 시뮬레이션에 많은 시간이 필요하고 안정도 지수 등의 계통 전체에 대한 상태는 알지 못하는 단점이 있다[2,5]. 또한 이 방법을 사용하기 위해서는 전력계통의 각 요소의 동적인 특성을 모델링해야 한다.

본 논문에서는 시스템 안정도를 고려한 보호 계전기 설계를 위한 목적으로 EMTP MODELS를 사용하여 전압 불안정을 발생시키는 부하를 모델링하고 전압 불안정 현상과 전압 붕괴의 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 부하전압을 MODELS의 입력으로 하고 부하전압, 상태변수와 부하전력의 관계식을 MODELS로 구현하여 동적 특성을 가지는 부하를 구현하였다. EMTP는 전력 계통의 과도 현상을 시뮬레이션하는 데 사용되고 있는 도구

로써, 현재까지 EMTP를 이용한 전압 불안정 현상의 시뮬레이션은 국내 또는 국외에서 발표되지 않았다. EMTP상에서 전압 불안정 현상을 시뮬레이션 함으로써, EMTP를 사용하여 전압 불안정의 과도 현상을 해석하거나, MODELS로 구현된 보호 계전 알고리즘과 연계하여 전압 불안정 상태에서의 보호 계전 분야의 연구 등을 보다 효율적으로 수행할 수 있을 것이다.

2. 전압 불안정 (Voltage Instability)

2.1 부하 모델 (Load Model)

전압 불안정이나 전압 붕괴를 발생시키는 전력 계통의 원인은 다양하다. 부하의 증가, 발전기나 SVC의 무효전력 제한, 변압기의 탭 전환, 부하의 전력 회복 특성, 선로 차단이나 발전기 차단 등이 전압 불안정이나 전압 붕괴를 발생시킬 수 있다[6]. 전압 불안정 현상을 발생시키는 요인은 전력 계통의 여러 구성 요소에 의해 발생할 수 있지만, 기본적인 요인은 각각의 요소의 동적인 특성에 의해 발생한다. 전압 불안정을 발생시키는 요인과 그에 따른 이론은 다양하다. 하지만, 전압 불안정의 현상에서 가장 중요한 원인은 부하의 동적인 응답(dynamic response) 특성이다[7].

부하 모델의 종류는 유도 전동기, 부하 탭 변환기, 작동 온도 장치 부하, 일반 집합 부하(generic aggregate load) 등 다양한 부하 모델이 존재한다. 그 중 일반 집합 부하의 multiplicative generic load model은 다음 식 (1)-(2)와 같다[7,8].

$$P = z_p P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-\alpha} \tag{1}$$

$$P_0 T_p \frac{dz_p}{dt} = P_s - z_p P_i \\ = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-\alpha} - z_p P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-\alpha} \tag{2}$$

여기서, P는 소비전력, P_s는 정상 부하 특성, P_i는 과도 부하 특성, T_p는 시정수, z_p는 상태 변수이다.

2.2 전압 불안정 현상의 시뮬레이션 방법

전압 불안정 현상을 시뮬레이션 하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 한가지 방법은 조류 계산에 기초한 정적 시뮬레이션이고, 다른 한가지 방법은 시간 영역 상에서의 동적 시뮬레이션이다. 이 두 가지 방법들은 각각의 장단점들을 가지고 있다. 이 방법들의 장단점들을 적절히 절충한 방법으로 Quasi-Steady-State(QSS) 시뮬레이션이 있다. QSS 방법은 정적 시뮬레이션의 간편함과 효율성, 그리고 동적 시뮬레이션의 정확성, 시간영역에서의 시뮬레이션이 가능한 장점을 가지고 있다[6].

3. EMTP MODELS를 이용한 전압 불안정의 시뮬레이션

전압에 따른 소비 전력은 부하 특성에 의해 결정되고, 전압과 소비 전력에 의해 가변 부하의 임피던스가 결정된다. 가변 부하를 제어하는 부하 특성 시스템은 전압을 입력으로 하고 부하의 임피던스를 출력으로 하는 일종의 제어 시스템이다.

EMTP MODELS를 이용하여 구현한 부하 모델의 블록도는 다음 그림 1과 같다.

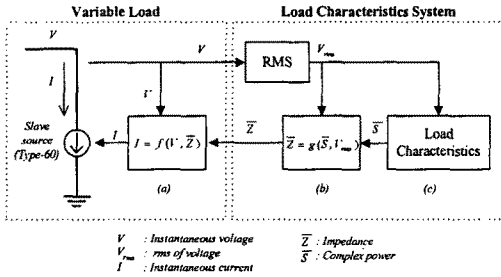


그림 1 EMTP MODELS를 이용한 부하 모델의 상세 블록도

EMTP에서 사용되는 Type-60 slave source는 TACS나 MODELS에서 제어가 가능한 전원이다. 그림 1 (a)에서 임피던스 \bar{Z} 와 부하단의 순시 전압 V 을 입력으로 하여 전류원의 전류값을 조절함으로써 MODELS에서 제어 가능한 가변 부하를 구성한다.

그림 1의 블록도를 EMTP MODELS로 구현한 코드의 예는 다음 그림 2와 같다. EMTP의 Type-60 slave source에서의 전압 신호가 MODELS의 입력 신호로 들어가고, MODELS에서는 전압의 rms값, 소비 전력, 임피던스 등이 계산된 후 최종적으로 전류원에 흐르는 전류값이 결정된다.

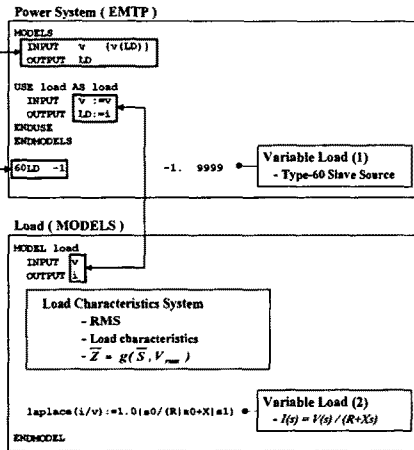


그림 2 부하 모델의 EMTP MODELS 코드

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 시뮬레이션 방법

EMTP MODELS를 이용하여 부하를 모델링하여 그림 3과 같은 모델 계통에 연결하여 시뮬레이션 하였다. 모델 계통 전원의 전압은 154[kV]이고 선로는 250[km]길이의 2회선 선로 2개가 직렬로 연결되어 있다. 양단의 전원 측에 각각 고정된 부하가 연결되어 있고 선로의 중앙에 고정된 부하와 부하 모델이 연결되어 있다. 선로는

ACSR 477MCM 240²이다. 부하 모델에서의 급격한 상태 변화에 의해 시뮬레이션 중 결과가 수렴하지 않고 발산하는 현상을 막기 위해서 부하 모델과 병렬로 커패시터를 추가하였다.

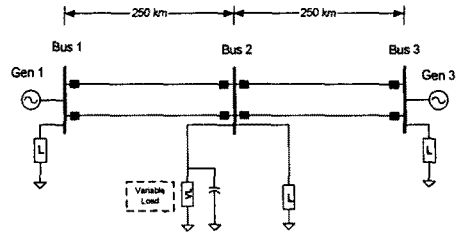


그림 3 모델 계통

4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 3의 모델 계통에서 모선 2와 모선 3의 한 회선이 제거되지 않았을 때와 고장 발생에 의해 한 선로가 제거되었을 때의 모선 2의 부하단에서 보는 PV curve는 각각 다음 그림 4-5와 같다. 한 선로가 제거되기 전의 nose point에서의 최대 소비 전력은 7.4[p.u.]이지만 선로 제거 후에는 5.7[p.u.]로 감소하는 것을 볼 수 있다.

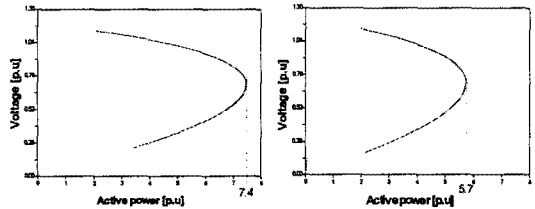


그림 4 선로 제거전의 PV curve 그림 5 선로 제거후의 PV curve

부하 모델의 P_0 를 6.0[p.u.]로 설정하여 부하의 소비 전력을 6.0[p.u.]으로 설정하고 선로를 제거하지 않고 시뮬레이션하였을 때의 부하단 전압과 소비전력은 다음 그림 6과 같고, PV curve는 다음 그림 7과 같다.

이것은 그림 4의 nose point인 7.4[p.u.]보다 6.0[p.u.]가 좌측에 있기 때문에 전압 1.0[p.u.], 전력 6.0[p.u.]에서 안정되는 것을 볼 수 있다.

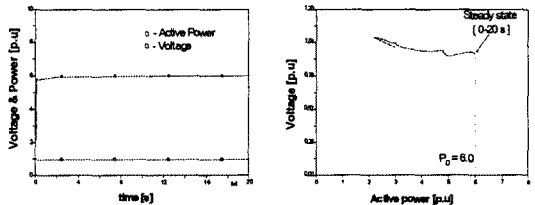


그림 6 선로가 차단되지 않을 때 시간영역에서의 전압과 전력 ($P_0=6.0$) 그림 7 선로가 차단되지 않을 때 PV curve ($P_0=6.0$)

부하 모델의 P_0 를 6.0[p.u.]로 설정하고 시뮬레이션 시작 후 2초일 때 모선 2와 모선 3의 한 선로가 제거되는 외란이 발생했을 때 부하단의 전압과 소비 전력은 다음 그림 8과 같고, PV curve는 다음 그림 9와 같다.

시뮬레이션 시작 후 2초까지는 소비 전력 6.0[p.u.]에서 안정되어 있지만, 2초일 때 선로가 제거됨에 따라 그림 5에서의 같이 PV curve의 nose point에서의 최대 전력이 5.7[p.u.]로 감소함으로써 부하 모델의 소비 전력

6.0[p.u]와 교차점이 생기지 않아 전압과 전력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 선로 제거의 외란에 의해 전력이 감소하고, 이 감소된 전력을 다시 회복시키기 위해 부하는 자신의 임피던스를 감소시킨다. 그러나, nosc point까지는 전력이 증가하지만 그 이상에서는 반대로 감소하는 것을 볼 수 있다. 결국, 선로 제거 13초 후에는 전압이 완전히 붕괴되는 것을 볼 수 있다.

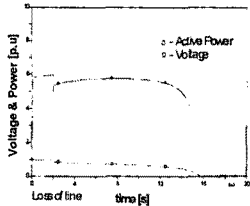


그림 8 선로가 제거되었을 때 시간영역에서의 전압과 전력 ($P_0=6.0$)

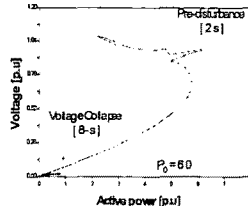


그림 9 선로가 차단되었을 때 PV curve ($P_0=6.0$)

부하 모델의 P_0 를 5.4[p.u]로 설정하고 시뮬레이션 시작 후 2초 일 때 모선 2와 모선 3의 한 선로가 제거되었을 때 부하단의 전압과 소비 전력은 다음 그림 10과 같고, PV curve는 다음 그림 11과 같다.

시뮬레이션 시작 후 2초까지는 그림 4의 PV curve와 교차점에서 전압 1.0[p.u], 전력 5.4[p.u]의 안정된 상태를 유지하고, 2초에서 선로 제거에 의해 그림 5의 PV curve로 변화되었을 때는 전력이 급격히 감소하지만, 부하의 응답에 의해 다시 전력이 회복되어 전압 0.9[p.u], 전력 5.4[p.u]에서 안정된 상태로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

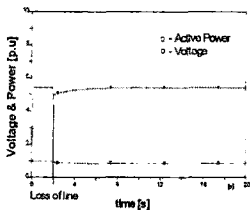


그림 10 선로가 제거되었을 때 시간영역에서의 전압과 전력 ($P_0=5.4$)

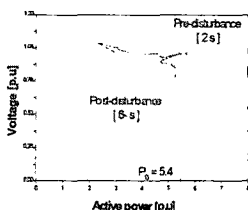


그림 11 선로가 차단되었을 때 PV curve ($P_0=5.4$)

5. 결 론

본 논문에서는 전압 불안정과 전압 붕괴현상을 시뮬레이션하기 위해서 EMTP MODELS를 이용하였다. EMTP MODELS를 이용하여 지수 부하 모델을 구현하였고, 구현된 부하 모델을 전력 계통과 연결하여 전력 계통에서의 선로가 제거되었을 때의 전압의 변화를 보았다. 시뮬레이션 결과 부하 상태에 따라 외란에 의한 전압 붕괴 여부가 결정됨을 알 수 있었다.

시뮬레이션의 매 타임 스텝마다 부하 모델의 지수 연산과 미분 방정식의 연산을 수행하기 때문에 시뮬레이션에 많은 시간이 필요했다. 그리고, 한 번의 시뮬레이션 결과로는 안정도 여유를 정확히 알 수가 없기 때문에 부하 모델의 파라미터와 조건을 바꿔 가며 여러 번의 시뮬레이션을 수행하였다. 이것은 동적 시뮬레이션의 대표적인 단점들이지만 보호 제어 동작과 연계하기 위해서는 동적 시뮬레이션이 필요하며, 보다 효율적인 시뮬레이션을 위해서는 정적 시뮬레이션이나 QSS(Quasi-Steady-State) 방법

과 병행하여야 할 것이다. 아울러, 전압 불안정 현상 및 전압 붕괴를 EMTP로 시뮬레이션한 국내의 최초의 결과이며, 이러한 연구 결과는 EMTP에서 보호 계전기의 동적 응답 연구 수행에 기여 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사할 드립니다

[참 고 문 헌]

- [1] Daniel Karlsson, "Voltage Stability Modelling and System Protection Scheme", PSS, pp. 37 42, 2000.
- [2] G.K. Morison, B. Gao, P. Kundur, "Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1159 1171, Aug. 1993.
- [3] B. Delfino, G.B. Denegri, M. Invernizzi, A. Morini, "Voltage Stability of Power System : Links between Static and Dynamic Approaches", Proc. of MELECON '96, Vol. 2, pp. 854 858, May 1996.
- [4] 남해곤, 송충기, 김봉준, "최단 전압붕괴점 계산을 위한 개선된 직접법과 재급전에 의한 전압안정도 향상", 대한전기학회 논문지, Vol. 48A, No. 8, pp. 958 964, Aug. 1999.
- [5] 송화창, 송태용, 정문구, 이석창, 최건수, 조윤성, 이병준, 권세혁, "부하모델에 따른 한전계통의 정적인 전압 불안정점의 변화에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 319 321, 2000.
- [6] Prabha, Kundur "Voltage Stability Assessment Procedures and Guides", Power system stability Subcommittee Special Publication, Apr. 1999.
- [7] Thierry Van Cutsem, Costas Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, pp. 93 129, 1998.
- [8] Thierry Van Cutsem, "Voltage Instability : Phenomena, Countermeasures, and Analysis Methods", Proc. of the IEEE, Vol. 88, No. 2, pp. 208 227, 2000.