다양한 제어기 동특성에 따른 신수원-신용인 지역의 장기 전압안정도 분석

김지훈*, 정응수**, 한상욱*,이병준*, 김태균***
고려대학교* , 한국전력거래소** , 한전 전력연구원***

Analysis of long-term voltage stability in Sinsuwon-Sinyongin along dynamics of various devices

Ji-Hun Kim*, Eung-Soo Jung**, Sang-Wook Hang*, Byong-Jun Lee*, Tae-kyun Kim***
Korea University*, Korea Power Exchange**, Korea Electric Power Research Institute***

Abstract - 본 논문은 한전 계통에 장기 동특성 전압 안정도 분석을 적용하여 다양한 제어기 특성에 따른 전압 안정도 분석을 하는데 있다. 실제의 계통에는 다양한 제어 동작을 위해서 많은 제어기가 투입되어 있는데, 각각의 장치마다 서로 다른 시간 특성을 갖는다. 특히 수초에서 수분으로 이어지는 특성을 가지는 장치에 대해서는 기존과 다른 방법을 통한 전압 안정도 분석을 할 필요가 있다. 이러한 장치에 의한 전압 붕괴 현상을 보이고, 이를 보상할 다양한 제어기 투입에 따른 다양한 현상을 확인한다.

1. 서 론

최근 세계적으로 발생한 많은 광역정전은 인적, 물적으로 많은 피해를 가져왔다. 이러한 광역정전의 상당수가 전압 불안정에 의해 계통 전체의 전압 붕괴로 이어져 발생한 것이 특징이다. 이는 무효전력에 관계된 설비들의 문제에 기인한 것으로, 특히 과여자-저야자 limiter(OXL, UXL) 및 ULTC(Under Load Tap Changer) 등과 같은 수분에서 수십분(Long-term)의 응동 특성을 갖는 전력설비에 의해 결정된다. 그러나 지금까지 개발되어온 알고리듬은 수초(transient)의 응동 특성을 갖는 전력설비만을 고려한 과도안정도평가를 위해 개발되었다. 또한 수십분(Long-term)에 해당하는 영역까지 시뮬레이션 하기 위해서는 상당히 긴 시간이 필요하며, 수치적인 불안정을 내포하고 있기 때문에, 그 결과 또한 신뢰하기가 어렵다. 최근에, 이러한 한계를 극복하기 위하여 개발된 해석 방법이 QSS 알고리듬이다. QSS 알고리듬은 수초 이내의 아주 짧은 순간의 변화는 안정할 것이라는 가정 아래에서 시뮬레이션을 수행하게 되기 때문에 상당한 시간적 이득을 볼 수 있다.

본 논문은 QSS 알고리듬을 이용하여, 기존의 과도 안정도 분석과는 다르게 한국의 실계통에 장기 동특성을 가지는 다양한 제어기의 투입을 통해 장기 전압 안정도 분석을 하는데 있다. 장기 동특성 모의를 수행하기 위하여 장기 동특성에 가장 심각하게 영향을 미치는 ULTC에 의한 부하회복 모델을 설계하여 모의하였다.

2. 본 론

2.1 Quasi-Steady-State Simulation의 개념

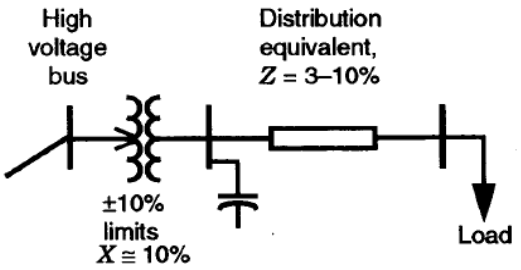
기존의 과도 안정도의 분석은 수초 이내의 짧은 시간동안에 관심을 가진다. 일반적으로 계통에 연결되어 있는 수 많은 발전기 및 제어기의 동특성을 미분방정식으로 표현하여 시적분으로 해를 찾아나가는 형태였다. 계통 내에는 ULTC나 OXL,UXL과 같이 그 제어 동작이 상대적으로 다른 제어기에 비해 긴 응동 특성을 가진 장치가 존재한다. [1] 그러므로 이러한 장치에 의한 계통의 동적 특성을 분석하기 위해서는 기존보다 더 긴 시간까지의 장기 동특성 전압 안정도 분석을 하여야한다. 하지만 계통에 연결되어 있는 발전기 및 제어기의 숫자가 많아질수록, 장기 동특성 모의를 하는데 있어 많은 시간이 거릴 뿐만 아니라 수치적인 에러가 발생할 수 있다. 이에 따라 개발된 방법이 준동적 시모의 방법(Quasi-Steady-State Simulation, QSS)이다. 이는 수초 이내의 아주 짧은 순간의 변화는 안정할 것이라는 가정을 가지고 계통에 연결되어 있는 제어기중에서 빠른 응동특성을 가지는 제어기의 식을 간략화 하는 것이 그 특징이다. 이는 다음과 같이 표현된다.[2]

$$\dot{x} = f(x, y, z_D, z_C) \rightarrow 0 = f(x, y, z_D, z_C) \quad (1)$$

식(1)은 동기기, 여자시스템, 조속기 등과 같이 계통 내에서 빠른 응동특서을 가지는 제어기의 식이다. x는 transient state variables, y는 algebraic variables이다. z_D는 탭 조절기기와 같은 불연속 동작, z_C는 부하 회복 동특성과 같이 연속 동작의 변수이다. 식(1)을 0으로 놓는데, 이 의미는 단기 전압 안정도는 안정할 것이라는 가정이다. 장기간을 해석한다는 것 자체가 일단, 장기간까지는 계통이 불안정을 일으키지 않아야 장기간까지 넘어 올 수 있는 것이므로, 단기간에서는 당연히 안정할 것 이라는 이론이다. [3]

2.2 ULTC에 의한 부하회복 모델링

ULTC는 양 단에 걸리는 전압을 모니터링 하여 dead band에 벗어날 경우, 탭비를 조절하여 일정한 수준으로 유지하는 기능을 한다. 부하의 크기에 따라 기계적으로 탭을 조절하기 때문에 다른 제어기에 비해 느린 동특성을 가진다. 그러므로 ULTC에 의한 부하 회복 특성이 장기 전압 안정도 분석에 있어서 중요한 사항이다. 이번 모의에 사용하는 한국계통의 기존 파워플로워 데이터는 154kV에 변압기를 통해 부하가 연결되어 있는 형태로 되어 있다. 본 논문은 이러한 변압기에 2차측 전압을 일정하게 유지하려는 동작을 수행하는 ULTC를 모델링하여 장기 부하 회복 특성을 부여하였다.



<그림 1> ULTC와 배전부하의 등가화

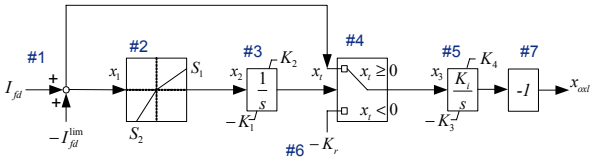
그림 (1)은 IEEE에서 제시한 ULTC를 통한 부하회복 모델이다. 그림(1)에서와 같이 미국의 경우 $\pm 10\%$의 전압 탭 한계를 이용하고 있으면 $5/8\%$ 전압 탭 스텝을 하나의 스텝으로 하여 모두 ± 16 스텝 범위 안에서 움직이며, 120V의 전압의 경우 $2 \sim 4\,V$의 전압이 그 bandwidth로 적용되고 있다. 또한 ULTC의 파라미터로 %리액턴스는 양 10%로 선택되고 초기 ULTC의 동작시간(Tdo)은 30~120초가, 기계적인 동작 지연시간은 5~10초(Tm)의 값이 각각 이용되며, 필요하다면 초기 동작 이후 다른 지연시간(Td1)이 적용될 수 있다. 본 논문에서는 상용툴의 ULTC 모델에서 한전계통의 특성에 맞는 파라미터를 선정하여 모의에 적용하였다. 또한 파라미터 값을 변화시켰을 때 미치는 영향을 모의하였다.[4][5]

2.3 OXL(Over-eXcitation Limiter) 모델

발전기의 여자시스템은 발전기의 단자전압의 기준 이하의 저전압 발생시 여자기를 과여자 시켜 단자전압을 일정하게 유지시키는 작용을 한다. 하지만 일정 시간 동안 정격보다 많은 양으로 과여자를 시키게 될 경우 과열 발생으로 여자 권선이 파괴될 위험이 있다. 이러한 고장을 방지하기 위해서 OXL은 여자기가 순간적으로 정격전류의 약 200%까지 상승하여 여자 전압을 상승시킨 후 일정 시간 내에 반한시 특성으로 정격의 약 120% 수준까지 감소시키는 역할을 한다. 이는 일반적으로 파워플로워 데이터의 발전기 무효전력 최대값에 반영되어 있다. OXL의 동작 특성 또한 다른 제어기에 비해 장기 동특성을 가진다. 그러므로 장기 동특성 전압 안정도 모의를 하기 위해서는 OXL의 동적 모델의 포함이 요구된다.

그림 (2)에서는 기본적인 OXL 모델을 UDM(User Define Model) 타입으로 설계하여 발전기에 투입하였다. 발전기의 I_{fd}를 측정하여 설정된 $I_{fd,\lim}$와 비교를 하여 이를 초과하면 제어 블록을 통해 출력 값 x_{oxl}을 발생시키고, 이는 여자기에 들어가는 AVR의 입력신호로 작용하여 과여

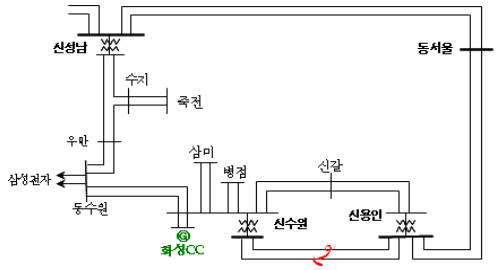
자된 여자기의 여자 전류를 낮춰주는 작용을 한다. 일반적으로 $I_{fd,\lim}$는 여자기 정격 전류의 105% 또는 110%로 적용한다. [6]



〈그림 2〉 OXL 모델

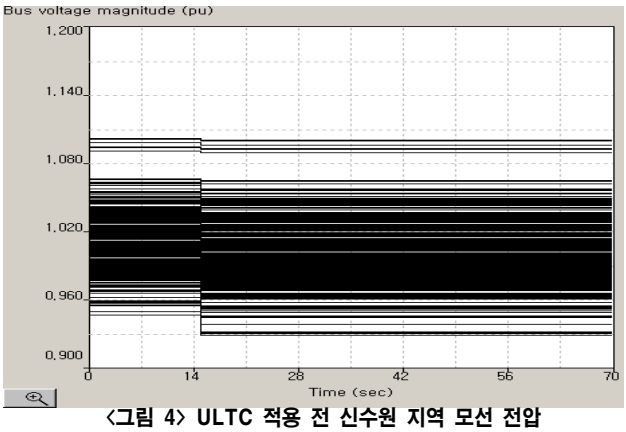
2.4 사례 연구

본 논문에서는 한전계통에서 장기 동특성 전압 안정도 분석을 하기 위하여 2007년 8월 EMS 조류 계산 데이터를 이용하였다. EMS 데이터에는 154kV와 하단 부하에 변압기 형태로 연결되어 있다. 이 변압기를 ULTC에 의한 부하회복 모델을 다이나믹 데이터로 구성하였다.

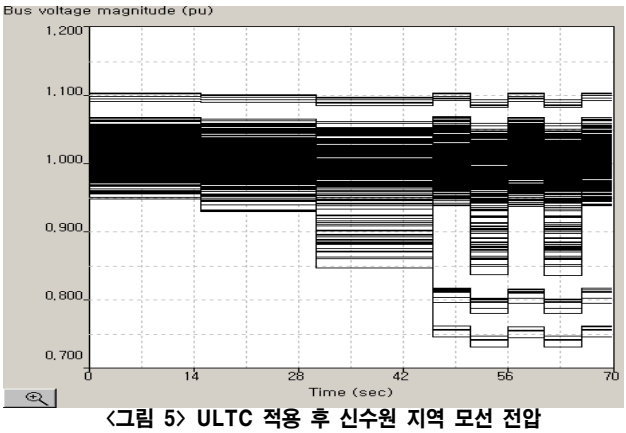


〈그림 3〉 수도권 남동부 지역 154kV 계통도

그림(3)에 나타나 있는 수도권 남동부 지역은 345kV 변전소 사이에 154kV 송전선로를 통해 연계되어 있는 몇 군데 중 한 곳이다. 하지만 154kV 송전망이 약하게 연결되어 있고 중간에 대규모 산업용 부하가 이써 전압 및 무효 전력 관리가 어렵다. 345kV 송전선이 고장으로 정지되거나 345kV 전원 측 변전소와 가까운 송전선로가 고장으로 정지되는 경우 대규모 산업용 부하로 인하여 ULTC에 의한 부하회복과정에서 무효 전력 불균형으로 인하여 심각한 저전압이 발생할 수 있는 지역이라 판단된다. 사고 시나리오는 10초에 bus#4650(신수원)-#4750(신용인)의 345kV 송전선 2회선을 제거시켰다.

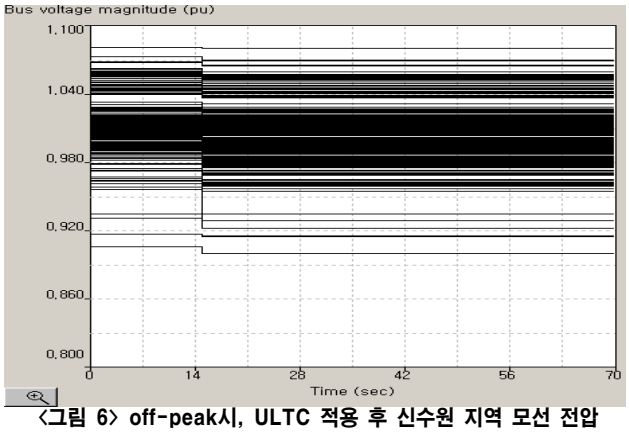


〈그림 4〉 ULTC 적용 전 신수원 지역 모선 전압



〈그림 5〉 ULTC 적용 후 신수원 지역 모선 전압

그림 (4)은 ULTC를 고려하지 않은 모의의 경우 사고가 나더라도 전압이 크게 저하되지 않고 안정되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그림 (5)의 경우 ULTC에 의한 부하회복 특성이 부여된다. 모선 전압을 모니터링하여 전압이 떨어지면 탭을 변환하여 전압을 상승하게 된다. 하지만 발전기와 달리 ULTC 자체가 무효전력을 공급하지 않기 때문에, 무효전력 불균형으로 인하여 전압이 계속 떨어져서 결국은 전압 붕괴에 이르게 된다.



〈그림 6〉 off-peak시, ULTC 적용 후 신수원 지역 모선 전압

그림 (6)는 같은 계통에 대해서 야간 데이터에 대해서 모의하였다. peak 시간대에 비해 그 부하수준이 대략 65%까지 하락한다. 이와 같이 부하수준이 낮을 경우에는 ULTC에 의한 부하회복 모델을 적용하여도 전압붕괴현상이 일어나지 않고 안정함을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 실계통인 한국계통의 데이터를 가지고 장기 전압 안정도 시모의 기법을 이용하여 전압 불안정 현상을 분석하였다. 기존의 과도안정도 해석과는 달리 과도적으로 안정한 계통에 대해서, 추가적으로 장기 동특성을 가지는 제어기의 동특성을 반영하여 불안정한 상황을 확인할 수 있었다. 위의 결과를 보면 정확한 분석을 위하여 장기 동특성을 가진 제어기를 모델링하여 기존보다 더 긴 시간까지 모의를 할 필요성이 있다. 이러한 장기 전압 안정도 시모의 연구의 성과는 현장에서 운전되는 설비나 제어기와 같은 수많은 장치들의 응동 특성을 얼마나 정확하게 구현하고 검증하느냐에 달렸다고 할 수 있을 것이다. 모델링 측면에서는 EMS에 구축되어 있는 배전용 변압기 부하 단위로 ULTC를 사용함으로써 운전되고 있는 실제의 계통과 유사한 조건을 만들었다. 장시간 모의를 하기 위하여 준동적 시모의 알고리듬을 사용하여, 적정한 수준의 정확성과 빠른 시간적 이득을 얻을 수 있었다. 또한 데이터 확보와 모델링 설계의 어려움으로 인하여 테스트 수준에 머물렀던 장기 안정도 모의를 한전계통과 같은 대규모 실계통에 적용하여 장기 동특성에 의한 전압 붕괴현상을 확인했다는 점에서 본 논문의 의의가 있다고 볼 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] P. Kundur, Power System Stability and Control, EPRI Power System Engineering. New Work : Mcgraw-Hill, 1994

[2] T. Van Custem, Y. Jacquemart, J. Marquet, and P. Pruvot, " A comprehensive analysis of mid-term viltage stability", IEEE Trans, Power Syst., vol. 10, no. 2, pp.1173-1182, May 1995

[3] Q. Wang, H. Song and V. Ajjarapu, "Continuation-Based Quasi-Steady-State Analysis", IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 1, Feb. 2006

[4] UVLS 적용 타당성 검토 최종보고서, 전력연구원, 2007

[5] TSAT Manual, Powertech Labs Inc, July 2005

[6] Thierry Van Cutsem, Costas Vournas, Voltage Stability of electric power systems, Power Electonics and Power Systems : Springer, 2008