

동적 전압안정도 해석에서의 ULTC 및 부하모델의 적용

송화창

이병준

군산대학교 전자정보공학부

고려대학교 전기공학과

Application of ULTC and load models in dynamic voltage stability analysis

Hwachang Song

Byongjun Lee

Kunsan National University

Korea University

Abstract - Static approaches usually employed in voltage stability analysis are based on the pre-determined scenarios of varying load and generation patterns. Thus, even though the approaches are applied to the same system condition, one may obtain different voltage instability phenomena using different scenarios. In the stage of concrete control strategy determination against voltage instability, dynamic approaches with full-time and/or quasi steady-state simulations need to be applied in order to confirm the effectiveness of the established control strategies. This paper describes the ULTC and dynamic load models, and discusses characteristics of the models.

1. 서 론

최근 전력계통은 안정도 한계에서 운전되고 있으며, 특히 부하의 집중화, 원거리 전력전송의 증대 등으로 인하여 전압안정도 측면에서 취약점이 발견되고 있다. 2003년 북미의 동부지역에서 발생한 대규모 정전사고 [1]는 계통 주파수가 심각한 변화를 경험하기 전에 계통 전압의 급작스러운 감소에 의한 “전압 붕괴”에 의하여 발생된 것으로 알려지고 있다. 이 전압 붕괴는 계통 요소의 고장률을 감지하지 못한 기계적인 오류 (Machine errors), 각 전력 Pool 간의 원활한 정보 공유를 갖지 못한 점 (Information system errors), 계통 운전자가 적절한 조치를 취하지 못한 점 (Human errors) 등의 복합적인 요인에 의하여 발생되었다. 계통이 주어진 신뢰도 기준 (Reliability Criteria)에 의하여 운전되더라도 이러한 예상 등에 의한 전압붕괴는 발생될 수 있으므로, 심각한 상황 발생 시 계통의 전압안정성을 효과적으로 평가하고 제어전략 (Control strategy)을 결정·적용할 수 있도록 필요한 절차가 수립되어야 한다.

계통의 전압안정성 평가를 위해 일반적으로 적용되고 있는 방안은 P-V 해석이다 [2]. 이는 정적인 해석 방안에 해당하므로 계통 고장에 따른 부하단의 전압의 감소 및 배전단의 전압의 회복 특성에 의한 모델의 적용성이 어렵다. 따라서 현재 주어진 계통 조건에서 부하 및 발전 증가에 대한 방향을 포함하는 시나리오가 먼저 결정되어야 하며, 이 시나리오에 의하여 계통의 전압안정도 측면에서의 심각성을 나타내는 지수 (Index) 중에 하나의 유효전력 여유 (Active power margin)의 정보를 얻을 수 있다. 그러나 계통 고장에 따라서 계통 전압의 감소 및 회복은 다르게 전개되는 것이 자명하므로, 다른 부하 증가방향이 존재할 수 있게 된다. P-V 해석에서 다른 부하 증가 시나리오가 이용될 경우, 계통은 또 다른 전압 붕괴를 경험할 수 있다. 즉 전압붕괴에 참여하는 약한 모선 또는 약한 지역이 바뀔 수 있다는 것이다. 따라서 정적인 해석에 의하여 주어진 상정고장 목록으로부터 심

각한 상정고장 및 안정화 방안에 대한 상세 해석을 위해 동적인 전압안정도 해석이 수행되어야 한다. 즉, 정적인 해석에 의하여 주어진 기준을 만족하도록 심각한 고장에 대한 제어 방안이 수립되었더라도 그 적용을 동적 해석을 통해 검증되어야 한다.

본 논문에서는 전압불안정에 큰 영향을 미치고 있는 ULTC (Under Load Tap Changers) 및 동적인 부하모델 (Dynamic load model)에 대하여 설명하고 어떻게 이를 동적 시간 모의를 위해 실제 계통에 적용할 수 있을지를 대하여 설명하고 이를 WECC 179모션 계통에 대하여 적용한 결과를 보이고자 한다. 또한 이 두 모델에 의한 부하 회복 특성에 대하여 설명하고자 한다.

2. 부하모델의 중요성

과도안정도 해석에 있어서 적용되는 부하모델은 정적 모델으로 유효전력 부하에 관하여 다음과 같이 표현할 수 있다 [3].

$$\frac{P}{P_0} = \left[P_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + P_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + P_3 \right] (1 + L_{DP} \Delta f) \quad (1)$$

여기에서 P_1 , P_2 , P_3 은 해당 유효 부하에 대한 정임피던스, 정전류, 정전력 성분의 비율을 나타내며, P_0 는 초기 평형점에서의 부하로서 해당 모선의 전압이 V_0 일 때의 부하를 의미한다. L_{DP} 는 계통 주파수에 대한 부하의 의존성을 나타내며, Δf 는 주파수 변화에 해당한다.

(1)의 부하모델은 부하의 단기 특성 (Short-term characteristic)을 표현하고 있다. 계통이 사고를 경험하고 난 후 과도안정도 측면에서 안정할 경우 빠른 다이나믹스 (Fast dynamics)에 해당하는 상태변수가 안정적인 평형점에 도달할 것이며, 이 때 이 부하모델에 따라 수렴되는 운전점이 다르게 결정된다. 이 부하모델의 전압에 대한 의존성이 클수록 유효전력의 수급의 불균형이 심화되므로 전압의 과도 변화가 어느 일정한 범위 내에서 조정되도록 계통 운전자를 이를 충분히 고려해야 한다.

[4]에서 전력계통 안정도 현상에 대하여 몇 가지의 범주로 분류하였으며, 전압안정도는 단기 전압안정도 (Short-term voltage stability), 장기 전압안정도 (Long-term voltage stability)로 분류되었다. 단기 전압 안정도의 경우, 과도 안정도와 구분하기 어려우며 이는 계통 불안정이 전압과 관련된 빠른 다이나믹스에 의하여 전압의 급작스러운 변화 또는 무효전력 불균형의 원인으로 계통이 위상각 안정도 측면에서 불안정이 발생될 경우로 정의될 수 있다. 그러나 단기 전압불안정의 경우 고속의 계통 상태 모니터링 및 제어 방안 적용의 한계가 존재한다. 계통에서 발생된 전압붕괴의 예에서 볼 수 있듯이 단기 전압불안정 보다는 장기 전압불안정 현상이 좀 더 일반적인 것으로 여겨진다.

장기 전압불안정 현상에 대한 계통 해석을 수행하기

위해서는 계통의 부하 회복 특성 (Load recovery characteristic)이 고려되어야 한다. 그럼 1에서와 같이 계통이 정상상태 시 'a'에서 운전되고 있다고 하자. 상정사고 #1의 경우, 사고 후 과도안정도 측면에서 안정할 경우 단기 부하 특성을 따라 'b'라는 빠른 다이나믹스의 평형점으로 수렴된다. 이 때 계통에서 부하단의 배전측 변압기의 자동 전압조정 (Automatic voltage regulation) 함수의 동작으로 배전단의 전압이 본래의 전압으로 회복되고 이에 따라 부하도 정상상태 **수준으로** 복귀하려는 특성을 같게 된다. 그럼 1에서와 같이 장기 부하특성 (Long-term load characteristic)이 정전력이라고 가정하면 계통 운전점은 'b'에서 이동하여 전체 시스템의 평형점 'c'에서 멈추게 된다. 상정사고 #1의 경우, 빠른 다이나믹스의 평형점 'e'에서부터 부하가 점점 회복되려고 하나 장기 부하특성과 만나는 점이 존재하지 않기 때문에 'f'까지 이르게 되며 그 이상의 부하증가에 대한 네트워크 P-V 곡선과 부하 P-V 곡선과 만나는 점이 존재하지 않게 된다. 'f' 점은 계통은 SIB (Singularity induced bifurcation point)로 알려져 있으며, 이 점에서는 송전선을 π 등가회로로 구성하여 네트워크 조건으로 이용하는 모델이 더 이상 유효하지 않게 된다.

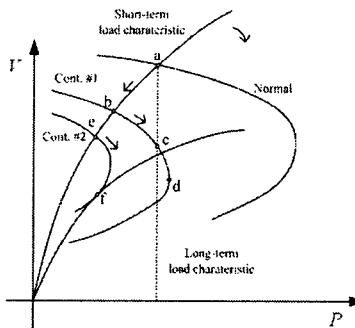


그림 1. 부하회복 특성을 설명하는 P-V 곡선의 예

위에서 설명한 바와 같이, 장기 전압안정도에 대한 시모의 해석에서 부하 회복 특성을 나타내는 모델이 포함되지 않을 경우 전압불안정에 대한 해석이 불가능하다. 따라서 부하회복을 나타내는 모델이 수립되어 시모의 환경에 추가되어야 한다.

3. ULTC 및 동적부하 모델

3.1 ULTC에 의한 부하회복 모델

배전계통까지 고려하는 Hierarchy Level III 문제는 계통 전압안정도 해석에서는 이용되지 않으며 HV (High voltage) 모선에서 측정된 부하가 연결된 모델을 일반적으로 이용된다. 그러나 장기 전압안정도 시모의를 위해서는 추가적으로 ULTC로 연결된 부하를 배전측으로 이동시킨 모델을 적용된다. 그럼 2에서 이를 설명하고 있다. ULTC는 2차 측 전압을 유지하도록 하는 텁 조정이 이루어지며 이 전압제어에 의하여 계통 부하는 원래 값으로 회복되는 특성을 갖게 된다.

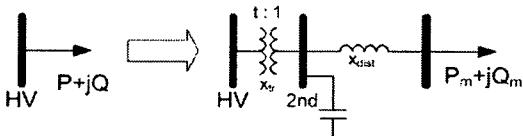


그림 2. 부하 회복 특성을 위한 ULTC의 추가

그리고 Line-drop compensation을 고려하기 위하여 X_{dist} (0.02~0.03 pu)를 포함시키기 위해 배전 변압기의 2차 측과 동일한 전압수준의 한 개의 모선을 추가한다. X_{tr} 은 약 0.1 [pu] 가 이용된다 [1]. 텁 다이나믹스는 차분

방정식의 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$t_{k+1} = \begin{cases} t_k + \Delta t & V_{2nd} > V_{2nd}^{ref} - DB/2 \\ t_k - \Delta t & V_{2nd} < V_{2nd}^{ref} + DB/2 \end{cases} \quad (2)$$

여기에서 아래첨자 k, k+1은 시모의 상에서 현재 스텝, 다음 스텝을 나타낸다. Δt 은 텁의 조정 스텝을 나타낸다. DB는 2차 측 전압의 유지하고자 하는 전압범위에 해당하며, V_{2nd}^{ref} 는 2차측 기준 전압을 의미한다.

시모의 상에서 2차 측 전압이 DB 범위 내에 있지 않을 경우 시간 지연 (T_d , Time delay) 및 기계 시간지연 (T_m , Mechanical delay) 후 텁이 다음 텁으로 이동하게 된다. 일반적으로 T_d 값은 5초에 해당하나, 초기 시간 지연 (T_{d0})은 25초~30초 정도에 이른다. T_m 은 5초~10초 정도이다.

그림 2의 ULTC에 의한 부하 회복 모델을 이용할 경우 상당히 빠른 부하회복 특성을 나타내게 된다.

3.2 동적 부하 모델

동적 부하모델은 계통의 HV 단에서 부하 다이나믹스를 종체적으로 표현하기 위하여 제안되었다 [5]. 이 모델은 부하가 해당 모선의 전압 및 그 모선 전압의 시간적 인 변화에 의하여 결정된다는 직관으로부터 출발하여 부하회복이라는 상태변수 하나를 포함하는 모델로 전개하였다. 이 모델의 유효전력 부하 부분은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_r + T_p P_r &= P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_s} - P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_T} \\ P_d &= P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_T} + P_r \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 P_r 은 회복 부하를 나타내며, T_p 는 회복 부하에 대한 사정수에 해당한다. α_s 와 α_T 는 각각 해당 부하의 장기 및 단기 전압의 존성을 나타내는 지수이다. 그리고 (3)의 두 번째 식에서 P_d 는 각 시모의 순간에서 부하를 나타낸다. (3)의 의미를 살펴보면 계통 동요에 따라 해당 모선 전압이 감소되었다고 할 때 장기 부하 응답과 단기 부하 응답의 차이가 존재하게 되며 이 차이에 의하여 P_r 가 증가되며 P_d 는 단기 부하응답에 P_r 을 더하여 결정된다.

동적 부하모델에 의한 부하 회복은 ULTC에 의한 부하 회복보다 약간 더 느리게 나타나며, 시정수에 의한 1차 상태식으로 표현되므로 평형점에 가까이 갈수록 부하회복 속도가 감소하게 된다. 동적 부하모델의 파라미터들은 해당 HV 모선에서의 전압-부하 특성의 측정 데이터로써 결정될 수 있으며, 같은 모선이더라도 계통 상태, 계절 등에 따라 다른 파라미터를 갖을 수 있다.

4. 사례 연구

본 절에서는 ULTC 및 동적부하모델을 포함하는 계통에 대한 준정적 시모의 (Quasi Steady-State simulation)를 수행하여 그 결과를 보이고자 한다. 연구 계통으로 WECC 179-모선 계통이 적용되었다. 본 연구에서 포함된 계통 모델들은 다음과 같다.

- 각 발전기는 2축 모델이 이용되었으며, 각 발전기는 IEEE DC-type 1의 Exciter 및 간단한 Governor 모델을 포함하고 있다.
- ULTC 부하 회복 모델의 적용을 위하여 각 모선에 배전단의 2차측 모선이 추가되었으며 이 2차측 모선으로 동일한 전압수준의 한 개의 모선을 배치되었다. 이 때 부하 모델은 정 임피던스 부하모델이 적용되었다.
- 각 ULTC의 텁의 조정 범위는 0.8~1.1이며 텁의 조정 스텝은 0.00625이다. 그리고 ULTC의 T_{d0} 와 T_m 은 15초로 가정하였으며 T_m 은 5초로 선택하였다.
- 동적 부하모델의 적용 연구에서는 2차측 모선에 배치된 부하의 모델을 (3)으로 표현되는 모델로 대체하

였다. 이 때 모델 파라미터는 일률적으로 다음 표와 같이 적용되었다.

표 1. 동적부하모델 적용 파라미터

유효전력	α_S	α_T	T_P
	0.0	2.0	200 s
무효전력	β_S	β_T	T_Q
	0.0	2.0	160 s

- 동적 부하모델 적용 시 ULTC의 텁은 초기값으로 고정시켰다.

- 정상상태에서 초기 계통부하는 57,746 [MW]이다.

4.1 ULTC 부하회복 모델 적용 예

본 시모의에서 적용된 고장은 WECC 계통의 116번선의 발전기를 계통으로부터 분리하는 것으로 1초에 적용되었다. 이 고장에 의하여 계통 전압수준 감소되어 전체 부하가 57,283 [MW]으로 줄어든다. 이 상황에서 부하모선 중 DB 범위 밖으로 전압이 벗어난 모선들과 연결된 ULTC의 전압조정을 위한 텁 제어가 시작된다. 위에서 설명한 ULTC의 텁은 20초정도 DB 범위 밖에 해당모선 전압이 지속적으로 존재하면 응동하기 시작한다. 그림 3에서 상대적으로 큰 전압변화를 경험한 모선 1101, 1113, 1117의 전압의 변화를 보여주고 있다. 사고 적용 시점으로부터 200초 경과 후 계통 부하는 정상상태 수준을 회복하며 해당 모선의 전압도 정상상태 전압을 회복하게 된다.

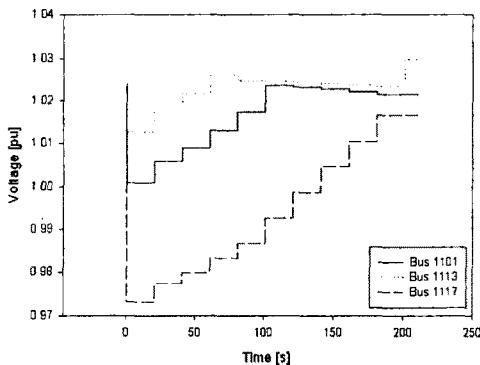


그림 3. ULTC의 텁 조정에 의한 계통전압응답

4.2 동적 부하모델 적용 예

앞에서 설명한 바와 같이 본 연구에서 동적 부하모델에 대한 적용을 2차축의 부하모델을 표 1의 파라미터를 갖는 (3)식의 동적부하 모델을 포함시켜 준동적 시모의를 수행하였다. 이 때 텁은 초기값에 고정되어 전압변화에 응동하지 않는다. 4.1 절에서와 같은 상정고장이 5초에 적용되었으며 모의는 1000초까지 이루어졌다.

그림 4에서 1101, 1103, 1117번선의 t-V 곡선을 보이고 있다. 상정사고 적용 직후 모선 전압의 감소가 그림 3의 경우 비슷하나, 부하회복을 나타내는 상태변수 P_{t-1117} 의 증가로 계통전압은 약간 감소의 추세를 보이고 있다. 그러나 그 감소의 폭은 시모의 시간이 증가될수록 점점 감소되는 경향을 나타낸다. 그림 5에서는 가장 큰 전압변화를 보이는 1117번선의 부하회복 곡선을 나타내고 있다. 1117번선의 부하는 사고 전 840 [MW]이며, 사고 직후 775 [MW]로 감소하였다가 1000초에서 838 [MW]로 거의 사고 전의 부하로 회복된다.

동적 부하모델 적용의 예와 4.1절에서 설명한 ULTC에 의한 부하회복 모델의 경우와 비교하면, ULTC를 적용한 경우 계통 부하회복의 속도가 비교적 동적 부하모델을 적용한 경우보다 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다. 물론 동적 부하모델 적용의 예의 경우 시정수에 의존적으로 부하회복이 빠르게 이루어 질 수 있다. 그리고

동적 부하모델의 경우 시정수의 약 5배 정도의 시간이 지난 뒤 사고 전의 부하수준으로 회복된다.

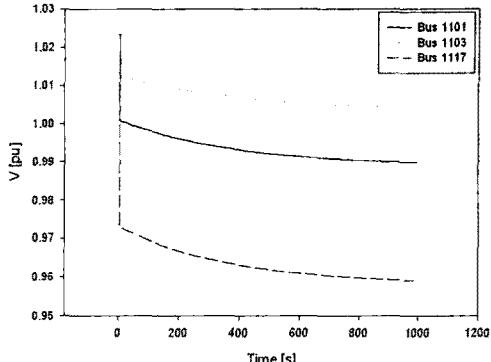


그림 4. 동적부하 모델 적용 시 t-V 곡선

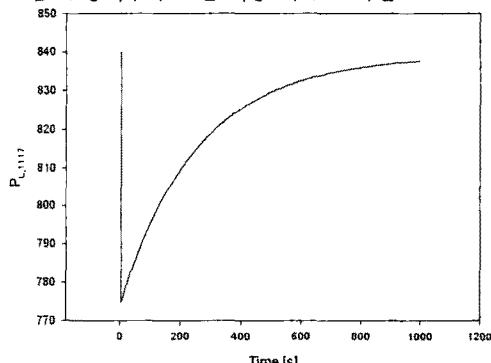


그림 5. 동적부하 모델 적용 시 1117번선의 부하회복

5. 결 론

본 논문에서는 장기 전압안정도 시모의 해석에서 필수적인 계통의 부하회복 특성을 표현할 수 있는 두 모델에 대하여 설명하고 WECC 179-모선 계통에 적용하여 그 전압 및 부하 회복의 특성에 대하여 설명하였다. 장기 전압안정도 해석을 위한 동적 시모의를 위해서는 일반적인 파도안정도 시모의 해석에 이용되는 정적인 부하모델만을 적용하였을 때 전압안정도 측면에서 가장 큰 계통 스트레스 요인에 해당하는 부하 증가를 모의할 수 없으므로 부하회복 특성을 나타내는 적절한 모델을 선택하여 적용하여야 한다. 전압안정도에 대한 동적 시모의 해석은 계통의 전압불안정 메카니즘 및 수립된 제어 전략의 시간응답 측면에서의 검증을 위해 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S-Canada Power System Outage Task Force, Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations, April 2004.
- [2] "Voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology," WSCC Final Report, May 1998.
- [3] IEEE Task Force Load Representation for Dynamic Performance, "Standard load models for power flow and dynamic performance simulation," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 3, Aug. 1995, pp. 1301-1313.
- [4] P. Kundur, et. al, "Definition and classification of power system stability," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 19, no. 2, May 2004, pp. 1387-1401.
- [5] D. Karlsson, D. J. Hill, "Modeling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, no. 1, Feb. 1994, pp. 157-166.