

EMTP를 이용한 상정사고시의 전압안정도에 관한 연구

송영주*, 심건보, 김정훈, 이봉용

홍익대학교 전기공학과

A Study on the Analysis of Voltage Stability on Contingency with EMTP

Young-Joo Song*, Keon-Bo Shim, Jung-Hoon Kim, Bong-Yong Lee

Dept. of Electrical Engineering, Hong-Ik University.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the voltage stability when the contingency is occurred in the power system. The evaluation of voltage stability is examined by the system identification based on T/L losses and percent indicator which represents how relatively far-off from the voltage collapse. When contingency happens, the bus voltages can be calculated using the EMTP and then, the time-interval in contingency is linearized between the known operating points in nose curves. For the sample study, the 5-bus and 7-bus systems are selected and, countermeasures for the contingency are established in view of the voltage stability.

1. 서론

최근 각계각층의 사회적, 경제적 욕구의 증대로 인하여 전력 수요는 해마다 성장을 거듭하고 있으며 부하분포상태 또한 도시 및 특정 공업지역에 편중해 가는 경향이 날로 심화되어 신규 전력설비에 따른 용지난, 환경문제, 민원 등의 제약이 갈수록 심해져 가고 이에 따른 전원의 원격, 편재화 및 송전선로의 대용량 추세는 갈수록 현저해지므로 전력회사로서는 기존설비를 최대 한계용량까지 사용하는 방안을 검토하지 않을 수 없는 상황에 봉착했고 이에 따라 계통운용상에 있어서 안정도나 전압수준의 안정권 유지를 위한 보다 고도의 기술이 요청되고 있다.

전압안정도는 연구 방법에 따라 크게 조류계산에 근거한 정적인 연구와 부하의 동특성을 고려한 동적인 연구로 분류되는데 동적인 연구는 전압안정도의 동적현상을 설명^{[1][2]}하였지만 대규모 실계통 적용이 미흡하고 여러 부하의 동특성을 정확히 모델링 하는 것이 현실적으로 어려움으로 전압안정도의 많은 연구가 정적인 연구에 기초를 두고 있다. 이런 정적인 연구는 전압붕괴에 대한 물리적 현상을 규명하였고 설계통 적용 해석분야에 많은 진전을 가져왔다.^{[3][4]} 그리고 전압안정도를 계통의 상태로 분류한다면 정상상태와 상정사고로 분류할 수 있는데 위에서 언급한 전압안정도의 정적인 방법과 동적인 방법의 연구경향은 정상상태 일때를 대상으로 한 연구로서 지금까지의 여러 논문들은 정상상태 일때의 전압안정성 해석을 많이 하였다. 그러나 우리가 이미 알고 있듯이 정상상태 일때보다 사고가 발생하였을 때 즉, 상정사고시가 더 위험하므로 상정사고시를 고려한 전압안정성 해석이 더 타당하다고 말할 수 있다.

그러므로 본 논문에서는 EMTP(Electromagnetic Transient Program)를 이용하여 5모선 계통과 7모선 계통을 대상으로 사고가 발생하였을 때 즉, 상정사고시 시간이 경과함에 따라 각 시간대에 대한 각 모선의 전압(V)을 구하여 선형적으로 처리한 다음 이미 발표된 바 있는 송전손실 상태식별법과 %지수를 적용하여 각 시간대의 전압안정성 해석과 전압안정성의 정량적 평가를 한 후 상정사고에 대한 대책의 일례로서 전압안정성을 향상시키기 위해 적절한 단위 무효전력 보상량을 루틴함으로서 상정사고에 대비한 전압안정성의 대책을 수립하였다.

2. EMTP 모델 설정과 송전손실 상태식별법 적용

2.1 EMTP 모델

EMTP(Electromagnetic Transient Program)는 전력 계통과 대형 해석 프로그램으로서 먼저 전력계통에 존재하는 계통요소를 수학적으로 모델링하고 수학적 모델링으로부터 원하는 파도전압, 전류의 발생 및 전파상태, 그리고 분포상태를 계산하는 수치해석 기법으로 EMTP의 입력 데이터 구조는 환경설정 카드군, Branch 카드군, 스위치 카드군, 전원 카드군, 초기조건 설정 카드군, 출력지정 카드군, 그래프 출력지정 카드군으로 구성된다.

본 논문에서는 전력 계통해석의 기초로서 전력 조류계산을 수행 중 단선사고가 발생하였을 때 시간이 경과함에 따라 전압 안정성을 해석하는 시뮬레이션을 실행하기 위해 환경설정 카드로서 "FIX SOURCE"라는 특수주문 카드를 지정한 다음 계통주파수를 60Hz로 명시하기 위해 Miscellaneous Data의 리액턴스를 L대신 X를 사용하였으며 각 모선에 연결된 선로자료 R, X값을 BRANCH 카드군에 나타내었다. 그런 다음 본래 전력조류계산에서는 사용되지 않는 스위치 카드군에 단선사고를 발생시키기 위해 단선을 일으킬 선로와 시간을 입력하고 기준 모선과 발전기 모선의 전압을 전원 카드군에 나타냈으며 유효전력, 무효전력, 전압등의 제약조건과 함께 그리고 반복 계산 회수와 제한과 가속정수등을 초기조건 설정 카드군에 나타내고 출력값으로 모든 모선의 전압값을 출력지정 카드군에 나타나도록 하였으며 그래프 출력지정 카드군은 생략하였다.

2.2 송전손실 상태식별법과 %지표 적용

계통의 송전손실은 부하증가와 함께 증가하고, 전압붕괴 이후에도 부하와는 달리 송전손실은 계속 증가하게 된다. 이때 각각의 송전손실에 상응하는 시스템의 상태를 알 수만 있다면 부하의 증가에 의한 조류계산으로는 할 수 없었던 정확한 전압붕괴점의 식별과 붕괴 이후의 계통상태의 식별이 가능하다는 점에서 확인한 것이 송전손실을 이용한 상태식별법이다. 결국 송전손실 상태식별법이란 송전손실이 정해지면 그 송전손실에 대응하는 각 모선의 전압과 위상각을 구하는 최적화 문제다.^[5]

%지표는 변화경향이 지수함수꼴로 나타나므로 x축에 log축을 취함으로써 거의 직선에 가까운 모양으로 추출해 넣을 수 있는 데 송전손실이 0.1일때를 100% 안정한 운전점으로 가정하고 현재의 운전점과 송전손실이 0.1일때의 운전점을 직선으로 그었을 때 x축과 만나는 점을 현재 운전점의 %지표라고 한다. 만약 x축과 만나는 점이 0이 되어 지표가 0%가 된다면 이때의 운전점이 전압붕괴가 발생하는 운전점이라 예측할 수 있다.^[6]

본 논문에서는 정상상태 운전중 임의의 어떤 시간에서 사고(단선)가 발생하면 사고순간 심하게 진동하다가 어느 정도 시간

이 지나면 전동하지 않고 일정한 상태를 유지하는 부분을 찾을 수 있다. 이런 전동하지 않고 일정한 상태를 유지하는 부분을 고장후의 정상상태로, 사고가 발생하기 전의 상태를 고장전의 정상상태로 그리고 고장전, 후의 정상상태 사이부분을 과도상태로 정의한다. 이때 과도상태의 전압(V), 위상각(θ)은 EMTP를 써서 구해야 하나 발전기 모델 생략으로 인해 시간에 따라 변하는 위상각(θ)을 구할 수 없게되어 EMTP 자체만으로는 과도상태 부분에 대한 전압안정성을 해석할 수 없으므로 과도상태 부분을 선형적으로 처리한 다음 선형적으로 처리한 과도상태 부분에 대해 기준에 발표된 송전순실 상태식별법을 사용하여 각시간에 대한 각모선의 P-V곡선을 그려 전압안정성을 해석하고 전압안정성 지표중 현재의 운전점이 얼마나 안정한지를 적관적으로 판단할 수 있는 %지수를 사용하여 전압안정성의 정량적 평가를 하였다.

3. 상정사고시의 전압안정성 해석

상정사고로는 전력계통고장의 대부분인 1선지락 고장과 고장중 가장 가혹한 3상단락 고장, 단선사고등 여러가지 사고가 있지만 EMTP의 전력조류 계산도중 사고를 일으키기 위한 스위치 카드군으로서 사용할 수 있는 것이 단선사고 밖에 없으므로 상정사고시의 전압안정성 해석을 위해 정상상태로 운전중인 계통에 전력조류가 가장 많은 선로를 끊는 단선사고를 일으켰다. 그리고 앞에서 언급한 송전순실 상태식별법과 %지수를 사용하여 전압안정성의 해석과 정량적 평가를 하였다. 그런다음 이런 상정사고에 대한 대책의 일례로서 전압 안정성을 향상시키기 위해 단위 무효전력 보상량을 투입하였다.

단위 무효전력 보상량을 투입하는 방법은 송전순실 상태식별법과 %지수를 사용하여 각 시간대에, 가장 먼저 최대전력 한계에 도달하는 모선, 즉 전압 안정도가 가장 취약한 모선을 식별한 다음 두번째로 취약한 모선의 전압붕괴가 일어날때까지 가장 취약한 모선에 단위 무효전력 보상량을 투입하여 가장 취약한 모선과 두번째로 취약한 모선이 동시에 붕괴되도록 가장 취약한 모선의 전압붕괴를 연장시키는 방법이다. 이런 무효 전력 보상으로는 series capacitor banks, shunt reactors & capacitor banks, 그리고 static var compensators 등을 들 수 있다.

3.1 P-V곡선과 %지표

Sample 입력자료로는 3개의 발전기(슬랙모션 포함)와 2개의 부하모선으로 이루어진 IEEE 5모선 계통과 3개의 발전기와 4개의 부하모선으로 이루어진 IEEE 7모선 계통을 사용하였다.

5모선 계통에서, 정상상태 운전중 0.1초에서 선로조류가 가장큰 1~4번 선로를 단선 시키는 EMTP 시뮬레이션 결과 1.0초에서 고장후의 정상상태가 나타났다. 이 상정사고 구간을 선형적으로 처리한 후 10구간으로 나누어서 각시간에 대해 송전순실 상태식별법을 적용하여 구한 각 시간대의 P-V곡선 결과중 몇개를 나타내면 그림 3.3과 같다.

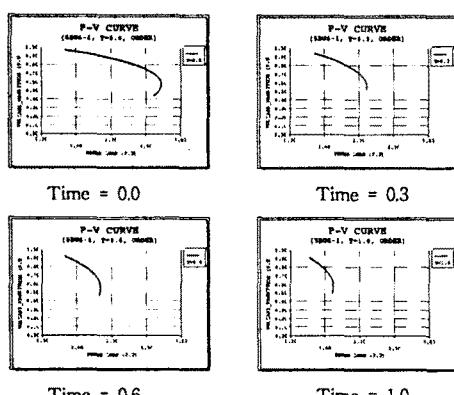


그림 3.3 각 시간에 대한 5모선 계통 1번 모선의 P-V 곡선

그림 3.3에서 볼 수 있는 것처럼 상정사고시 시간이 경과함에 따라(Time=0.0 ~ 1.0초) 전압 붕괴점이 점점 빨리 발생되어 고장후의 정상상태 즉, Time=1.0일 때 전압 붕괴점이 가장 빨리 나타나므로 Time=1.0일 때 계통이 가장 불안정하다고 할 수 있다. 그리고 선형적으로 처리한 10구간에 대해 %지표를 적용한 결과는 그림 3.4와 같다.

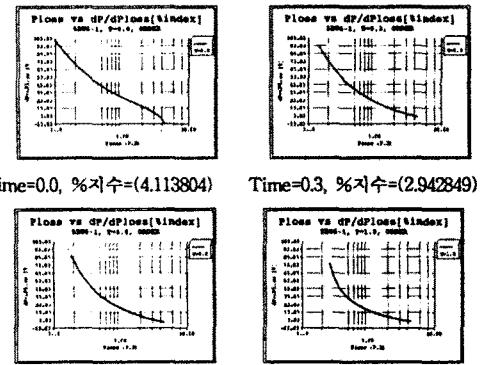


그림 3.4 각 시간에 대한 5모선 계통 1번 모선의 %지표(log축)

제시한 전압안정성 %지수는 x축을 log축으로 설정함으로 송전순실이 0.1일 때 100% 안정한 운전점이 되는데 (즉, 그림에서 원쪽에 있을 수록 안정) 사고가 발생한 후 시간이 경과함에 따라 %지수 그래프가 원쪽에서 점점 멀어져 그림 3.3의 P-V곡선과 거의 일치하는 결과 즉, 시간이 경과함에 따라 계통이 점점 더 불안해지는 결과를 얻을 수 있었다. 그림 3.4에서 시간 옆의 숫자는 각시간에 대한 5모선 계통 1번 모선의 %지수를 나타낸 것이다.

7모선 계통에서, 정상상태 운전중 0.1초에서 선로조류가 가장 큰 6~7번 선로를 단선 시키는 EMTP 시뮬레이션 결과 1.0초에서 고장후의 정상상태가 나타났다. 이 상정사고 구간을 선형적으로 처리한 후 10구간으로 나누어서 각시간에 대해 송전순실 상태식별법을 적용하여 구한 각 시간대의 P-V곡선 결과중 몇개를 나타내면 그림 3.5와 같다.

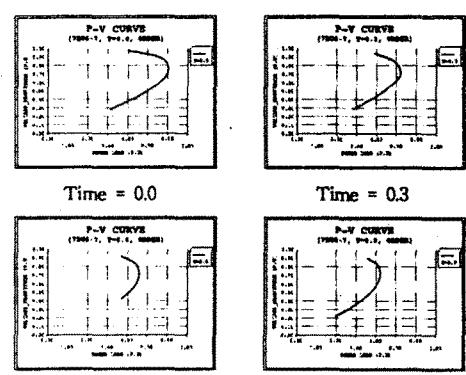
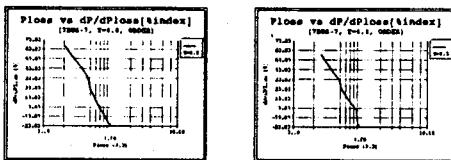
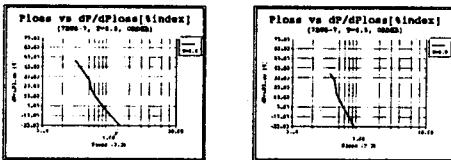


그림 3.5 각 시간에 대한 7모선 계통 7번 모선의 P-V 곡선

그림 3.5에서 볼 수 있는 것처럼 상정사고시 시간이 경과함에 따라(Time=0.0 ~ 1.0초) 전압 붕괴점이 점점 빨리 나타나는 것은 5모선 계통과 같으나 과도상태중 Time=0.9일 때 전압 붕괴점이 가장 빨리 나타나므로 Time=0.9일 때 계통이 가장 불안정한 것이 앞의 5모선 계통과는 조금 다른점이라 할 수 있다. 그리고 선형적으로 처리한 10구간에 대해 %지표를 적용한 결과는 그림 3.6과 같다.



Time=0.0, %지수=(13.23605) Time=0.3, %지수=(10.23928)



Time=0.6, %지수=(9.018659) Time=0.9, %지수=(8.475306)

그림 3.6 각 시간에 대한 7모선 계통 7번 모선의 %지표(log축)

제시한 전압안정성 %지수는 그림 3.6의 P-V곡선과 거의 일치하는 결과 즉, 시간이 경과함에 따라 계통이 점점 더 불안해지는 결과를 얻을 수 있었다. 그림 3.6에서 시간 옆의 숫자는 각 시간 대에 대한 7모선 계통 7번 모선의 %지수를 나타낸 것이다.

3.2 단위 무효전력 보상량

위의 송전손실 상태식별법과 %지수를 적용한 결과 정상상태 일때 보다는 상정사고시가 더 위험한 것을 확인할 수 있었다. 이런 상정사고에 대한 일례로서 전압안정성을 향상시키기 위해 선형적으로 처리한 10구간에 대해 단위 무효전력 보상량을 투입한 결과는 그림 3.7과 표 3.1과 같다.

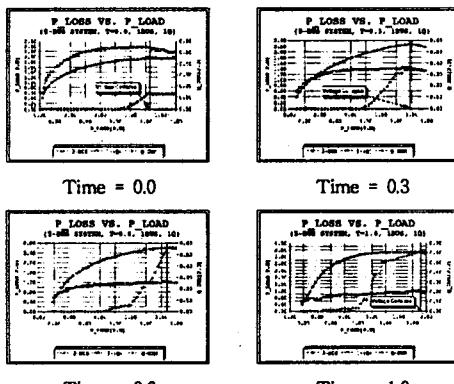


그림 3.7 각 시간에 대한 5모선 계통 1번 모선에 투입된 단위 무효전력 보상량

경과된 시간	무효전력 보상량
0.0	0.1250
0.1	0.1750
0.2	0.3300
0.3	0.3350
0.4	0.3400
0.5	0.5350
0.6	0.5600
0.7	0.5650
0.8	0.5700
0.9	0.5900
1.0	0.6050

표 3.1 각 시간에 대한 5모선 계통 1번 모선의 단위 무효전력 보상량

그림 3.7에서 보면 알 수 있듯이 사고가 발생한 후 시간이 경과함에 따라 단위 무효전력 보상량이 많이 투입되므로 그림 3.3의 P-V곡선과 그림 3.4의 %지표와 일치하는 결과 즉, 사고 발생후 계통이 점점 더 불안해 지다가 고장후의 정상상태 Time=1.0일때 계통이 가장 불안정한 것을 확인할 수 있다. 표 3.1은 각 시간에 대한 5모선 계통 1번 모선의 단위 무효전력 보상량 변화를 나타낸 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 5모선 계통과 7모선 계통을 대상으로 사고가 발생하였을 때 EMTP를 사용하여 과도상태 부분의 전압안정성을 해석하였다. 이 결과 세가지 사설을 알 수 있었다. 첫번째로 정상상태에 비하여 사고가 발생한 후 시간이 경과할수록 계통이 점점 더 불안해지는 것을 P-V곡선과 %지수를 적용해 확인할 수 있고 이 과정에서 %지수의 효율성을 보았다. 두번째로 안정성 향상 대책으로 단위 무효전력 보상량을 투입한 결과 정상상태 일때 보다 더 많은 보상량이 투입되므로 상정사고에 대비한 적절한 전압안정성 대책을 수립해야 함을 알 수 있었다. 세번째로 정상상태 일때는 물론 상정사고시 어느 한 시점만 주어지면 각모선의 전압, 위상각, 유효전력, 무효전력을 구할 수 있었다.

앞으로의 연구과제는 먼저 EMTP 자체만으로 전압안정성 해석이 가능하기 위해 발전기 모듈을 추가하는 것이며 두번째로는 정적인 해석방법이라고 할 수 있는 송전손실 상태식별법과 동적인 해석방법이라고 할 수 있는 EMTP와의 상호 호환성을 보완하는 것이다.

5. 참고문헌

- [1] C.C.Liu, "Analysis of Tap-Changer Dynamics and Construction of Voltage Stability Regions", IEEE Transaction on Circuit and System, Vol.36, No.4, pp 575-590, 1989.
- [2] Sekine, "Cascaded Voltage Collapse", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No.1, pp 250-256, February 1990.
- [3] 김건중, 김원경, 정태호, 이상중, "전압안정도 개선을 위한 무효전력 제어", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 422-425, 1991.
- [4] 김건중, 추진부, 김원경, 이상중, 김용배, "무효전력 손실감도를 이용한 전압붕괴 근접도 지표", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 78-82, 1992.
- [5] 최종기, "무효전력 보상에 의한 전압안정성 개선효과의 정량적 평가에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 1994.
- [6] 정준모, "貫荷의 電壓特性을 고려한 大規模 系統의 靜的 電壓崩壊 近接度 指標에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 1994.
- [7] 이상중, "손실감도 분석에 근거한 전력계통의 전압붕괴 근접도 상정에 관한 연구", 석사학위 논문, 충남대학교, 1992.
- [8] 김태균, 김준현, "전력계통에 있어 부하의 전압특성을 고려한 정적전압붕괴 근접도에 관한 연구", Vol.40, No.10, October 1991.
- [9] 전동훈, 김정훈, 심건보, 이봉용, "송전손실 상태식별법에 의한 정태 전압 안정성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1992.
- [10] 김태균, 김준현, "전력계통에 있어 부하의 전압특성을 고려한 정적전압붕괴 근접도에 관한 연구", Vol.40, No.10, October 1991.
- [11] "電力系統 過渡解折 프로그램의 理論 및 活用에 關한 研究", 한국전력 공사 기술연구원, 연구보고서, 1991.
- [12] Hiroshi Ohtsuki, "Reverse Action of On-Load Tap Change in Association with Voltage Collapse", IEEE Transactions on Power System, Vol.6, No.1, pp 300-306, February 1991.
- [13] J.Capentier, R.Girard & E.Sciano, "Voltage Collapse Proximity Indicators Computed from an Optimal Power Flow", Proceeding of 8th PSCC, 1984.