2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005. 7. 18 - 20

감도 해석을 통한 전압안정도 예방제어 알고리듬 개발

한상욱*, 서상수*, 이병준*, 장경철**, 김태균**
고려대학교 전력시스템기술연구센터*, 전력연구원**

Preventive Control Algorithm Using Sensitivity Analysis in Voltage Stability Assessment.

*Sangwook Han, *Sangsoo Seo, *Byongjun Lee, **Kyung-Chul Jang, **Tae-Kyun Kim
*Advanced Power System Research Center, Korea University, **Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

Abstract - In 2003, there was a wide-area blackout in the United States and Canada. More than fifty million people underwent power failure and the estimated financial loss was about four billion dollars. By such wide-area blackouts, the interest in voltage stability has increased gradually. In order to maintain the voltage stability, the preventive control is essential for a contingency. In this paper, a proper preventive control is determined for defined severe contingencies. Among the preventive control methods (generation rescheduling, load curtailment, tap adjusting, injecting the shunt capacitor, and so on.), this paper presents the injection of shunt capacitors by the sensitivity analysis of the voltage stability assessment for preventive controls. The 2006~2010 KEPCO summer peak system is used in case studies.

1. 서 론

최근 전압 안정도는 전력 계통 안전도(Security) 운용 및 해석의 주요 관심사 중 하나이다. 계통 운영자는 평상시의 전압 안정도를 향상시키고, 계통 운영 시에 발생할 수 있는 여러 가지 상황에서 전압불안정이 발생하지 않도록 계통 제어방안을 마련하여 운용하고 있다. 이러한 계통 제어방안은 크게 예방제어(Preventive Control)와 수정제어(Corrective Control)로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 예방제어 방안을 제시하고자 한다. 이 방안은 발생 가능한 심각한 사고들을 계통 운영자 측면에서 고려하여, 사고 발생 시 전압안정도를 유지할 수 있도록 하는 방안이다. 또한 일반적으로 오프라인 해석을 통하여 계통 계획 또는 운용 단계에서 이루어지며, 그 방법에는 조상설비의 투입, 발전력 재조정, 부하 차단, 탭 조정, 등이 있다. 본 논문에서는 조상설비의 투입을 이용하여 제어 방안 알고리듬을 제시하고자 한다[1,2].

조상설비의 투입은 계통의 구조적 특성으로 인하여 발생되는 무효 전력 수급의 불균형을 해소하여 전압안정도를 향상 시킬 수 있다. 이때, 적절한 투입위치 및 투입용량의 선정이 매우 중요하게 되는데, 이러한 결정을 내리기 위해서는 계통 운영자가 계통의 상황을 예측하고 수많은 시뮬레이션을 해야 하는 것이 사실이었다. 기존의 상용화된 툴을 이용해서는 상당한 시간과 노력을 투자하여 투입위치를 일일이 결정하고, 투입량 또한 일일이 정할 수밖에 없었다.

본 논문에서는 지금까지 들여온 시간과 노력을 최대한으로 줄이고 사용자의 편의성을 최대한 높이는 알고리듬을 제안 하고자 한다. 본 알고리듬에서는 유효전력 여유의 일정 수준을 유지하도록 조상설비를 투입하는 예방제어 방안을 제시한다. 제시한 알고리듬에 사용되는 입력 데이터에는 계통 데이터와 사고 데이터, 그리고 조상설비 투입이 가능한 모선 번호와 모선에 투입되는 조상설비의 크기 및 최대 투입량에 대한 데이터 이다. 또한 제안된 유효전력 여유 증가를 통한 예방제어 방안에서는 기저부하에 대하여 유지를 원하는 유효전력 여유 백분율을 입력 받도록 한다. 사례연구에는 2006~2010년 한전 하계 첨두부하 계통을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 예방제어의 기본원리

본 논문에서 사용되는 예방제어 방안은 유효전력 여유 곡선의 임계점에서 감도해석을 수행하여 조상설비의 투입위치를 선정하고, 선정된 투입 위치에 조상설비를 순차적으로 투입해 봄으로써 투입량을 정하는 방법이다. 감도해석은 모선의 참여인수(Participation Factor)를 사용하는데, 이는 유효전력 여유계산 알고리듬인 연속조류계산(Continuation Power Flow)의 중간과정에서 얻어낼 수 있다[3].

2.1.1 감도 해석

일반적으로 미소신호 안정도에서는 고유치해석(Eigen Analysis)을 통하여 좌우 고유벡터를 구하고, 이를 곱하여 참여인수를 구하게 된다. 그러나 본 논문에서는 고유치해석 없이 임계점에서의 참여인수를 구한다. 이 방법은 문헌 [4]에서 제시된 접선벡터는 임계점에서 영우고유벡터(Zero-Right Eigenvector)를 의미한다는 특성을 이용하여 간편하게 임계점에서 참여인수를 구하는 방법이다. 먼저 자코비안 행렬(J)과 고유치(λ), 우고유벡터(u)를 나타내면 아래의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$J \cdot u = \lambda \cdot u \tag{1}$$

이때 임계점에서의 고유치는 0이 되므로,

$$J \cdot u = 0 \tag{2}$$

로 나타낼 수 있다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 임계점에서의 영우고유벡터는 자코비안 행렬을 우변으로 이항하여 구할 수 있다. 이 과정을 살펴보면 식 (3)과 같이 연속조류계산의 예측과정에서 수행하는 접선벡터(Tangent Vector)의 계산 과정과 일치함을 볼 수 있다.

$$J_A \cdot \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ & e_k & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서 J_A는 확대 자코비안을 나타내며[3], 이때 접선벡터는 아래식과 같이 정의된다.

$$t=\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix},\ t_k=\begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \qquad (4)$$

이는 영우고유벡터가 임계점에서 접선벡터와 동일하다는 것을 나타낸다. 여기서 구한 영우고유벡터를 영좌고유벡터와 곱하여 모선 참여인수를 계산한다. 모드 i에 대한, 모선 k에서의 모선 참여인수는 아래와 같다[5].

$$P_{ki}=u_{ki}\cdot v_{ik}^{T} \qquad (5)$$

위 식은 계통을 불안정하게 만드는 고유치인 λ_i(Zero Eigen Value)가 결정하는 모드 i에 모선 k가 끼치는 영향의 정도를 나타내며, P_{ki}가 클수록 계통을 불안정하게 만드는 모드 i의 공헌도가 크게 된다. 본 논문에서는 참여인수가 큰 모선을 선택하여 예방제어 위치로 선정한다[6].

2.2 예방제어 알고리듬의 수행 절차

본 절에서는 앞 절에서 설명한 감도해석 결과를 바탕으로 조상설비 투입위치를 선정하여 예방제어를 수행하는 절차를 알아본다. 먼저 임의의 상정사고를 선택하여 유효전력 여유해석을 통해, 유효전력 여유가 정상상태의 유효전력 여유 보다 85%이하인 사고를 선택한다. 이후, 선정된 사고에서 임계점에서의 감도해석을 통하여 조상설비 투입 위치를 선정한다. 그리고 조상설비 투입 가능 지역을 토대로 기준이상의 유효전력 여유를 증가시키기 위한 조상설비 투입 용량을 결정한다. 다음 그림은 본 절에서 설명한 예방제어의 수행 절차를 나타낸다.

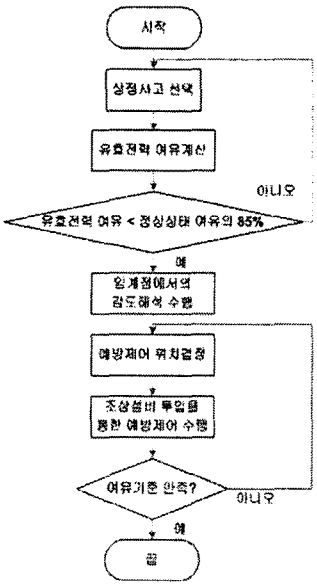

그림 1. 예방제어 방안의 수행 절차

2.3 사례연구

본 절에서 사용한 계통데이터는 2006~2010년의 한전 계통이며, 고려한 사고는 수도권 환상 망 및 북상조류선로 중 345kV 선로사고이다. 조상설비의 투입 위치는 154kV 이상 모선 중 조상설비의 투입이 가능하다고 알려진 132개 모선을 사용하였다. 그리고 조상설비의 크기는 모두 50MVar로 하였으며 최대 가능 투입량은 모선별 150MVar로 하였다.

2.3.1 유효전력 여유 증가 방안을 이용한 결과

2006~2010년 한전 계통을 이용하여 유효전력 여유해석 결과, 가장 심각한 사고는 화성3-아산3사고이며, 기저부하의 2.5% 유효전력 여유를 유지하도록 설정하였다. 2.5%만을 유지하도록 한 이유는, 기저부하의 4%를 유지하도록 수행할 경우, 정상 상태에서 모선에 과전압 문제가 발행하였기 때문이다. 년도 별 계통에 대한 결과를 표1에 나타내었다.

표 1. 여러 계통에서 화성3-아산3사고에 대한 2.5% 유효전력 여유 유지를 위해 투입한 조상설비의 위치와 량 및 효과.

사용 계통 (단위: 년도)	투입 위치 (모선번호 - 투입량) (단위: MVar)	투입 총 량 (단위: MVar)	투입 전 Margin (단위: MW)	투입 후 Margin (단위: MW)	증가 량 (단위: MW)
2006	3730 - 150 43640 - 150 3720 - 150 1585 - 150 3716 - 100	700	431	1340	909
2007	44470 - 150 4475 - 150 44460 - 150 4465 - 150 44480 - 100	700	635	1396	761
2008	1445 - 150 1765 - 150 1640 - 150 1735 - 150 1631 - 150	750	406	1468	1062
2009	1445 - 150 1640 - 150 1765 - 150 1631 - 150	600	598	1484	886
2010	1630 - 150 1445 - 150 1765 - 50	350	957	1513	556

표 2. 첫 번째 시뮬레이션에 대한 전압 낮은 모선 순 투입 위치 및 효과.

사용 계통 (단위: 년도)	투입 위치 (모선번호 - 투입량) (단위: MVar)	투입 총 량 (단위: MVar)	투입 전 Margin (단위: MW)	투입 후 Margin (단위: MW)	증가 량 (단위: MW)
2006	4900 - 150 4800 - 150 4650 - 150 4600 - 150 4601 - 150	750	431	1352	921
2007	4900 - 150 6700 - 150 4800 - 150 4650 - 150 6600 - 100	700	635	1378	743
2008	6530 - 150 44970 - 150 4970 - 150 46545 - 150 6545 - 150 6700 - 100	850	406	1429	1023
2009	44970 - 150 4970 - 150 6530 - 150 46545 - 150 6545 - 100	700	598	1486	888
2010	3835 - 150 44990 - 150 4990 - 150 44970 - 100	550	957	1571	614

표 2는 화성3-아산3사고에 대해서 감도의 효과를 알아보기 위해, 조상설비의 투입위치를 전압이 낮은 모선 순으로 정하여 선정한 결과이다. 이번에도 2.5% 유효전력

여유를 유지하도록 설정 하였다.

그림2에서 보듯이 표1과 2를 비교하여 보면, 2.5%의 유효전력 여유를 유지하려 했을 때, 감도 순으로 투입하였을 경우가 조상설비의 투입량이 더 적은 반면, 투입 후의 마진의 증가량은 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한 투입량이 같더라도 유효전력 여유는 더 크게 나오는 것을 확인 할 수 있다. 이는 전압이 낮은 순서로 조상설비를 투입한 것 보다 감도해석을 통하여 구하여진 결과를 이용하는 것이 더 효과적이라는 것을 보여준다.

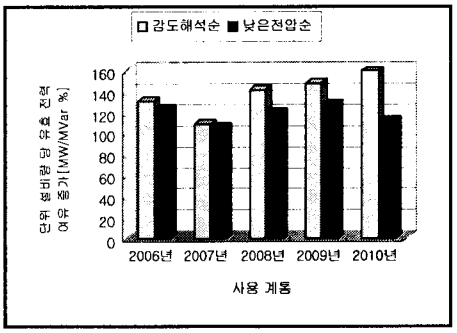

그림 2. 감도해석 순 결과와 낮은 전압 순 결과의 비교

표 3은 2006년 한전계통을 사용하여, 위에서 선정한 사고 중 화성3-아산3사고를 제외한 11가지의 상정사고에서 기저부하의 4% 유효전력 여유를 유지하도록 한 결과 이다.

표 3. 2006년 계통에서 여러 가지 사고에 대한 4% 유효전력 여유 유지를 위해 투입한 조상설비의 위치와 량 및 효과.

사고 이름 (From-To) 345kV	투입 위치 (모선번호-투입량) (단위: MVar)	투입 총 량 (단위: MVar)	투입 전 Margin (단위: MW)	투입 후 Margin (단위: MW)	증가 량 (단위: MW)
신가평-미금 (1200-1700)	1585 - 150	150	1959	2156	197
양주-의정부 (1400-1500)	1445 - 150 1640 - 150	300	1533	2164	631
영서-서서울 (2400-4600)	2680 - 150 2665 - 150 2670 - 150 1812 - 150 2795 - 150 2445 - 50	800	1088	2144	1056
동서울-광주 (2500-4750)	1585 - 150 1445 - 50	200	1875	2170	295
신인천-인천TP (3400-3450)	3730 - 150 43640 - 150	300	1616	2143	527
신인천-신시흥 (3401,3600)	3730 - 150 43640 - 150 3720 - 100	400	1241	2202	961
신안성-신성남 (4100-4500)	2780 - 150	150	1930	2186	256
신안성-신용인 (4100-4700)	1445 - 150 1640 - 100	250	1831	2158	327
화성-서서울 (4400-4600)	1585 - 150 1445 - 50	200	1936	2171	235
서서울-청양 (4600-6800)	1585 - 150 1445 - 150 1640 - 150	450	1580	2160	580
광주-신제천 (4750-5700)	1445 - 150 1640 - 150 1765 - 150 1631 - 50	500	1394	2128	734

3. 결 론

본 연구에서는 계통 계획 측면에서 고려되는 여러 가지 사고 중에서 전압 안정도 기준을 만족하지 않는 사고에 대하여 조상설비를 투입하도록 하는 예방제어 방안을 제시 하였다. 기존의 조상 설비투입을 통한 예방제어는 계통 운영자가 상용화된 툴을 이용하여 반복적인 조류계산을 통하여 실시하여 왔다. 하지만 이러한 방법은 계통 운영자에게 상당한 시간과 노력을 요구하였고, 또한 얻어진 결과도 타당하리라는 보장이 없었다. 본 논문에서는 유효전력 여유해석에서 얻어지는 감도정보를 통하여 가장 효과적인 투입위치를 선정하여 주고 기준 유효전력 여유를 만족하기 위한 투입 용량 또한 결정해 주는 정확한 예방제어 방안을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 알고리듬은 2006~2010년 한전계통으로 사례연구 되었다, 먼저 유효 전력여유 계산을 통하여 여유기준을 만족하지 않는 심각한 사고를 선별하고, 선별된 사고에 대해서 유효전력 여유곡선의 임계점에서 참여 인수를 이용한 감도해석을 수행하여 예방제어 위치를 선정 하였다. 그리고 선정된 위치에 조상설비를 투입하여 투입 용량을 결정하였다. 이 결과는, 사고 후 기준 전압에 미달되는 위치에 조상설비를 투입한 결과와 비교되었으며, 이를 통하여 제시한 방안의 유용성을 입증할 수 있었다.

예방제어는 계통 계획 측면에서 계통 안전도를 확보할 수 있도록 수행되어야 하므로, 본 논문에서 제시한 조상설비 투입을 통한 예방제어 방안뿐만 아니라 발전력 재분배, 부하차단, 탭 조정 등의 제어방안도 검토되어야 한다. 또한 이러한 여러 가지 방안에 대한 우선순위도 고려되어야 하며 이를 최적화 하는 방안에 대한 연구도 수행 되어야 한다. 그리고 계통 계획과 운영, 보호 등의 측면에서 전압안정도를 고려한 절차와 해석 제어방안 수립에 대한 심도 깊은 연구가 꾸준히 진행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 전력 기술개발 기반기금의 연구 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] Florin Capitanescu and Thierry Van Cutsem, " Preventive Control of Voltage Security Margins: A Multicontingency Sensitivity-Based Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No.2, May 2002

[2] Thierry Van Cutsem, "Voltage Stability Of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998

[3] Venkataramana Ajjarapu, " The Continuation Power Flow : A Tool For Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No.1, February 1992

[4] A.C.Z. de Souza, C.A. Cañizaes, and V.H. Quintana "New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors", IEEE Trans.Power Sytems, Vol.12, No.3, Aug.1997, pp.1380-1387

[5] P.Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994.

[6] 이주호, 송화창,이병준,"선로정수 연속조류법을 이용한 수정제어 방안에 관한 연구", 전력계통연구회 제37회 춘계학술대회 논문집, pp.30-34, 2003.