

감도행렬기반의 전압제어시스템에 관한 연구

이흥재*, **유원근***, 임찬호**, 이경섭*, 이은재*, 김태균***, 신정훈***, 남수철***
 광운대학교*, 경주대학교**, 전력연구원***

A Study on the Intelligent Voltage Control System using the Sensitivity Matrix

H.J.LEE*, **W.K.YU***, C.H.LIM**, K.S.LEE*, W.J.LEE*, T.G.KIM***, J.H.SIN***, S.C.NAM***
 KWANGWOON UNIVERSITY*, GYEONGJU UNIVERSITY**, KEPRI***

Abstract - 최근 구미 선진국에서 빈발하고 있는 전압붕괴로 인한 대형 정전사고의 확률이 점증하고 있어 전압관리가 전력계통의 주요관심사로 대두되고 있으며, 이러한 문제들에 대한 대비가 시급한 실정이다. 전압 및 무효전력의 계층적 전압제어는 이러한 문제점들을 경감시킬 수 있는 방법의 일환으로 이미 유럽의 선진국에서는 2차적 전압제어, 3차적 전압제어 시스템을 개발하여 운영하고 있는 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 지능형 전압제어시스템을 개발하였으며, RTDS(Real Time Digital Simulator)를 통하여 성능을 검증하는 단계에 와 있다. 본 논문에서는 정적 모의를 통해 지능형 전압제어시스템의 효과를 검증하였고, 제추계통을 대상으로 개발된 지능형 전압제어시스템의 동작 특성을 검증할 예정이다.

KEY WORD : 전압제어, 지능형 전압제어시스템

1. 서 론

전압제어는 주파수 문제와 달리 국지적인 특성을 가지므로 계층적 전압제어 시스템이 개발되기 이전까지 전압제어에 필요한 무효전력 운용 방법은 계통 운영자의 전문적인 지식이나 경험적 판단에 의거하여 운용되어 왔다.

1970년대 인공지능의 발달과 함께 이러한 전문가의 경험적 지식을 컴퓨터를 이용하여 모사하는 이른바 전문가시스템이 출현하게 되었고, 80년대 캐나다에서 최초로 감도트리 기반의 실시간 전압, 무효전력 제어 전문가시스템[1]이 제시된 후 스페인에서는 SEGRE[2](무효전력관리 시스템)과 SETRE[3](무효전력제어 시스템)를 개발하여 실제 계통에 성공적으로 적용하였으며 여러 유럽의 선진국에서 자국의 특성에 맞는 전압, 무효전력 제어시스템을 개발하여 운영하고 있는 실정이다.[4]

최근 우리나라의 계통 역시 과거 유럽의 선진국들이 겪은 상황과 같이 지속적으로 부하가 증가함에 따라 중부하 상태로 안정도 한계 근처에서 운용되고 있고, 대규모 발전단지는 원거리에서 분포되어 복잡조류문제도 심각한 상황이다. 전압, 무효전력의 제어는 우리나라 계통이 유럽과 달리 계통망이 매우 조밀하게 구성되어 지역별 통합 또는 협조제어 체제가 구축되어 있지 않으므로 변전소별로 계통전압을 유지하고 있으나 고속 컴퓨터 네트워크의 구축과 함께 실시간 전압의 데이터 취득이 용이하게 되고 양질의 전력에 대한 요구가 증대함에 따라 전압제어시스템 구축의 필요성이 높아지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 조밀하게 구성된 전력망의 전압을 효과적으로 제어할 수 있는 지능형 전압제어시스템을 개발하였으며, 그 성능을 RTDS를 이용하여 검증할 예정이다. 여기에서는 RTDS를 이용한 모의 이전에 PSS/E를 사용한 정태해석을 통하여 이 시스템의 성능을 검증하여 보기로 한다.

2. 지능형 전압제어 시스템

2.1 지능형 전압제어시스템의 구조

본 논문에서는 수치형 알고리즘과 지식기반의 전문가시스템이 혼합된 형태의 하이브리드형 전압제어시스템을 개발하였다.

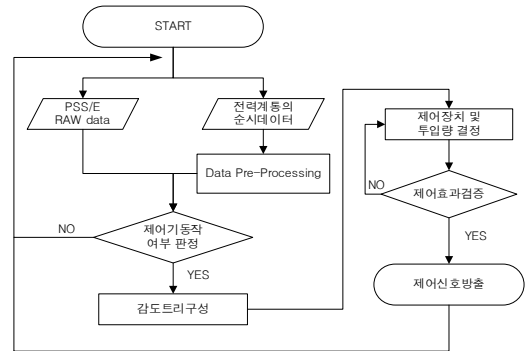
수치형 알고리즘은 감도트리를 구성하는 감도행렬과 전압제어효과를 검증하는 전력조류계산 프로그램으로 구성되어 있다. 또한, 전문가 시스템은 제어시스템의 동작여부를 판정하고 제어장치와 투입량을 결정하는 부분을 담당한다. 각 부분의 내용은 다음과 같다.

2.1.1 지식베이스

전문가 시스템을 구성하는 중요한 부분인 지식베이스는 데이터베이스와 룰베이스로 구성된다. 데이터베이스는 자료를 저장하는 부분으로 Static DB와 Dynamic DB로 구분할 수 있는데 Static DB는 프로그램 수행기간 중 변화하지 않는 정지형 데이터를 저장한다. Dynamic DB는

해의 탐색과정에서 상태가 변함에 따라 계속 변화하는 데이터로서 예를 들면, 각 발전기 단자전압, 변압기 탭 위치, 병렬 커패시터의 현재 투입량 및 각 모선의 변화된 전압이 이에 해당된다. 룰베이스는 각종 if-then 형태의 Production Rule로서, 전압제어 수행에 필요한 제어규칙을 저장하는 곳이다. 본 논문에서는 다음과 같은 기본규칙들을 개발하였으며, 다음 그림 1은 지능형 전압제어시스템의 전체적인 동작원리를 나타낸다.

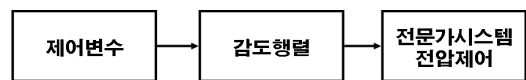
- (1) 모선의 전압이 상·하한치를 초과한다면 지능형 전압 제어시스템을 동작시킨다.
 - 345[kV] : $0.95[p.u] \geq V$ or $V \leq 1.05[p.u]$
 - 154[kV] : $0.95[p.u] \geq V$ or $V \leq 1.05[p.u]$
- (2) 이상전압이 발생하면 가장 먼저 감도트리를 구성한다.
- (3) 지능형 전압 제어시스템의 선택은 감도가 가장 큰 설비를 선택한다.
- (4) 지능형 전압 제어시스템의 종류별 우선순위는 발전기 단자전압조정을 우선 고려한다.
- (5) 만약 이상전압이 여러 모선에서 발생하였을 때 이상전압 발생폭이 가장 큰 모선을 기준으로 제어설비를 선택한다.
- (6) 발전기 단자 전압 조정 후에도 모선의 전압이 허용범위 이내로 들이지 않으면 다음 단계로 변압기 탭, 병렬 커패시터 순으로 제어설비 투입을 고려한다.
- (7) 선택한 무효전력 보상설비의 용량이 부족한 경우, 차순위 감도의 설비를 선택한다.
- (8) 전압제어의 효과를 검증하기 위하여 조류계산을 수행한다.
- (9) 무효전력 보상량은 선형예측법을 사용하여 결정한다.



<그림 1> 지능형 전압제어시스템의 동작

2.1.2 감도행렬

감도행렬은 그림 2와 같이, 지능형 전압제어시스템의 기본이 되는 매개변수로서 각 보상기의 보상량, 즉 병렬 커패시터/리액터의 투입, 발전기 단자전압 변화, 변압기 탭 변화에 대한 각 모선전압의 변화량을 나타낸 행렬이다.



<그림 2> 전압제어와 감도행렬의 관계도

모선전압을 상태변수 X로 정의하고 전압제어장치를 제어변수 U라고 하면 U는 U_{Vg}, U_T, U_{sh} 로 구분할 수 있다. 여기서, U_{Vg} 는 발전기 단자

전압, U_T 는 변압기 탭, U_{sh} 는 병렬 커패시터를 의미한다.

모션에서의 무효전력 수급은 0 이므로 식 (1)과 같은 n개의 대수방정식으로 표현할 수 있다.

$$H_i = -Q_{Gi} + Q_{Li} + Q_{Ti} = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

$$H_i = -Q_{Gi} + Q_{Li} + \sum_{j=1}^n V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - r_{ij}) = 0$$

제어변수 초기상태와 상태변수 초기상태를 식 (2)로 정의하고 변화량 ΔU 에 대하여 ΔX 만큼 변화한다고 가정하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$U = U_0, \quad X = X_0, \quad H(X_0, U_0) = 0 \quad (2)$$

$$H(X_0 + \Delta X, U_0 + \Delta U) = 0 \quad (3)$$

식 (3)을 Taylor급수로 전개하여 식 (4)와 같이 상태변수 벡터 H_X 와 H_U 로 표현할 수 있다.

$$H_X = \frac{\partial(H_1, H_2, H_3, \dots, H_n)}{\partial(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)}, H_U = \frac{\partial(H_1, H_2, H_3, \dots, H_n)}{\partial(U_1, U_2, U_3, \dots, U_n)} \quad (4)$$

ΔU 와 ΔX 의 관계를 정리하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta X = -H_X^{-1} \cdot H_U \Delta U \quad (5)$$

식 (5)에서 $[-H_X^{-1} \cdot H_U]$ 를 제어변수 U에 대한 감도행렬 S (Sensitivity Matrix)라고 정의하며, 각각의 제어변수에 대한 감도행렬은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Delta V_i = S_{Vg} \cdot \Delta U_{Vg} \quad (6)$$

$$\Delta V_i = S_T \cdot \Delta U_T$$

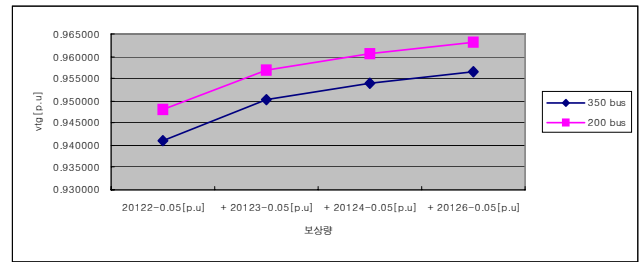
$$\Delta V_i = S_{sh} \cdot \Delta U_{sh}$$

3. 사례 연구

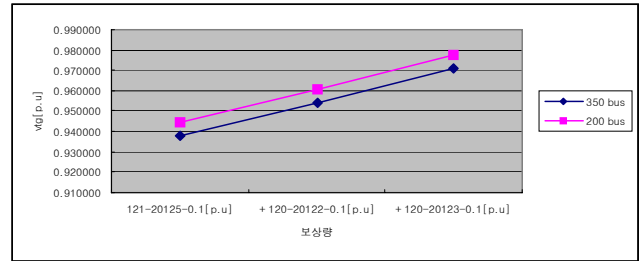
본 연구에서는 지능형 전압제어시스템의 효율성을 검증하기 위해 정적 모의를 통한 사례연구를 수행하였다. 제주 계통을 대상으로 선로탈락 상정사고시 이상전압이 발생한 사례를 중심으로 모의를 수행하여 전압제어시스템의 효율성을 검증하였다. 또한, PSS/E 모의 결과와 비교를 통해 개발된 시스템의 전력조류계산 프로그램의 정밀도를 검증하였다. 표 1은 120(북제주TP)-350(조천)간 선로탈락 상정사고시 이상전압이 발생한 모션을 보여주고 있다. 그림 3~5는 제어규칙에 근거하여 각각의 제어요소를 통해 전압, 무효전력을 보상하였을 때 전압상승 추이를 보여주고 있다.

〈표 1〉 120(북제주TP)-350(조천)간 선로탈락시 이상전압발생

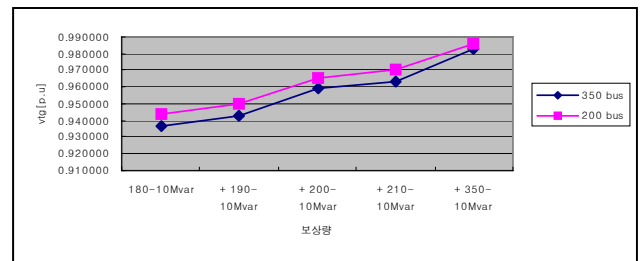
BUS NUMBER	BUS NAME	PSS/E	C Program
		Voltage[p.u]	Voltage[p.u]
120	북제주TP	1.0042	1.004614
121	북제주CS	1.0042	1.004614
122	북제주TS	1.0042	1.004613
130	동제주	1.0032	1.003642
140	신제주	0.9978	0.998226
150	한림CC	1.0073	1.007500
160	안덕	0.9958	0.995925
170	남제주TP	0.9967	0.996792
180	신서귀	0.9763	0.976921
190	한라	0.9729	0.973811
200	성산	0.9359	0.938745
210	표선	0.9795	0.980190
220	산지	1.0029	1.003352
330	한림	1.0055	1.005726
350	조천	0.9288	0.931945



〈그림 3〉 발전기 단자전압 제어시 전압상승 추이



〈그림 4〉 변압기 탭 제어시 전압상승 추이



〈그림 5〉 병렬 커패시터 제어시 전압상승 추이

4. 결론

본 논문에서는 제주계통을 대상으로 선로탈락 상정사고에 대한 정적 모의를 기반으로 개발된 지능형 전압제어시스템의 효율성을 검증하였다. 감도트리에 근거하여 발전기 단자전압, 변압기 탭, 병렬 커패시터의 전압제어설비를 선택함으로써 최소한의 제어동작을 통해 계통의 전압, 무효전력을 효과적으로 관리할 수 있을 것으로 생각된다. 향후 RTDS를 이용하여 동적 모의를 수행하여 지능형 전압제어 시스템의 성능을 검증할 예정이다.

[참고 문헌]

- [1] S. J. Cheng, O. P. Malik, G. S. Hope, "An Expert System for Voltage and Reactive Power Control of a Power System", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 3. No. 4, Nov. 1988, pp. 1449-1455
- [2] J. L. Sancha, J. L. Fernandez, F. Martinez, C. Salle, "Spanish Practices in Reactive Power Management and Voltage Control". IEEE Colloquium on International Practices in Reactive Power Control, April 1993, pp. 3/1-3/4
- [3] J. L. Martinez Ramos, A. Gomez Exposito, J. Cortes Cerezo, E. Mendez Ruiz, Y. Cuellar Salinas, "A Hybrid Tool to Assist the Operator in Reactive Power/Voltage Control and Optimization", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 760-768
- [4] T. L. Le, M. Negnevitsky, M. Piekutowski, "Network Equivalents and Expert System Application for Voltage and VAR Control in Large-Scale Power Systems", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 12. No. 4, Nov. 1997, pp. 1440-1445
- [5] H. J. Lee, et al., "A hybrid methodology for the development of intelligent voltage and reactive power control systems", Proc. on the WSEAS Conference, 2007, pp. 109-114