

정상상태에서의 최적전압제어 기법에 관한 연구

원종률, 윤용범, 윤종수, 추진부
한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실

A Study on The Steady State Voltage Control Technique

Jong-Ryul Won, Yong-Beum Yoon, Jong-Su Yoon, Jin-Boo Choo
Power System Research Lab., Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

Abstract - This paper presents the analysis on the voltage problems of Korea electric power system and efficient voltage control actions, when contingencies are considered. This analysis is based on the developed voltage control techniques. It uses the reactive power-voltage nonlinear characteristics. Therefore, efficient voltage control actions can be obtained. Principal control actions of the program are mainly switched shunt capacitor and generator voltage regulating. This is tested on Korea real power system in future year.

1. 서 론

정상상태에서의 전압제어는 일반적으로 전력조류계산 프로그램 및 전압분석 프로그램 등을 사용하여 계통의 안정성을 평가하는 것으로, 수 많은 상정사고 시나리오를 해석함으로써 전압문제가 발생하면 이를 해결하기 위해 적절한 전압제어 운전점을 찾아내는 것이다. 한편으로는 전력조류계산 프로그램과 병행하여 최적조류계산(OPF) 프로그램을 사용하기도 하나 이는 계산부담이 크고 주어진 경우에 따라서는 최적화문제의 특성으로 인하여 OPF 프로그램으로부터 결과를 얻지 못하는 등 해의 존재성이 보장되지 않아 적절한 계통운전방안을 찾지 못하기도 한다[3]. 특히 상정사고 발생시 전력조류계산이 발산하여 수립된 조류계산 결과를 얻지 못하는 경우에는 적절한 전압제어방안 수립이 불가능하게 된다. 정상상태에서의 전압제어는 계통운전원 혹은 감시시스템(EMS, SCADA)이 전체 계통의 전압과 무효전력 상황을 감시하다가 어떠한 원인으로 인하여 심각한 전압상승 혹은 저하문제가 발생하는 경우, 이의 해결을 위한 복구조치 방안을 계통 운전원이 결정, 관련기기를 조작함으로써 이루어 진다[2,5].

이와 같은 관점에서 본 연구에서는 상정사고로 인한 계통 전압문제를 분석하고, 제반 전압제어 설비에 의한 최적의 전압제어 운전점과 복구방안을 찾아내어 계통운전원의 복구조치 역할을 돕는 프로그램을 개발하였다. 이를 위하여 새로운 전압제어기법 프로그램을 개발[1,4]하여 이를 토대로 제어방안을 수립하였으며, 무효전력-전압사이의 비선형 특성을 그대로 이용하였기 때문에 무효전력이나 전압변화량이 큰 경우에도 비교적 정확한 전압제어 운전방안을 얻을 수 있다. 즉, 상정사고가 발생하면 무효전력 편차가 가장 큰 모선의 전압을 초기 정상상태로 가깝도록 하거나 다른 모선으로 이전시키는 것으로서, 전력계통의 특성상 그 사고가 파급될 정도의 국부적인 모선에 대해서 최소사승법을 이용하여 가장 적절한 전압제어 운전점과 방안을 찾아낸다. 이를 미래의 실 계통에 적용하여 그 결과를 제시하였다.

2. 최적전압제어 알고리즘

임의의 i모선에서의 무효전력에 관한 조류방정식을 표현

하면 식(1)과 같다.

$$Q_i = V_i^2 \left[\left(\sum_{j=0, j \neq i}^n B_{ij} \right) - b_i \right] - V_i \sum_{j=0, j \neq i}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + G_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

그리고 식(1)을 행렬형태로 표현하면 식(2)와 같은 정상상태에서의 무효전력-전압에 관한 방정식을 얻을 수 있다.

$$B^{nom} V^{nom} - Q^{nom} / V^{nom} = 0 \quad (2)$$

여기서 각 변수는 식(3)-식(5)와 같이 주어지며 윗첨자 *nom*은 정상상태에서의 계통운전점을 나타낸다.

$$V^{nom} = [V_1 V_2 \dots V_i \dots V_{l+s}]^T \quad (3)$$

$$Q^{nom} = [Q_1 Q_2 \dots Q_i \dots Q_{l+s}]^T \quad (4)$$

$$B_{i,i}^{nom} = \sum_{j=0, j \neq i}^n B_{ij} - b_i,$$

$$B_{i,j}^{nom} = -B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (5)$$

또한, Q^{nom} / V^{nom} 은 두 벡터 Q^{nom} 과 V^{nom} 의 각 구성요소별로 나눈 벡터를 의미한다. 선로사고와 같은 계통변화가 일어난 경우 변화후의 무효전력-전압방정식은 식(2)에서 정상상태 전압 V^{nom} 을 변화후의 전압을 나타내는 V 로 대체한 식(6)으로 표시된다.

$$BV - Q / V = 0 \quad (6)$$

계통 변화후에도 전압 V^{nom} 을 유지하고자 할 경우 각 모선에서의 무효전력 편차를 나타내는 계수 D 는 식(7)과 같이 표현될 수 있으며 결국 각 모선에서의 D 계수가 모선전압 문제를 정량적으로 나타내는 계수가 된다.

$$BV^{nom} - Q / V^{nom} = D \quad (7)$$

i모선에서의 D 계수(D 벡터의 i 요소)가 양(positive)이면 i 모선에서의 무효전력 부족(저전압)을 나타내며 음(negative)이면 과도한 무효전력 주입, 즉 고전압을 의미하게 된다. 이러한 의미의 D 벡터는 모선에서의 무효전력 편차(mismatch)에 비례하게 된다.

식(7)을 부하모선 및 발전기 모선으로 구분하고 계통운전점에서 테일러 급수 전개하면 식(8)과 같은 행렬형태의 수식을 얻을 수 있게된다.

$$\begin{bmatrix} -D_l \\ D_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{ll} & H_{lg} \\ H_{gl} & H_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_l \\ \Delta V_g \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, 행렬 $H = B + \text{diag} \left[\frac{Q}{(V_i^{nom})^2} \right]$ 와 같이 주어진다.

상기 식(8)에 대한 대수적 행렬연산을하면 식(9)와 같이

부하모션에서의 전압변동 ΔV_i 은 발전기모션에서의 전압변화량, 부하모션에서의 편차계수 D 및 H 행렬에 의하여 표시된다. 따라서 전압제어의 목적은 상정사고가 발생하여도 전압이 가능하면 사고발생전 상태를 유지하는 것(본 연구에서는 사고발생전의 전압상태가 최적인전압이라고 가정하기로 함)이므로 결국 이 문제는 식(10)에 나타낸 바와같이 부하모션에서의 부하전압 변동량 $\|\Delta V\|$ 를 최소화 하는 최소자승문제(LSM : Least Square Minimization)가 된다.

$$\Delta V_i = -H_{ii}^{-1} D_i - H_{ii}^{-1} H_{ig} \Delta V_g \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \min_{\Delta V_g} \|\Delta V\|^2 \\ \text{sub. } \Delta V_i = -H_{ii}^{-1} D_i - H_{ii}^{-1} H_{ig} \Delta V_g \end{aligned} \quad (10)$$

이러한 형태의 최소자승문제에 대한 해는 일반적인 수치해석 문헌을 통하여 널리 소개되어 있으며 이를 이용하여 해를 구하면 식(11)과 같다.

$$\Delta \hat{V}_g = -[(H_{ii}^{-1} H_{ig})^T H_{ii}^{-1} H_{ig}]^{-1} (H_{ii}^{-1} H_{ig})^T H_{ii}^{-1} D_i \quad (11)$$

식(11)로 주어지는 결과를 이용하여 각 발전기의 전압을 조정함으로써 전압문제 발생시에도 최적(혹은 준최적)의 전압유지가 가능하도록 한다.

물론 발전기외의 무효전력보상장치와 무효전력원이 있는 경우에도 본 방법적용이 가능하다. 이와같은 수학적 정식화를 이용한 전체적인 전압제어 방안도출 알고리즘은 다음과 같다.

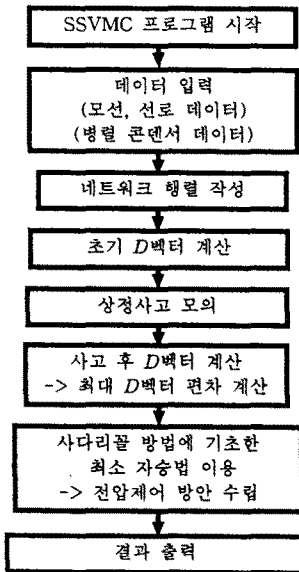


그림 1. 프로그램 전체 흐름도

단계 1. 조류계산을 하여 정상운전 상태에서의 운전점을 설정한다.

단계 2. 상정사고에 대하여 전력조류계산을 한다. (이때 경우에 따라서는 무효전력 전압(Q-V)에 관한 조류방정식만을 고려할 수 있다)

단계 3. 무효전력과 전압간의 비선형 문제를 선형문제로 변환(전력조류방정식을 선형화하는 것이 아님)한다.

단계 4. 최종적으로 전압제어설비에서의 전압조정값을 식(11)에 의하여 찾아낸다.

한편 본 프로그램은 현재 한전에서 사용하고 있는 PSS/E와의 데이터 연계가 가능하도록 되어있다. 이러한 데이터 연계도를 살펴보면 다음과 같다.

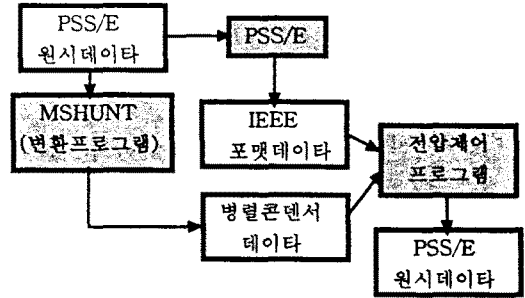


그림 2. 데이터 흐름도

3. 사례 연구

본 전압제어 프로그램은 다음과 같이 크게 두 개의 전략 방안을 실시한다. 즉, 전압을 조절하기 위해 한 가지는 병렬 콘덴서를 투입하는 것이며, 다른 하나는 발전기 단자전압을 조정하는 것이다. 본 프로그램을 2001년의 한전 실 계통의 대표적인 상정사고에 대해 적용하였다. 이를 위하여 대표적인 상정사고를 아래와 같이 정리하였다. 이와 같은 각각의 상정사고에 대해 병렬 콘덴서를 투입하는 방안을 우선적으로 하는 경우와 발전기 단자전압을 직접 조정하는 방안을 우선적으로 하는 경우의 두 가지에 대해 그 결과를 정리하였다.

표 1. 2001년의 대표적 상정사고 유형

상정사고 번호	상정사고 내용
# 1	고리NP#2 345 - 신포항3 345 선로개방 사고
# 2	보령TP#2 345 - 청양3 345 선로개방 사고
# 3	월성#1 26.0 모선 발전기 분리사고

3.1 2001년의 상정사고에 대한 결과

3.1.1 상정사고 #1

가) 병렬 콘덴서 투입우선인 경우

합열 154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.
 봉명 154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.
 음성 154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.
 점촌 154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.
 북평 154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.
 삼척 154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.

표 2. D벡터값의 변화

	상정사고 직후	제어 후
최소 D	-2.334(고리NP#2 3)	-0.007(고리NP#2 3)
최대 D	2.305(신포항3 34)	0.000(신양산1 15)

나) 발전기 단자전압조정 우선인 경우

- 전압변화량

0.029623p.u. (고리-#3G22.0)

표 3. D벡터값의 변화

	상정사고 직후	제어 후
최소 D	-2.334(고리NP#2 3)	-0.029(고리#3-G22)
최대 D	2.305(신포항3 34)	0.000(양주3 34)

3.1.2 상정사고 #2

가) 병렬 콘덴서 투입우선인 경우

만야월154 : 0.05p.u.

장성 154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.

남동 154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.

복시화154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.

표 4. D벡터값의 변화

	상정사고 직후	제어 후
최소 D	-6.901(보령TP#2 3)	-0.001(청양1 15)
최대 D	6.832(청양3 34)	0.000(신시흥1 15)

나) 발전기 단자전압조정 우선인 경우

- 전압변화량

0.100000p.u. (보령GT#1 13.8)

0.092734p.u. (보령-#3G22.0)

표 5. D벡터값의 변화

	상정사고 직후	제어 후
최소 D	-6.901(보령TP#2 3)	-0.100(보령GT#113)
최대 D	6.832(청양3 34)	0.000(양주3 34)

3.1.3 상정사고 #3

가) 병렬 콘덴서 투입우선인 경우

수영 154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.

제천 154 : 0.1p.u.

복인동154 : 0.05p.u. × 5 = 0.25p.u.

표 6. D벡터값의 변화

	상정사고 직후	제어 후
최소 D	-0.000(양주3 34)	-0.079(복포항 15)
최대 D	1.894(월성#1 26)	0.032(월성#1 26)

나) 발전기 단자전압조정 우선인 경우

- 전압변화량

0.002166p.u. (울진-#1G22.0)

0.007055p.u. (고리-#3G22.0)

표 7. D벡터값의 변화

	상정사고 직후	제어 후
최소 D	-0.000(양주3 34)	-0.007(고리-#3G22)
최대 D	1.894(월성#1 26)	0.046(월성#1 26)

3. 결 론

본 연구에서는 상정사고로 인한 한전계통에서의 전압문제를 분석하고, 제반 전압제어설비에 의한 최적의 전압제어 운전점과 복구방안을 찾아내어 계통운전원의 복구 조치 역할을 돕는 프로그램을 개발하였다. 즉, 상정사고가 발생하면 무효전력 편차가 가장 큰 모선의 전압을 초기 정상상태로 가감도록 하거나 다른 모선으로 이전시키는 것으로서, 전력계통의 특성상 그 사고가 과급될 정도의 국부적인 모선에 대해서 최소자승법을 이용하여 가장 적절한 전압제어 운전점과 방안을 찾아 내는 것이다. 또한 본 프로그램은 실무자의 편의를 위해 PSS/E와의 데이터 연계가 가능하도록 하였다. 이를 미래 2001년의 한전 실 계통에 적용하여 그 결과를 제시하였다.

(참 고 문 헌)

- (1) 한전 전력연구원, "FACTS에 의한 계통제어 기술향상 및 복구운전기법 개발에 관한 연구", 최종보고서, '98전력연-단635, 1998. 9.
- (2) Hasler M., Wang C., Ilic M., Zobian A., "Computation of static stability margins in power systems using monotonicity", Proc. ISCAS'93, Chicago, pp. 2196-2199, 1993.
- (3) J. Thorp, M. Ilic-Sponge, D. Schulz, "Existence and uniqueness of a solution to the reactive power problem for an electric power network", Proceeding of 1984 IEEE International Symposium on CAS, Vol. 1, 1984.
- (4) Ilic M.D., "Voltage related power systems monitoring and control", LEES Working Paper (WP91-001), MIT, March, 1991.
- (5) Miller T., *Reactive Power Control in Electric Systems*, John Wiley & Sons Inc., 1982.