전압안정도여유를 고려한 무효전력원 배분계획

송 길 영* 최 상 규** 남궁 재 용◎
*: 고려대학교 **: 안양전문대학

The Optimal VAR Planning Considering Voltage Stability Margin

Kil-Yeong, Song* Sang-Kyu, Choi** Jae-Yong, Namkung◎
*: Korea University **: Anyang Junior College

ABSTRACT

This paper presents a new optimal VAR planning algorithm considering voltage stability margin. The characteristic of this method is to make it possible to formulate VAR planning for the dual purpose of maintaining voltage profiles within specified limits, and increasing the voltage stability margin of anticipated operating conditions with respect to voltage collapse.

The IEEE-30 bus system is used to demonstrate the capability of the proposed algorithm.

1. 서론

최적 무효전력원 배분계획은, 장래 예상되는 상정사고 전·후의 계통상태에 대하여, 주요 모선전압을 규정범위내로 유지하기 위하여 필요한 콘덴서나 리액터 등의 무효전력원 설비의 최적 신설량을 결정하는 문제이다.

전력계통에서 이와 같은 최적 무효전력원 배분계획에 대한 연구는 비교적 역사가 길며, 이에 대한 많은 연구가 시행되어 왔다. 1968년에 Maliszewski, Garver 등이 선형계획법을 이용한 무효전력원 배분계획모델을 발표함으로써 이 분야에 대한 초석을 놓기 시작하였다.[1] Mamandur 와 Chenowth는 LP 에 대하여 알맞는 수학적인 정식화를 제안했고 체계적인 앨고리즘을 개발했다.[2] K. Iba 와 H. Suzuki 등은 무효전력원 배분계획을 위한 LP 정식화 과정에서 제약행렬을 얻기 위하여, 자코비안의 역행렬 (J^{-1}) 을 사용하지 않고, sparse 성이 보존된 자코비안 행렬과 감도행렬을 직접 이용함으로써 수렴 특성과 해의 정확도를 개선시킨 앨고리즘을 제시하였다.[3] 한편, 송전선로의 과중한 부담 및 불충분한 무효전력 공급 등으로 인해 대규모 전력계통이 빈번하게 전압안정한계치 부근에서 운전됨에 따라 전력계통에서 전압붕괴와 같은 전압안정도 문제가 가장 중요하고 긴급한 문제중의 하나로 평가되고 있다. 따라서 최근에 이와 같은 전압안정도문제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[4,5,6]

본 연구에서는 전압붕괴현상을 사전에 예방하기 위한 무효전력원 확보를 위하여 전압안정도여유를 고려하는 무효전력원 배분계획 앨고리즘을 제안한다. 여기서는 Fuzzy LP 를 사용하여 무효전력원 배분계획문제를 정식화하였기 때문에 계획입안자의 경험과 의사에 따라 멤버쉽함수를 구성하는 것에 의해 계통전압 및 전압안정도여유를 만족하면서 상호경합하는 성질을 지닌 목적함수, 즉 유효전력손실과 무효전력원 신설량에 의하여 계획입안자가 원하는 타협해를 얻을 수 있도록 하였다.

본 논문에서 제시한 앨고리즘을 IEEE-30 모선 모델계통에 적용하여 그 유효성을 증명하였다.

2. 전압안정도여유를 고려한 무효전력원 배분계획

2.1 전압안정도여유를 고려한 무효전력원 배분계획의 정식화

전압안정도여유 SM 은 그림 2.1 로부터 다음 식 (2-1) 과 같이 정의된다.

$$SM = P_T^L - P_T^o \qquad (2\text{-}1)$$

단, P_T^L : 전압안정한계점에서의 총수요
P_T^o : 현재상태에서의 총수요

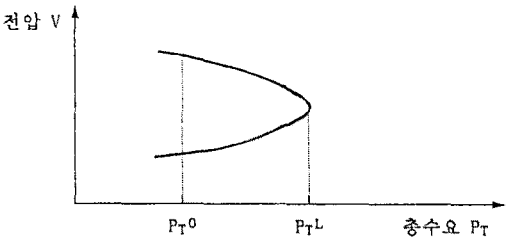

그림 2.1 총수요(PT)-전압(V)곡선

지금, 예상되는 운전조건에 대해 식 (2-1) 로 정의되는 전압안정도여유를 전압붕괴의 예방을 위해 요구되는 양 SM^{SP} 이상으로 확보하기 위해서는, 다음 식 (2-2) 의 제약조건식을 무효전력원 배분계획문제에 고려해야 한다.

$$|P_T^L - P_T^o| \geq |SM^{SP}| \qquad (2\text{-}2)$$

단, SM^{SP} : 전압안정도여유의 최소허용치

위의 식 (2-2) 에서 $P_T^L(\theta^L, V^L, t^L)$ 을 Taylor 전개한 다음 2차항 이하를 무시하면, 식 (2-2) 는 다음 식 (2-3) 과 같은 선형제약조건식으로 정식화된다.

$$\begin{bmatrix} a\theta & a_{VL} & a_{VG} & a_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta^L \\ \Delta V_L^L \\ \Delta V_G^L \\ \Delta t^L \end{bmatrix} \leq SM^{SP} + P_T^o - P_T^{Lo} \qquad (2\text{-}3)$$

이제 무효전력원 배분계획문제는 다음 식 (2-4) 와 같이 전압안정도여유를 고려한 무효전력원 배분계획문제로 정식화된다. (참고문헌 [7] 참조)

max λ

subject to

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_s}{\partial \theta} & \frac{\partial P_s}{\partial V_L} & \frac{\partial P_s}{\partial V_G} & \frac{\partial P_s}{\partial t} & 0 & d_{s1} \\ 0 & & 0 & & 1 & d_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V_L \\ \Delta V_G \\ \Delta t \\ \Delta Q_{CN} \\ \lambda \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} z_{s1}+d_{s1} \\ z_{s2}+d_{s2} \end{bmatrix} \quad (2\text{-}4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P^m \\ 0 \\ \Delta Q_{CE}{}^m \\ \Delta Q_C{}^m \\ \Delta Q_L{}^{Lm} \\ \Delta Q_{CE}{}^{Lm} \\ \Delta\theta^m \\ \Delta V_L{}^m \\ \Delta V_G{}^m \\ \Delta t^m \\ \Delta Q_{CN}{}^m \\ \Delta\theta^{Lm} \\ \Delta V_L{}^{Lm} \\ \Delta V_G{}^{Lm} \\ \Delta t^{Lm} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V_L} & \frac{\partial P}{\partial V_G} & \frac{\partial P}{\partial t} & 0 \\ \frac{\partial Q_L}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_L}{\partial V_L} & \frac{\partial Q_L}{\partial V_G} & \frac{\partial Q_L}{\partial t} & 0 \\ \frac{\partial Q_L}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_L}{\partial V_L} & \frac{\partial Q_L}{\partial V_G} & \frac{\partial Q_L}{\partial t} & -1 \\ \frac{\partial Q_G}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_G}{\partial V_L} & \frac{\partial Q_G}{\partial V_G} & \frac{\partial Q_G}{\partial t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & & 0 & -1 \\ I & & & & 0 \\ 0 & & & & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V_L \\ \Delta V_G \\ \Delta t \\ \Delta Q_{CN} \\ \Delta\theta^L \\ \Delta V_L{}^L \\ \Delta V_G{}^L \\ \Delta t^L \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V_L} & \frac{\partial P}{\partial V_G} & \frac{\partial P}{\partial t} & 0 \\ \frac{\partial Q_L}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_L}{\partial V_L} & \frac{\partial Q_L}{\partial V_G} & \frac{\partial Q_L}{\partial t} & 0 \\ \frac{\partial Q_L}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_L}{\partial V_L} & \frac{\partial Q_L}{\partial V_G} & \frac{\partial Q_L}{\partial t} & -I \\ \frac{\partial Q_G}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_G}{\partial V_L} & \frac{\partial Q_G}{\partial V_G} & \frac{\partial Q_G}{\partial t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & & 0 & -I \\ I & & & & 0 \\ 0 & & & & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V_L \\ \Delta V_G \\ \Delta t \\ \Delta Q_{CN} \\ \Delta\theta^L \\ \Delta V_L{}^L \\ \Delta V_G{}^L \\ \Delta t^L \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta P^M \\ 0 \\ \Delta Q_{CE}{}^N \\ \Delta Q_C{}^N \\ \Delta Q_L{}^{LM} \\ \Delta Q_{CE}{}^{LM} \\ SM^{SP}+P_{T^0}-P_{T^{L0}} \\ \Delta\theta^M \\ \Delta V_L{}^M \\ \Delta V_G{}^M \\ \Delta t^M \\ \Delta Q_{CN}{}^M \\ \Delta\theta^{LM} \\ \Delta V_L{}^{LM} \\ \Delta V_G{}^{LM} \\ \Delta t^{LM} \end{bmatrix}$$

결국, 계통전압의 지정된 제한치내로의 유지와 전압붕괴를 예방하기위하여 필요한 무효전력원의 확보는 위의 식 (2-4) 를 통하여 가능하게 된다.

2.2 상정사고의 고려

상정사고를 고려한 무효전력원 배분계획 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1. 기준상태와 상정사고 자료를 읽어라.

단계 2. 단계 1 의 모든 경우에 대하여 계통전압과 전압안정도여유 SM 을 평가하라.

단계 3. 모든 경우에 대하여 계통전압과 전압안정도여유 SM 이 규정된 범위에 있는지를 검사하라. 계통전압과 전압안정도여유 SM 이 규정된 범위에 있으면 결과를 출력하고 그렇지 않으면 단계 4 를 곧 수행하라.

단계 4. 전압안정도여유 SM 에 기초하여 가장 심각한 상정사고 경우를 선택하라. 여기서, 가장 심각한 상정사고경우는 가장 작은 SM 값을 갖는 경우이다.

단계 5. 단계 4 에서 선택한 가장 심각한 상정사고경우에 대하여 무효전력원 배분계획을 수립하라.

3. 사례연구

본 연구에서 제시한 알고리즘을 IEEE-30 모선 모델계통에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

3.1 전압안정도 여유를 고려한 퍼지 협조해

표 3.1 은 전압안정도 여유의 최소허용치 SM^{SP} 를 1.7 [p.u] 으로 지정하고 계산한 퍼지협조해를 보여주고 있다.

표 3.1 전압안정도 여유를 고려한 경우에 대한 퍼지 협조해 (p.u)

사 례	Case A	Case A-1	Case A-2	Case A-3	Case A-4	Case A-5
모 선	전압크기	전압크기	전압크기	전압크기	전압크기	전압크기
1	0.9903	0.9876	0.9817	0.9753	0.9683	0.9607
2	1.0068	1.0059	1.0040	1.0019	0.9996	0.9971
3	1.0486	1.0486	1.0486	1.0485	1.0484	1.0484
4	1.0315	1.0315	1.0314	1.0314	1.0313	1.0312
5	0.9866	0.9856	0.9836	0.9814	0.9790	0.9764
6	1.0194	1.0194	1.0194	1.0194	1.0194	1.0194
7	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294
8	1.0429	1.0416	1.0390	1.0362	1.0331	1.0298
9	1.0489	1.0483	1.0479	1.0474	1.0470	1.0467
10	1.0096	1.0095	1.0093	1.0090	1.0088	1.0085
11	1.0073	1.0072	1.0070	1.0067	1.0064	1.0062
12	1.0326	1.0327	1.0327	1.0328	1.0329	1.0330
13	1.0064	1.0044	1.0002	0.9957	0.9907	0.9852
14	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9989	0.9989
15	0.9901	0.9900	0.9899	0.9898	0.9897	0.9896
16	1.0068	1.0068	1.0067	1.0067	1.0066	1.0065
17	0.9966	0.9965	0.9963	0.9962	0.9959	0.9957
18	0.9685	0.9684	0.9683	0.9681	0.9679	0.9677
19	0.9631	0.9630	0.9628	0.9626	0.9624	0.9622
20	0.9728	0.9727	0.9725	0.9723	0.9721	0.9718
21	0.9824	0.9822	0.9819	0.9815	0.9811	0.9807
22	0.9841	0.9839	0.9835	0.9832	0.9827	0.9823
23	0.9703	0.9701	0.9697	0.9693	0.9688	0.9683
24	0.9634	0.9631	0.9623	0.9615	0.9606	0.9595
25	1.1000	1.1000	1.1000	1.1000	1.1000	1.1000
26	1.0888	1.0888	1.0888	1.0889	1.0889	1.0889
27	1.0303	1.0304	1.0306	1.0309	1.0312	1.0315
28	1.0669	1.0669	1.0669	1.0669	1.0669	1.0669
29	1.0901	1.0901	1.0903	1.0904	1.0906	1.0908
30	1.1331	1.1331	1.1331	1.1331	1.1331	1.1331
유효전력손실	0.3072	0.3073	0.3076	0.3080	0.3084	0.3089
무효전력원 신설량	0.0378	0.0364	0.0333	0.0299	0.0262	0.0221
전압안정도여유	1.8570	1.8457	1.8213	1.7942	1.7642	1.7306

단, Case A : 전압안정도여유를 고려한 경우에 대한 퍼지협조해

이 표 3.1 의 Case A 에서 보듯이 전압안정도 여유를 고려하여 무효전력원 배분계획을 실시하게 되면 계통전압 뿐만 아니라 전압안정도여유에 있어서도 지정된 허용치를 만족하는 퍼지협조해가 구해진다는 것을 알 수 있다.

다음에, 표 3.1 의 Case A-1 ~ Case A-5 는 계획입안자의 경험과 의사에 기초하여 무효전력원 신설량에 우선순위를 둔 계획을 수립하기위하여, 그림 3.1과 같이 무효전력원 신설량에 대한 최저만족도 수준을 허용변동폭을 기준으로 하여 10%, 30%, 50%, 70%, 90% 로 증가시켜서 퍼지협조해를 구한 결과를 나타낸다. 이 Case A-1 ~ Case A-5 로부터 알 수 있듯이 무효전력원 신설량에 대한 최저만족도 수준이 증가되면, 유효전력손실은 증가하고 전압안정도여유는 감소하는 반면 무효전력원 신설량이 감소하는 타협해가 얻어진다는 것을 알 수 있다.

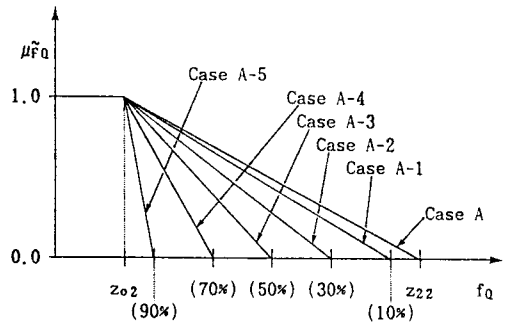

그림 3.1 무효전력원 신설량에 대한 최저 만족도 수준의 변경

여기서, 무효전력원 신설량에 대한 최저만족도수준이 증가함에 따라 전압안정도여유는 감소하지만 이때에도 전압안정도 여유 및 계통전압이 지정된 허용치를 만족하는 타협해가 얻어짐을 알 수 있다. 따라서 이들 결과로부터 전압안정도 여유 SM 을 만족하면서 계획입안자가 원하는 타협해를 계획입안자의 경험과 의사에 따라서 Membership 함수를 변경시켜 주는 것에 의해 융통성있게 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.2 전압안정도 여유 및 상정사고를 고려한 경우에 대한 퍼지 협조해

무효전력원 배분계획문제에 상정사고를 고려하기 위하여 본 연구에서는 5가지의 선로상정사고를 선택하였다. 그리고 전압안정도여유의 최소허용치 SM^{SP} 를 1.7 [p.u] 로 지정하였다.

표 3.2 는 상정사고 선로번호 및 각 상정사고에 대하여 계산되어진 전압안정도여유 SM 을 보여주고 있다. 표 3.2 에서 모든 계통상태의 SM 이 지정된 SM^{SP} 보다 더 작다는 것을 알 수 있고, 이때 무효전력원 배분계획은 전압안정도여유면에서 가장 가혹한 계통상태 E 에 대해서 실시되어진다.

표 3.3 은 가장 가혹한 계통상태 E 에 대하여 무효전력원 배분계획을 실시했을 때의 퍼지협조해를 보여주고 있다. 이 표 3.3 을 통하여 알 수 있듯이 계통전압크기 및 전압안정도 여유 SM 은 지정된 제한치를 만족한다는 것을 알 수 있다.

표 3.3 계통상태 E 에 대한 퍼지협조해 (p.u)

모 선	전압크기
1	0.9871
2	1.0059
3	1.0486
4	1.0315
5	0.9860
6	1.0193
7	1.0292
8	1.0393
9	1.0499
10	1.0108
11	1.0000
12	1.0331
13	1.0029
14	0.9998
15	0.9911
16	1.0076
17	0.9976
18	0.9696
19	0.9642
20	0.9739
21	0.9839
22	0.9857
23	0.9721
24	0.9664
25	1.1000
26	1.0885
27	1.0349
28	1.0670
29	1.0902
30	1.1331
유효전력손실	0.3078
무효전력원 신설량 합계	0.0474
전압안정도여유 SM	1.7950

표 3.2 선로 상정사고에 대한 전압안정도 여유 (p.u)

계통상태	상정사고 선로번호	전압안정도여유 SM
(기준상태부하)A	-----	0.90102
B	16 - 17	0.85740
C	4 - 6	0.88084
D	18 - 19	0.88862
E	27 - 11	0.77066

4. 결론

본 연구에서는 전압붕괴현상을 사전에 예방하기 위한 무효전력원 확보를 위하여 전압안정도여유를 고려하는 무효전력원 배분계획 앨고리즘을 제안한다. 이하 중요한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 무효전력원 배분계획문제에 전압안정도여유를 고려함으로써 계통전압 뿐만 아니라 전압안정도여유에 있어서도 지정된 허용치를 만족하는 무효전력원 배분계획을 수립할 수 있었다.

(2) fuzzy LP 를 적용하여 무효전력원 배분계획문제를 정식화함으로써, 계통전압 및 전압안정도여유를 만족하면서 상호경합하는 성질을 지닌 목적함수, 즉 유효전력손실과 무효전력원 신설량에 대하여 계획입안자가 원하는 타협해를 융통성있게 얻을 수 있었다.

(3) 예상되는 상정사고에 대해서도 전압안정도여유를 확보할 수 있는 무효전력원 배분계획을 수립할 수 있었다.

참고 문헌

[1] R. M. Maliszewiski, L. L. Garver, A. J. Wood, "Linear Programming as an Aid in Planning Kilovar Requirements", IEEE Trans., PAS-87, PP.1963-1968, Dec, 1968.

[2] K. R. C. Mamandur and R. D. Chenoweth, "Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization." IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, PP.3185-3194, July, 1981.

[3] Kenji Iba, et al, "Practical Reactive Power Allocation / Operation Planning Using Successive Linear Programming.", IEEE Transactions on Power Systems, vol.3, No.2, PP.556-566, May, 1988.

[4] Akihiko Yokoyama, Yasuji Sekine, "A Static Voltage Stability Index based on Multiple Load Flow Solutions", Engineering Foundation Conferences, 1988.

[5] O. O. Obadina, et al, "Var Planning for Power System Security", IEEE Transactions on Power Systems, vol.4, No.2, PP.667-686, May, 1989.

[6] Ferando. I. Alvarada, Tay Ho Jung , "Direct Defection of Voltage Collapse Conditions", Engineering Foundation Conferences, 1988.

[7] 송 길영, 이 희영, 최 상규, 남궁 재용, "퍼지선형계획법을 적용한 최적무효전력원 배분계획에 관한 연구" , 추계종합학술대회 논문집, pp. 23-26, 1992.