

최적화 기법을 응용한 전압기준 설정

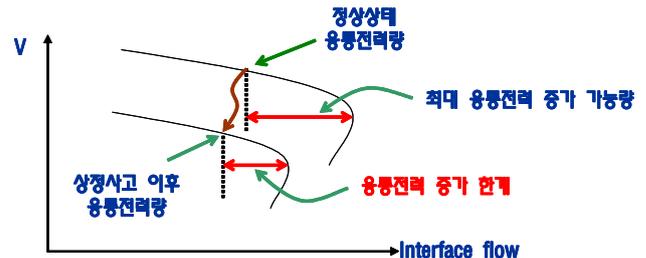
김재원*, 김태균*, 이병준*, 정응수**, 조종만**
고려대학교*, 한국 전력거래소**

Voltage Operating Guidelines By Using Optimal Power Flow

*Jaewon Kim, *Taegyun Kim, *Byongjun Lee, **Eungsoo Jung, **Jongman Cho
*Korea University, **KPX

Abstract - 본 논문은 경제성 및 안정성을 유지하는 최적의 전압유지 범위 설정을 위해 다양한 목적함수를 최적조류계산에 이용하였다. 경제성을 위해 용통전력 최대화와 유효전력 손실최소화를 목적함수로 하였고 안정성을 위해 무효전력예비력 최대화를 목적함수로 하였다. 또한 경제성과 안정성을 모두 반영하기 위해 다목적 함수를 구성하였다. 최적화 기법을 실제계에 적용하였을 때 목적함수를 얼마나 잘 만족시킬 수 있는지 각종 지표를 통해 살펴보았다. 그리고 모니터링 모션의 전압 변동 추이를 살펴보고 이를 통해 경제성 및 안정성을 유지하는 최적의 전압 유지 범위설정을 하는데 활용할 수 있도록 하였다.

하는 요소이기 때문에 상대적으로 변화가 적은 손실최소화에 가중치를 10으로 주었다.



<그림 1> f-V곡선(용통전력 제약)

그림1에서 나타나듯이 정상상태에서는 최대 용통전력 증가가능량은 상정사고 이후의 최대 용통전력 증가가능량보다 많다. 정상상태에서 용통전력을 제약 없이 최대로 증가시키면 상정사고 후에는 계통의 운전점을 찾지 못하여 계통이 붕괴할 수 있으므로 이를 막기 위해서는 용통전력 제약이 필요하다. 따라서 용통전력최대화가 목적함수로 포함되는 경우에는 f-V 해석을 통하여 가장 심각한 상정사고를 찾아, 용통선로에 흐를 수 있는 최대 전력증가 가능량을 계산하고 이를 용통전력 제약으로 적용하였다.

1. 서 론

무효전력은 지역마다 다른 특성을 가지며 국지적인 영향으로 인하여 체계적인 유지관리가 이루어지고 있지 않다. 반면 유효전력은 시장참여자의 이해와 직접적인 관련으로 인하여 주기적 수급계획 수립과 예비력 운영기준 등이 체계화되어 관리 되어왔다. 그런데, 최근 구미 선진국에서 빈발하는 무효전력 수급 불균형으로 인한 전압붕괴는 전압안정도 측면에서 무효전력 유지관리의 중요성을 대변해 준다. 무효전력과 관련된 큰 전압을 적절한 기준범위에서 운영한다면 향상 된 전압안정도를 보여 줄 수 있다. 그러나 현재 우리나라는 전체 계통에 동일한 전압유지 기준을 적용하고 있다. 이는 실제계의 안정 유지 필요조건을 무시한 기준으로 이 요건을 반영하는 새로운 유지기준의 마련이 요구된다. 본 논문에서는 이 새로운 전압기준을 위하여 최적조류계산을 응용하여 목적함수별로 실제계에 여러 가지 방법으로 적용해 보고 경제성 및 안정성을 유지하는 최적의 전압 유지 범위를 설정해 보았다.

2. 본 론

2.1 최적화 문제의 구성

최적조류계산을 위한 목적함수는 단일 목적함수와 단일 목적함수 두 개를 비중에 따라 합친 다목적 함수로 구성하였다.

<표 1> 목적함수에 따른 시나리오

단일 목적함수로 구성된 시나리오		
용통전력 최대화	유효전력 손실최소화	무효전력예비력 최대화
다목적함수로 구성된 시나리오		
용통전력 최대화	용통전력 최대화	
+	+	
유효전력 손실최소화	무효전력예비력 최대화	

경제성을 고려하기 위하여 용통전력 최대화, 유효전력 손실최소화를 목적함수로 구성하고, 안정성을 고려하기 위해 무효전력예비력 최대화를 목적함수로 구성하였다.

용통전력 최대화는 비산 수도권의 발전력을 줄이고 값싼 비수도권의 발전력을 늘려 수도권과 비수도를 이어주는 용통선로의 흐름을 많게 하여 경제성을 고려한 것이다. 유효전력 손실최소화는 선로의 유효전력 손실을 최소화하여 경제성을 획득하기 위한 것이다. 무효전력예비력은 발전기의 최대 무효전력 출력량에서 현재 무효전력 출력량의 차로 안정도 여유에 큰 영향을 주는 무효전력 개념을 포함시키기 위한 것이다.

안정도와 경제성 모두에서 효과를 보기위하여 단일 목적함수들을 가중치를 주면서 조합하여 다목적함수로 구성하였다. 이 때 용통전력 최대화와 손실최소화는 1:10으로 조합하였고 용통전력 최대화와 무효전력예비력 최대화는 1:1로 조합하였다. 손실보다 무효전력예비력이 더 많이 변

2.2 최적화 문제의 정식화

2.2.1 목적함수

- i) 용통전력 최대화
 $Max f$ (f=용통선로의 조류량)
- ii) 유효전력 손실최소화
 $P_{LOSS} = \sum_{i=1}^N V_i^2 G_{ij} + V_j^2 G_{ji} - 2V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)$
- iii) 무효전력예비력 최대화
 $Max Q_{reserve} = \sum (Q_{gmax} - Q_g)$
- iv) 용통전력 최대화와 손실최소화(다목적 함수)
용통전력 최대화 : 손실 최소화 = 1 : 10
- v) 용통전력 최대화와 무효전력예비력 최대화(다목적 함수)
용통전력 최대화 : 무효전력예비력 최대화 = 1 : 1

2.2.2 제약식

- i) 계통방정식
 $P_{Gi} - P_{Li} = V_i \sum_j V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$
 $Q_{Gi} - Q_{Li} = V_i \sum_j V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$
- ii) 부하모션 전압제약
 $V_{min} < V_L < V_{max}$
- iii) 발전모션 전압제약
 $V_{min} < V_G < V_{max}$
- iv) 유효전력 및 무효전력 출력제약
 $P_{Gmin} < P_G < P_{Gmax}$
 $Q_{Gmin} < Q_G < Q_{Gmax}$
- v) 용통전력 최대화가 목적함수에 포함된 경우 추가제약(용통선로제약)
 $f_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - V_i V_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)$

유효전력 손실최소화와 무효전력예비력 최대화가 목적함수일 경우에는 유효전력 출력제약을 슬랙변수에만 적용하였다.

3. 사례연구

본 논문에서는 2006년 철두부에서 한전계통을 이용하여 모의하였다. 최적화 기법은 내점법(Interior Point Method)을 이용하였다.

<표 2> 모니터링 모선(345kV모선)

발전단	하동, 당진, 삼천포, 영광, 보령, 울진, 태안, 서인천, 고리, 월성, 신진천, 울산
송전단	청원, 신영주, 동해, 신제천, 군산, 의령, 신옥천, 청양, 서대구, 신태백, 신서산, 아산
부하단	화성, 신성남, 의정부, 신양재, 신용인, 동서울, 성동, 양주, 영서, 신수원, 영등포, 신안성

모니터링 모선은 표2와 같이 최적화하기 전을 Base Case로 하고 목적함수에 따라 최적화를 한 후 지표들을 비교하였다. 그리고 계통의 안정도를 보기 위하여 가장 심각한 사고에 대해 유효전력 여유를 산정하였다.

1) 유효전력 최대화

6개의 유효전선로에 대해 상정사고를 내었을 때 유효전선로 최대 전력증가량은 다음과 같다.

<표 3> 유효전선로 사고에 따른 유효전선로 최대전력 증가량

유효전선로 사고	유효전선로 최대 전력증가량[MW]
신가평-신태백(765kV, 1ckt 사고)	1397.30
신안성-신서산(765kV, 1ckt 사고)	1397.30
화성-아산(345kV, 2ckt 사고)	370.56
곤지암-신제천(345kV, 2ckt 사고)	1384.53
서서울-청양(345kV, 2ckt 사고)	1072.17
신용인-신진천(345kV, 2ckt 사고)	1340.77
Pre-cntg	1397.30

표3에서 보듯이와 같이 화성-아산 유효전선로가 가장 심각한 상정사고이고 따라서 유효전선로 최대 전력증가량 제약은 370MW이다.

<표 4> 유효전력 최대화 전이후의 지표비교

지표 비교	유효 전력량[MW]	유효전력 여유[MW]
Base Case	12763.85	480
유효전력 최대화	13086.76	210

유효전력 최대화를 목적함수로 함으로써 유효전력량은 322.91MW 늘었지만 안정도 여유에 가장 큰 영향을 주는 무효전력에 대한 개념이 포함되지 않아 발전단 단자전압 및 무효전력 출력량을 재분배함으로써 안정도 마진 확보에 좋지 않은 결과를 보인다.

2) 유효전력 손실 최소화

<표 5> 유효전력 손실최소화 전이후의 지표비교

지표 비교	손실량[MW]	유효전력 여유[MW]
Base Case	884.20	480
손실 최소화	872.76	640

유효전력 손실최소화는 유효전력 분배가 끝났다는 가정하에 손실을 최소화하기 위한 무효전력 재분배 문제의 목적함수이다. 표5에서 알 수 있듯이 손실량은 11.44MW 줄었고 유효전력 여유를 160MW 증가시켰다.

3) 무효전력예비력 최대화

<표 6> 무효전력예비력 최대화 전이후의 지표비교

지표 비교	무효전력예비력[Mvar]	유효전력 여유[MW]
Base Case	17338.77	480
유효전력 최대화	17913.37	980

무효전력예비력을 목적함수로 하였을 때는 발전기의 무효전력출력 예비력을 가장 많이 확보하게 해준다. PV해석을 하면 계통의 붕괴는 무효전력의 부족 때문에 붕괴하게 되는데 발전기들이 무효전력예비력을 많이 가지고 있어 부하증가에 따라 계속 무효전력을 공급할 수 있기 때문에 유효전력 여유가 500MW 증가한 안정도가 향상된 결과를 보여준다.

4) 유효전력 최대화와 손실최소화(다목적 함수)

<표 7> 다목적 함수 최적화 전이후의 지표비교

지표 비교	유효전력량	유효전력 손실량	유효전력여유
Base Case	12763.85	884.20	480
유효, 손실	13082.68	904.05	310

손실최소화만 목적함수로 할 때 보다 손실량은 늘었으나 유효전력 여유는 늘어났다. 두 목적함수의 비중을 조절하여 유효전력 손실최소화에 비중을 더 준다면 유효전력 여유는 더 커질 것이다.

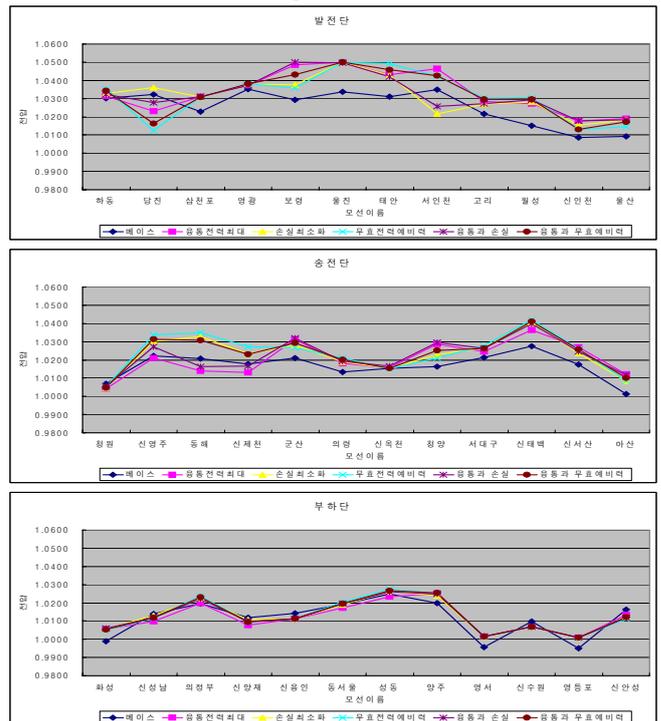
5) 유효전력 최대화와 무효전력예비력 최대화(다목적 함수)

<표 8> 다목적 함수 최적화 전이후의 지표비교

지표 비교	유효전력량	무효전력예비력	유효전력여유
Base Case	12763.85	17338.77	480
유효, 무효예비력	13070.90	17698.90	860

무효전력예비력 최대화만 목적함수로 할 때보다 무효전력예비력이 줄었고 그 결과 유효전력 여유가 줄어들었으나 유효전력량은 늘었으므로 안정성과 경제성이 모두 고려된 결과를 보인다.

최적화 후의 모니터링 모선전압(p.u)을 그래프로 표시하면 다음과 같다.



<그림 2>발전단, 송전단, 수전단의 전압 그래프

4. 결 론

본 논문에서는 최적화 기법을 이용하여 경제성이나 안정성을 고려한 목적함수를 다양하게 바꿔가며 실제계에 적용시켜 보았다. 목적함수에 따라 유효전력량을 많게 해 비싼 수도권 발전력을 이용하기 보다는 값싼 비수도권 발전력을 이용하여 경제적 이득을 취할 수도 있고 무효전력예비력을 최대화해 안정도를 높일 수도 있음을 보였다. 또한 다목적함수를 통해 경제성과 안정성을 모두 고려할 수도 있음을 보였다. 발전단, 송전단, 수전단의 전압 그래프에서 알 수 있듯이 어떤 목적함수를 하는 전체적인 전압 변화의 추이는 비슷하다. 그리고 최적화 후 전반적인 전압값들은 발전단이 높은 전압값을 보이고 다음으로 송전단이 높은 전압값들을 보인다. 마지막으로 부하단이 가장 낮은 전압값들을 보임을 알 수 있다. 이러한 결과들을 활용하여 목적에 따라 적절한 전압기준설정이 가능할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa, and R. Yokoyama, "An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.3, August 1998
 [2] Victor Hugo Quintana, Geraldo Leite Torres, "Introduction to Interior Point Methods"
 [3] Geraldo Leite Torres, Victor Hugo Quintana, "An Interior Point Method for Nonlinear Optimal Power Flow Using Voltage Rectangular Coordinates", IEEE Trans. on Power System, Vol.13, No.4, November 1998