

# EMS data 분석 및 최적화 기법을 적용한 제어지역별 목표운전전압 제안

논문
58-4-3

## Target Operation Voltage Guidelines Considering Voltage Level in Each Voltage Control area by Applying Optimization Technique Through EMS Data Observation

성웅\* · 김재원\* · 김태균\* · 이병준<sup>†</sup> · 정응수\*\* · 조종만\*\*  
(Ung Sung · Jaewon Kim · Taegyun Kim · Byongjun Lee · Eungsoo Jung · Jongman Cho)

**Abstract** - This paper presents target operation voltage guidelines of each voltage control area considering both voltage stability and economical efficiency in real power system. EMS(Energy Management System) data, Real-time simulator, shows not only voltage level but lots of information about real power system.

Also this paper performs optimal power flow calculation of three objective functions to propose the best target operation voltage. Objective function of interchange power flow maximum and active power loss minimization stand for economical efficiency index and reactive power reserve maximum objective function represents stability index. Then through simulation result using optimization technique, the most effective objective function is chosen.

To sum up, this paper divides voltage control area into twelve considering electric distance characteristics and estimate for voltage level by the passage of time of EMS peak data. And through optimization technique target operation voltage of each voltage control area is estimated and compare their result. Then it is proposed that the best scenario to keep up voltage stability and maximize economical efficiency in real power system.

**Key Words** : Voltage Level, Voltage Control Area, Optimization, Voltage Guidelines

### 1. 서론

전압과 무효전력은 지역마다 다른 특성을 가지며 이러한 영향으로 인하여 체계적인 유지관리가 어렵다. 최근 구미 선진국에서 빈번히 발생하는 무효전력 수급 불균형으로 인한 전압붕괴는 전압안정도 측면에서 전압과 무효전력의 유지관리의 중요성을 대변해준다. 현재 전력계통은 지속적인 부하의 증가에 따라 중부하 상태로 운영되고 있고 송전선의 장거리화 등에 따라 유효전력에 비해 훨씬 손실이 큰 무효전력손실의 증가가 갈수록 증대되고 있는 실정이다. 이러한 이유로 대형 정전사고 발생이 일어날 수 있기 때문에 이에 대한 대비가 요구된다.

전압과 무효전력은 밀접한 연관성을 가지므로 모선전압의 운전을 각 제어 지역에 따라 적절하게 운전한다면 향상된 전압안정도를 확보하며 계통을 안정하게 운영할 수 있다. 그러나 만약 이러한 특성을 고려하지 않고 전체 계통에 동일한 전압기준을 적용한다면 각 제어지역의 전압과 무효전력의 특성을 반영하지 않은 결과가 되어 계통의 안정성을 유지할 수 없을 뿐만 아니라 전력손실이 많이 발생해 비효율적이며 이로 인해 전압유지기준을 준수하기 위한 투자 및 운용비용이 증가하는 결과를 가져오게 된다. 그러므로 이를 위한 모선 전압 위주의 무효전력 수급계획 수립과 제어지역별 적정 공급능력 결정방법과 기준을 체계화하여 계통을 운

영하는 방안이 필요하다. 이는 프랑스 및 이탈리아에서 지역구분을 통한 전압제어를 수행하고 있는 것과 같은 목적이라 할 수 있다.[1],[2] 이를 위하여 각 제어지역을 대상으로 목표운전전압을 선정하고 운전한다면 전압안정도 측면뿐만 아니라 경제성 측면에서도 크게 향상될 수 있다. 다시 말해서 전체 계통에 동일한 전압유지 기준을 적용하는 것이 아니라 지역별 무효전력 특성에 따른 전압 특성을 분석하여 이를 기본으로 계통운영기준을 수립하여 적용한다면 우선 무효전력 설비의 투자 절감과 무효전력 수급 불균형으로 인한 전압붕괴 사고 예방이 가능하며 무효전력 손실의 절감 및 송전용량의 증대도 가능하다.

본 논문에서는 계통을 동일한 전압기준을 적용하는 기존의 방식을 벗어나 새로운 전압기준 선정을 위해 전기적 거리 방법을 이용해 전체 계통을 전압수준이 비슷한 각 제어지역으로 나누고 제어지역별 전압 및 무효전력 특성에 따른 전압관리 기준수립방향을 제시한 후 여러 가지 목적함수를 갖는 최적조류계산을 계통에 검증해보고 그 중에서 계통의 안정성을 유지하면서 경제성을 가장 최대화할 수 있는 방법을 적용하여 각 제어지역별 목표운전전압을 제시한다.

### 2. 본론

#### 2.1 최적화 문제의 구성

##### 표 1 목적함수의 구성

Table 1 Objective function construction

목적함수의 구성		
유효전력 최대화	유효전력 손실최소화	무효전력 예비력 최대화

<sup>†</sup> 교신저자, 정희원 : 고려대학교 전기공학과 교수  
E-mail : leeb@korea.ac.kr

\* 정희원 : 고려대학교 전기공학과

\*\* 정희원 : 한국전력거래소

접수일자 : 2008년 11월 6일

최종완료 : 2009년 2월 11일

표 1에서 나타낸 것과 같이 경제성을 고려하기 위해 유통전력 최대화와 유효전력 손실최소화를 목적함수로 구성하였고, 안정성 측면에서는 무효전력예비력 최대화를 목적함수로 구성하였다. 유통전력 최대화는 비용이 많이 드는 수도권의 발전력을 줄이고 보다 저렴한 비수도권의 발전력을 늘려 수도권과 비수도를 이어주는 유통선로의 흐름을 많게 하고, 유효전력 손실최소화는 선로의 유효전력 손실을 최소화하여 경제성을 고려한 것이다. 반면에 무효전력 예비력 최대화는 발전기의 최대 무효전력 출력량에서 현재 무효전력 출력량의 차이를 산정해 안정도 여유에 큰 영향을 주는 무효전력 개념을 포함시키기 위한 것이다.[3]

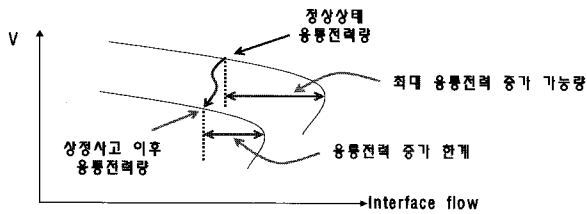


그림 1 유통한계 제약 적용  
Fig. 1 Interface flow constraints

그림 1에서 나타나듯이 정상상태에서 최대 유통전력 증가 가능량은 상정사고 이후의 최대 유통전력 증가 가능량 보다 많다. 정상상태에서 유통전력을 제약 없이 최대로 증가시키면 상정사고 이후에 계통의 운전점을 찾지 못하여 계통이 붕괴하는 현상이 발생할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해서는 유통전력 제약이 필요하게 된다. 따라서 유통전력최대화가 목적함수로 포함되는 경우에는 f-V 해석을 통하여 가장 심각한 상정사고를 찾은 후 유통선로에 흐를 수 있는 최대 전력증가 가능량을 계산하고 이를 유통전력 제약으로 적용하였다. 목적함수와 제약식은 아래와 같다.[4],[5]

2.1.1 목적함수

i) 유통전력 최대화

$$Max f \quad (f=\text{유통선로의 조류량}) \quad (1)$$

ii) 유효전력 손실최소화

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^N V_i^2 G_{ij} + V_j^2 G_{ij} - 2V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (2)$$

iii) 무효전력예비력 최대화

$$Max Q_{reserve} = \sum (Q_{gmax} - Q_g) \quad (3)$$

2.1.2 제약식

i) 계통방정식

$$P_{Gi} - P_{Li} = V_i \sum_j V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} = V_i \sum_j V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

ii) 부하모선 전압제약

$$V_{min} < V_L < V_{max} \quad (5)$$

iii) 발전모선 전압제약

$$V_{min} < V_G < V_{max} \quad (6)$$

iv) 유효전력 및 무효전력 출력제약

$$P_{Gmin}^{slack} < P_G^{slack} < P_{Gmax}^{slack} \quad (7)$$

$$Q_{Gmin} < Q_G < Q_{Gmax}$$

v) 유통선로제약

$$f_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - V_i V_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (8)$$

유효전력 손실최소화와 무효전력예비력 최대화가 목적함수일 경우에는 유효전력 출력제약을 슬랙모션에만 적용하였다.

2.2 비선형 내점법의 적용

정식화를 통하여 구성된 최적화 문제는 주·쌍대 비선형 내점법[6],[7]에 의하여 해를 탐색한다. 비선형 내점법은 슬랙 변수를 도입해 부등식 제약을 등식 제약으로 변환하고 대수 Barrier법을 사용해서 슬랙 변수가 음의 값을 갖지 않도록 정식화함으로써 뉴턴법에서 문제가 되었던 부등식 제약을 효율적으로 다룰 수 있다는 특징이 있다. 비선형 내점법은 크게 세 가지로 구성되는데 부등호 제약을 가진 최적화 문제를 풀기 위한 barrier 방법, 등호 제약을 가진 최적화 문제를 풀기 위한 라그랑지 방법, 비선형 방정식을 풀기 위한 뉴턴 방법으로 구성된다. 먼저 Barrier 방법으로 최적화문제를 재구성한 식은 다음과 같다.

$$\min f(x) \quad (9)$$

$$s.t. \quad g(x) = 0$$

$$h(x) - h^{min} - l = 0$$

$$h(x) - h^{max} + u = 0$$

$$(l, u) \geq 0$$

다음 단계로 위 수식을 통해 라그랑지 함수를 구성하면 다음과 같다.

$$L(x, l, u, \lambda, z, w) = f(x) - \mu \sum \ln l - \mu \sum \ln u - \lambda^T G(x) - z^T (H(x) - h^{min} - l) - w^T (H(x) - h^{max} + u) \quad (10)$$

위의 라그랑지 함수에 대해 KKT 조건으로 표현되는 수식을 축약 방정식으로 수정한다. 여기서, 수정된 수정방정식 [1]은 상태변수 및 제어변수와 등호제약에 대한 라그랑지 승수로 표현되고 이 식을 뉴턴법을 통해 해를 찾는다. 주·쌍대 비선형 내점법의 알고리즘은 아래와 같다.

Step1 : 초기치 설정

- 주·쌍대 변수와 라그랑지 승수가 실행가능영역에서 시작되도록 초기치를 결정하고 중심 파라미터인  $\sigma \in (0, 1)$ 도 결정한다.

Step2 : 상보값 계산

- 아래 식과 같이 모든 부등식 제약으로부터 유도된 상보값을 계산한다.

$$C_{gap} = \sum_{i=1}^r (l_i z_i - u_i w_i) \quad (11)$$

Step3 : 수렴 여부 판정

- 수렴 여부 판정은 조류방정식의 최대오차와 상보값이 수렴 한계치로 들어오면 종료하고 아니면 다음 단계로 진행한다.

Step4: 배리어 파라미터( $\mu$ ) 계산

- 부등식 제약을 효과적으로 다루기 위해 도입한 배리어 파라미터는 아래와 같은 식으로 계산한다.

$$\mu = \sigma \frac{C_{gap}}{2r} \quad (12)$$

Step5 : 수정방정식의 해를 계산

- 축약된 수정방정식을 계산하고 주변수와 등식 제약의 라그랑지 승수의 수정량을 구하고 이 값을 통해 쌍대 변수와 부등식 제약에 관한 라그랑지 승수의 수정량을 구한다.

Step6 : 최대스텝 길이의 계산

- Step5에서 구한 각 변수의 수정량에 적용될 최대스텝 길이를 구하기 위해 ratio test를 수행한다.

$$step_p = 0.9995 \min \left[ \min \left( \frac{-l}{\Delta l} : \Delta l < 0, \frac{-u}{\Delta u} : \Delta u < 0 \right), 1 \right] \quad (13)$$

$$step_D = 0.9995 \min \left[ \min \left( \frac{-z}{\Delta z} : \Delta z < 0, \frac{-w}{\Delta w} : \Delta w > 0 \right), 1 \right] \quad (14)$$

Step7 : 변수의 수정

- 주·쌍대 변수의 수정량을 다음과 같이 계산하고 이 값을 Step2로 돌아가 수렴할 때까지 반복한다.

$$(x, l, u)_{k+1}^T = (x, l, u)_k^T + step_p (\Delta x, \Delta l, \Delta u)^T \quad (15)$$

$$(\lambda, z, w)_{k+1}^T = (\lambda, z, w)_k^T + step_D (\Delta \lambda, \Delta z, \Delta w)^T \quad (16)$$

### 2.3 지역 구분 방법 및 목표운전전압 설정 과정

전체 계통을 전기적 거리를 이용하여 각 지역별로 전압특성이 유사하면서 지역별 계통 특성이 반영된 소규모 지역으로 구분하고 지역별로 운전전압을 설정하기 위해서는 우선 계통을 적절히 구분하여 관리하는 것이 필요하다.[1]

전기적 거리란 'Information 이론의 관점에서 두 모선 사이가 얼마나 전기적으로 떨어져 있는지, 즉 상호 전압 결함

성이 있느냐'를 나타낸다. 일반적으로 우리가 알고 있는 임피던스와 그 개념이 유사하다. 전기적 거리에 의한 지역분할은 전력조류 방정식에서 전압안정도 관점에서는 전압과 무효전력의 상관관계가 보다 더 중요하다는 점에서 시작한다.[2] 모선 간의 전기적 거리를 구하고 어떤 값을 기준으로 전기적 거리가 가까운 모선들끼리 하나의 지역으로 묶어서 계통을 분할하면 제어지역을 구분할 수 있다. 전기적 거리에 의한 지역분할이 되었을 때 전압제어지역 내에서 다른 모선과의 전기적 거리의 합이 가장 작은 모선을 대표모선(Pilot bus)으로 선정한다. 전기적 거리에 의해 지역을 분할하는 과정은 아래 과정과 같다.

Step1 : 일반적인 전력 조류 방정식을 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (17)$$

Step2 : 전압과 무효전력의 식을 분해해서 표현한 후 전압에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$[\Delta Q] = \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] [\Delta V] \quad (18)$$

$$[\Delta V] = \left[ \frac{\partial V}{\partial Q} \right] [\Delta Q] \quad (19)$$

Step3 :  $[\partial Q / \partial V]$ 는 전력조류 계산의 jacobian 행렬이고  $[\partial V / \partial Q]$ 는  $[\partial Q / \partial V]$ 의 역행렬로 감도행렬(sensitivity matrix)이다. 그러면 계통에서 어떤 i 모선과 j 모선 사이의 전압의 연관성에 대해 고려해 보면 j 모선전압의 미소변화에 따른 i 모선 전압의 미소변화를  $\alpha_{ij}$ 라는 승수로 표현할 수 있다고 하면  $\Delta V_i = \alpha_{ij} \Delta V_j$  로 표현된다.

Step4 : 이 식을 전압에 대해 정리하면  $\alpha_{ij} = \frac{(\partial V_i / \partial Q_j)}{(\partial V_j / \partial Q_j)}$  로 표현할 수 있고 일반적으로  $\alpha_{ij}$ 는  $\alpha_{ji}$ 와 같지 않다. 그러나 대칭적(symmetric)인 특성을 유지하기 위하여 다음과 같은 식으로 전기적 거리를 정의한다.

$$D_{ij} = D_{ji} = -\log(\alpha_{ij} \cdot \alpha_{ji}) \quad (20)$$

Step5 : 위에 정의된 전기적 거리를 이용하여 계통이 N 개의 발전기를 포함하고 있다고 했을 때, 이를 N 개의 계층으로 먼저 분류한다.

Step6 : 전기적 거리를 이용하여 가장 가까운 두 계층을 구하고 이 두 계층을 새로운 하나의 계층(Virtual bus)으로 다시 정의한다.

Step7 : 새롭게 정의한 계층과 다른 계층과의 거리를 계산하여 가장 가까운 계층을 구하고 이를 또 다른 새로운 계층으로 정의한다. 이 때 앞의 가장 가까운 두 계층과의 연결성보다는 낮은 수준의 연결성을 갖는다.

Step8 : 위 Step들을 반복하여 하나의 계층이 될 때까지 반복한다.

우리나라 계통을 전기적 거리를 이용해 지역을 나눌 때 이탈리아의 CESI를 벤치마킹하여 12개 지역으로 설정하였다. 녹색의 선은 각 제어지역을 의미하고 붉은색 깃발은 각 지역을 대표하는 Pilot모선을 나타낸다. 여기서 Pilot모선은 제어지역 안에서 지역의 전압특성을 대표할 수 있는 가장 민감한 모선을 의미한다. 전압제어지역은 그림 2와 같다.

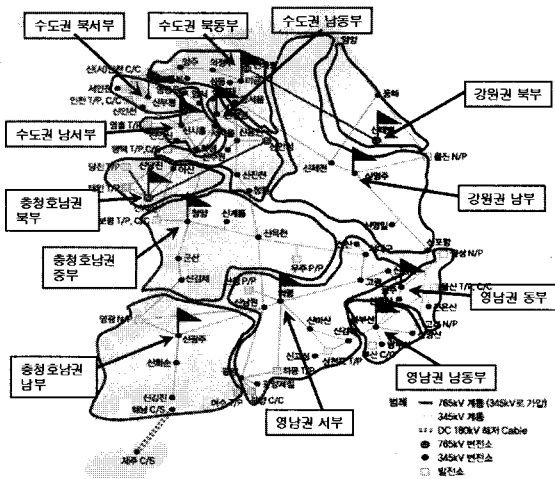


그림 2 전기적 거리에 의한 전압제어지역  
Fig. 2 Voltage control area using electrical distance

일반적으로 무효전력은 유효전력에 비해 매우 큰 손실을 가지기 때문에 지역과 지역 간의 흐름이 없는 것이 이상적이지만 각 지역마다 다른 무효전력의 흐름 또는 전압수준이 형성된다면 이러한 특성을 목표전압 설정에 반영해야 한다. EMS Peak data를 이용한 목표전압 설정과정은 다음과 같다.

- Step1 : 전기적 거리 방법을 이용해 제어지역 구분
- Step2 : 각 제어지역 내 모선 각각의 평균전압 계산
- Step3 : 각 제어지역 내 모선 각각의 평균전압을 구해 제어지역의 전체 모선 평균전압 산출
- Step4 : 제어지역 평균전압 대비 제어지역 내 모선 각각의 표준편차 계산

$$\sum_{i=1}^n \frac{(V_i - V_{ref})^2}{n} \quad (21)$$

- Step5 : 표준편차가 일정수준 이상인 모선은 평균전압 계산시 제외
- Step6 : Step5에서 선정된 모선을 제외한 나머지 모선의 평균값을 구한 후 각 제어지역 평균전압 산출
- Step7 : 유효전력 손실최소화를 목적함수로 한 최적화기법을 적용해 목표운전전압 제안

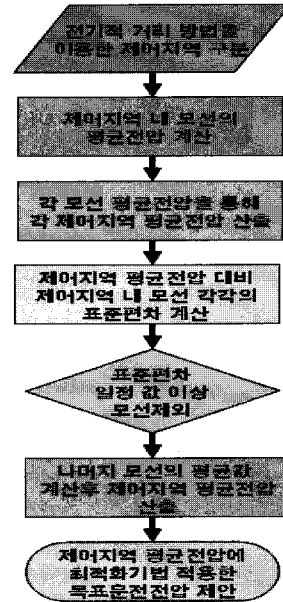


그림 3 각 제어지역별 목표운전전압 산출 과정  
Fig. 3 Flowchart for target voltage estimation of each areas

### 3. 사례 연구

#### 3.1 목적함수 선정

본 논문에서는 목표운전전압 산정을 위해 Base Case를 2007년 EMS Peak data인 8월 22일을 검토계통으로 이용하였다. 먼저 목적함수 선정을 위한 분석 TOOL은 VSAT (Voltage Stability Assessment Tool)을 사용하였고 step size는 10으로 하였다. 목적함수 선정 후 목표운전전압 선정을 위한 최적화기법은 PDIPM (Primal Dual Interior Point Method)을 사용하였다.

표 2 관찰 모선 (345kV모선)  
Table 2 Monitoring buses (345kV buses)

발전단	하동, 당진, 삼천포, 영광, 보령, 울진, 태안, 서인천, 고리, 월성, 신인천, 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 표 2와 같고 최적화 기법을 적용하기 전은 Base case로 하고 3가지 목적함수에 따른 최적화기법 적용한 결과를 비교하였다. 추가적으로 계통의 안정도를 모니터링 하기 위하여 가장 심각한 사고에 대해 유효전력 여유를 산정하였다.

#### 1) 유효전력 최대화

6개의 유효선로에 대해 상정사고를 내었을 때 유효선로 최대 전력증가량은 아래 표와 같다.

표 3 유통선로 사고에 따른 유통전력 여유량

Table 3 Interface flow margin

유통선로 사고	유통선로 최대 전력증가량[MW]
신가평-신대백(765kV, 1ckt 사고)	1403.60
신안성-신서산(765kV, 1ckt 사고)	1403.60
화성-아산(345kV, 2ckt 사고)	382.24
곤지암-신제천(345kV, 2ckt 사고)	1387.24
서서울-청양(345kV, 2ckt 사고)	1079.63
신용인-신진천(345kV, 2ckt 사고)	1342.86
Pre-contingency(Base)	1403.60

표 3에서 보이는 바와 같이 화성-아산 유통선로가 가장 심각한 상정사고 임을 확인할 수 있고 유통선로 최대 전력 증가량제약은 382MW이다.

표 4 유통전력 최대화 결과

Table 4 Interface flow maximization result

지표 비교	유통 전력량[MW]	유효전력 여유[MW]
Base Case	12833.85	480
유통전력 최대화	13096.82	230

유통전력 최대화를 목적함수로 함으로써 유통전력량은 늘었지만 안정도 여유에 가장 큰 영향을 미치는 무효전력에 대한 개념을 포함하지 않기 때문에 발전기 단자전압 및 무효전력 출력량을 재분배함으로써 안정도 마진 확보에는 좋지 않은 결과를 보인다.

2) 유효전력 손실 최소화

표 5 유효전력 손실최소화 결과

Table 5 Real power losses minimization result

지표 비교	손실량[MW]	유효전력 여유[MW]
Base Case	893.42	480
손실 최소화	871.84	720

유효전력 손실최소화는 유효전력 분배가 끝났다는 가정 하에 손실을 최소화하기 위한 무효전력 재분배 문제의 목적 함수이다. 표 5에서 알 수 있듯이 손실량은 줄고 유효전력 여유량은 증가함을 확인할 수 있다.

3) 무효전력 예비력 최대화

표 6 무효전력 예비력 최대화 결과

Table 6 Reactive power reserve maximization result

지표 비교	무효전력예비력[Mvar]	유효전력 여유[MW]
Base Case	17198.54	480
예비력 최대화	17827.35	660

무효전력 예비력은 발전기의 최대 무효전력 출력량에서 현재 무효전력 출력량의 차이로 무효전력 예비력을 목적함수로 시뮬레이션을 수행한 결과는 발전기의 무효전력출력 예비력을 가장 많이 확보하고 이를 토대로 PV해석을 하면 계

통의 붕괴는 무효전력의 부족으로 인한 현상으로 일어나게 되는데 증가한 무효전력 예비력 때문에 부하가 증가해도 어느 정도 증가된 무효전력을 공급할 수 있기 때문에 유효전력 면에서도 증가한 결과를 보여준다.

각 목적함수에 따른 발전단, 송전단, 부하단의 전압그래프는 아래와 같다.

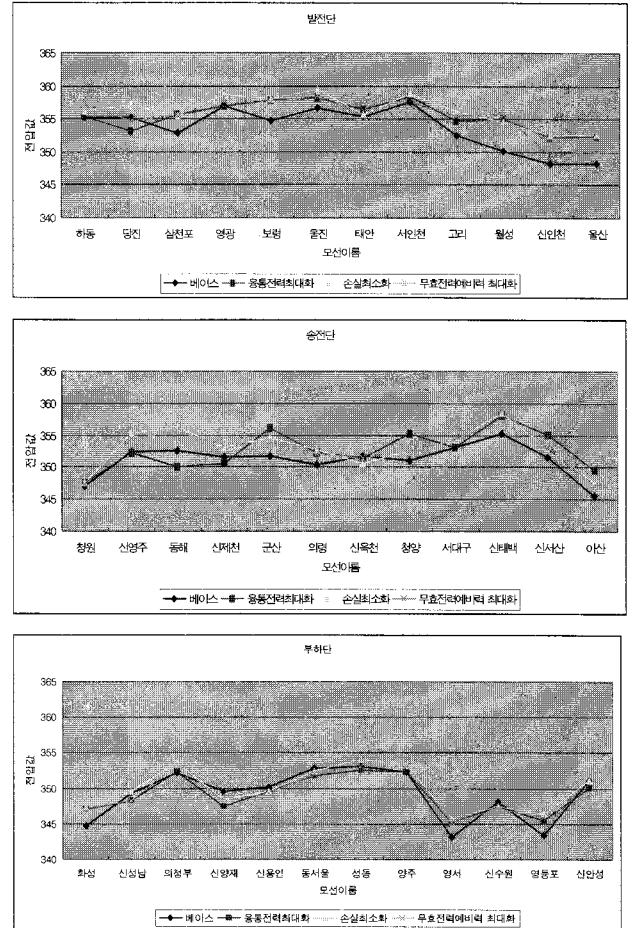


그림 4 발전단/송전단/수전단의 전압 패턴 Fig. 4 Voltage pattern of Generation/Transmission/Distribution

위 전압 그래프들로부터 발전단, 송전단, 부하단 순으로 전압수준이 높음을 관찰할 수 있다. 또한 3가지 목적함수를 적용한 결과를 비교하면 유효전력 손실최소화를 목적함수로 선택한 최적화기법이 안정성 여유 뿐만 아니라 경제성 면에서도 가장 좋은 효과를 보임을 알 수 있다.

3.2 EMS Peak data 결과 분석

시간의 흐름에 따른 12개 지역 중 대표적인 2개 지역의 전압레벨은 그림 5와 같다. X축은 시간을 나타내고 Y축은 전압 값을 나타낸다. 각 지역 내에서의 전압수준은 거의 동일한 형태의 패턴을 보이고 있다. 이러한 결과는 전압제어 지역이 지역적인 특성을 잘 반영함을 의미한다.

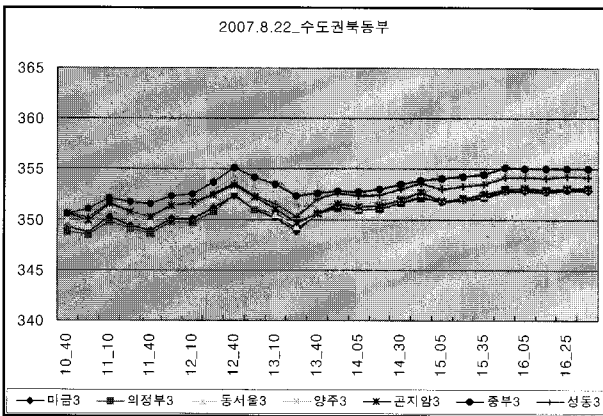
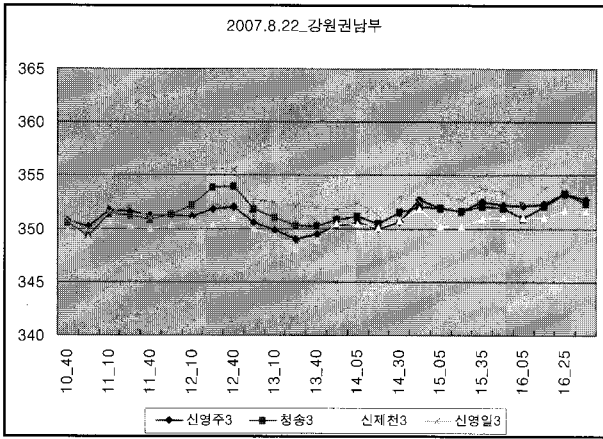


그림 5 각 제어지역별 전압 패턴

Fig. 5 Voltage pattern of each control areas

전기적 거리를 적용한 12개 제어지역의 실적 데이터의 전압 값은 표 7과 같다.

표 7 EMS Peak data 관찰 결과

Table 7 Observation result of EMS Peak data

지역	전압(kV)	지역	전압(kV)
수도권 북서부	354.76	영남권 서부	349.54
수도권 북동부	352.34	영남권 동부	351.46
수도권 남서부	352.18	영남권 남동부	358.17
수도권 남동부	352.95	충청호남권 중부	352.90
강원권 북부	344.38	충청호남권 북부	347.96
강원권 남부	351.50	충청호남권 남부	352.92

3.3 최적화 기법 적용 결과

3가지 목적함수를 선정하고 시뮬레이션을 한 후 그 결과를 비교하면 유효전력 손실최소화를 목적함수를 적용한 것이 가장 좋은 결과를 보여주기에 이것을 목적함수로 선정하였다. 부하모선의 전압제약범위는 아래와 같고 발전모선의 전압제약범위는 0.99 P.U ~ 1.01 P.U 이다.

- 765kV 부하모선 : 750kV ~ 798kV (0.98p.u~1.0431p.u)
- 345kV 부하모선 : 338kV ~ 360kV (0.98p.u~1.0434p.u)
- 154kV 부하모선 : 151kV ~ 165kV (0.98p.u~1.0700p.u)

최적화 기법을 적용한 계통의 전압운전 범위 설정에서 전압을 제어하는 변수는 조상설비 운용과 가변 변압기 탭 조정, 발전기 단자전압 제어가 있다. 본 논문에서는 발전기 단자전압과 가변 변압기 탭 조정은 과도안정도 및 심각한 상정사고를 대비하여 고려하여야 할 사항이 많고 기계적인 특성을 고려해야 하기 때문에 계통 운전자의 경험에 의해 최적상태로 운전된다고 가정하고 조상설비만을 제어변수로 설정하고 발전기 단자전압의 작은 변화만을 허용하였다. 그 결과 값은 표 8과 같다.

표 8 EMS Peak data의 최적화 기법 적용 결과

Table 8 Optimization result of EMS Peak data

지역	전압(kV)	지역	전압(kV)
수도권 북서부	358.28	영남권 서부	349.85
수도권 북동부	357.64	영남권 동부	352.14
수도권 남서부	354.13	영남권 남동부	358.95
수도권 남동부	352.95	충청호남권 중부	353.37
강원권 북부	348.18	충청호남권 북부	353.08
강원권 남부	354.77	충청호남권 남부	352.99

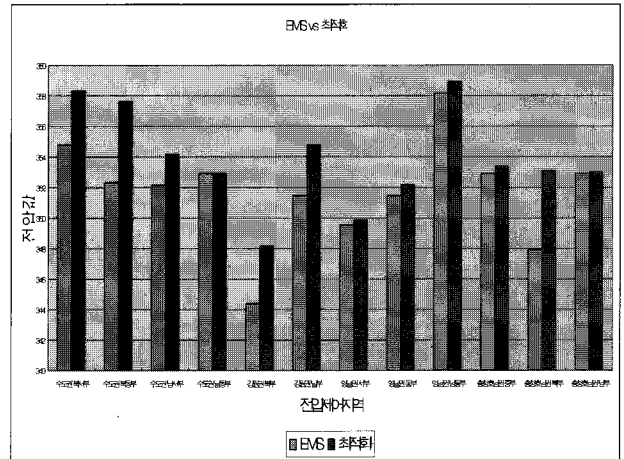


그림 6 각 제어지역별 최적화 전/후 전압비교

Fig. 6 Target voltage comparison of each control areas

그림 6은 최적화 기법의 적용 전과 후를 나타내고 그림 6을 관찰하면 최적화 전의 EMS Peak data의 전압 값보다 상승함을 알 수 있다. 그리고 각 제어지역별로 일정한 전압 값이 아니라 제어지역별로 차이가 크기 때문에 목표운전전압을 지역별로 다르게 설정하고 계통을 운전하면 경제성 면에서도 더 효율적인 결과가 기대된다는 것을 알 수 있다.

그림 7에서 x축은 시간과 분을 나타내고 y축은 유효전력 손실량을 나타낸다. 두 곡선은 최적화기법을 적용하기 전과 후의 경제적인 효과를 알아보기 위해 유효전력 손실량을 나타내었다. 최적화 전과 후를 비교해보면 전체 계통을 하나의 목표운전전압으로 운전하는 방법보다 각 제어지역을 전기적 거리를 이용해 나누고 유효전력 손실최소화를 목적함수로 한 최적화기법을 적용했을 때 손실이 약 2%적다는 것을 관찰할 수 있다.

참 고 문 헌

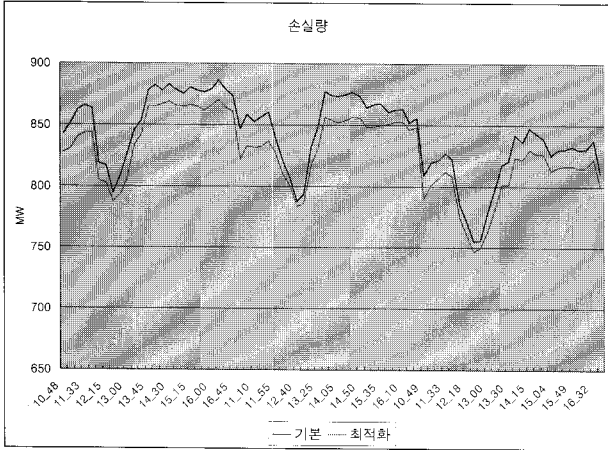


그림 7 유효전력 손실량 비교  
 Fig. 7 Real power losses comparison

4. 결 론

본 논문에서는 우리나라 계통을 동일한 전압기준을 적용하는 기존의 기준을 벗어나 전기적 거리 방법을 적용해 각 지역별로 전압특성이 유사하며 지역별 계통특성이 반영된 12개 소규모 지역으로 구분하고 각 지역별 목표운전전압을 새로운 전압관리기준 설정방법으로 제시하였다. 여기서 전기적 거리는 각 모선간의 상호 전압 결합성을 의미하는 임피던스와 유사한 개념이며 무효전력과 관련성이 큰 전압을 고려하기 때문에 적절한 방법임을 알 수 있다.

따라서 전기적 거리 특성 및 이론을 적용해 전압특성이 유사한 지역으로 지역을 구분한 후 각 지역의 전압수준을 파악하였고 실시간 데이터인 EMS Peak data를 관찰해 각 지역별로 현재 운영되고 있는 부하수준 및 전압패턴을 관찰하였다. 관찰결과 각 제어지역 내에서의 모선전압은 같은 패턴을 가지지만 또 다른 제어지역과는 전압이 같지 않음을 관찰할 수 있다. 각 모선의 평균전압을 계산한 후 편차가 크게 벗어나는 모선은 제외를 하고 각 지역의 평균전압을 계산한다. 즉, 전체계통을 하나의 전압 기준을 적용하는 것이 아니라 제어지역을 나누고 각 지역에 맞는 최적의 목표 운전전압을 가지고 운전하는 것이 경제적인 면에서 더 효과적임을 알 수 있다. 최적화 기법을 적용하기 위한 목적함수 선정을 위해 여러 가지 목적함수를 비교하였고 시뮬레이션 결과 가장 좋은 결과를 갖는 유효전력 손실최소화를 목적함수로 선정하였다. 유효전력 손실최소화는 유효전력을 최소화하면서 조상설비만을 제어변수로 한 목적함수이다. 이어서 일반적인 운전기준전압 범위를 만족하는 전압제약 내에서 각 지역별로 최적의 목표운전전압을 제시하였고 이를 활용하면 계통의 전압안정성을 유지하는 동시에 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

[1] J P. Paul, J. Y. Leost, and J. M. Teseron, "Survey of the secondary voltage control in France: Present realization and investigation", IEEE Trans. on Power System, Vol.2, No.2, May 1987, pp. 505-511

[2] Sandro Corsi, "The Secondary Voltage Regulation in Italy", Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Vol 1, On page(s) : 296-304, July 2000

[3] D. Dong, B. Chowdhury, M. Crow, and L. Acar, "Improving Voltage Stability by Reactive Power Reserve Management", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.20, No.1, Feb. 2005, pp. 338-345

[4] O. Alsac, J.Bright, M.Prais, B.Scott, "Further Developments in Lp-Based Optimal Power Flow", IEEE Trans. on Power System. Vol.5, No.3, August 1990. pp.697-711

[5] O. Alsac, B. Stott, "Optimal Power Flow with Steady-State Security", IEEE Trans. on PAS, Vol.93. May/June 1974, pp.745-751

[6] 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 System, Vol.13, No.3, August 1998

[7] Torres, Geraldo Leite, "Interior-point method for nonlinear optimal power flow using voltage rectangular coordinates", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.4, Nov, 1998

[8] "Voltage Stability / Security Assessment and On-Line Control", EPRI TR-101931 Volume 1, Project 3040-01 Final Report, April, 1993

[9] 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, 870-877, August 1998

[10] Victor Quintana, Geraldo Torres, "An Interior Point Method for Nonlinear Optimal Power Flow Using Voltage Rectangular Coordinates", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.4, 1211-1218, 1998

[11] Y.C. Wu, A. S. Debs, and R. E. Marsten, "A Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.9, No.3, August 1994

[12] 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

## 저 자 소 개



### 성웅 (成雄)

1980년 5월 9일생. 2004년 고려대 공대 전기전자전파공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업

Tel : 02-3290-3697

E-mail : aceung@korea.ac.kr



### 이병준 (李炳峻)

1961년 7월 16일생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 아이오와 주립대 전력계통 석사 졸업. 1994년 동 대학원 전력계통 박사 졸업. 현재 고려대 전기공학과 정교수.

Tel : 02-3290-3242

E-mail : leeb@korea.ac.kr



### 김재원 (金載遠)

1979년 8월 28일생. 2006년 고려대 공대 전기전자전파공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업

Tel : 02-3290-3697

E-mail : ykpw@korea.ac.kr



### 정응수 (鄭應秀)

1991년 한국전력 입사. 2001년 전력거래소 전직. 2009년 현재 전력거래소 계통운영처 근무

Tel : 02-3456-6821

E-mail : jesoo@kpx.or.kr



### 김태균 (金泰均)

1978년 5월 6일생. 2005년 고려대 공대 전기전자전파공학부 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정.

Tel : 02-3290-3697

E-mail : harlang@korea.ac.kr



### 조종만 (趙鍾萬)

1959년 7월 27일생. 1986년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1998년 경상대 대학원 전기공학과 공학석사. 2006년 한양대 대학원 전기공학과 공학박사. 1986년~2001년 한국전력공사 근무, 2001년 ~ 현재 전력거래소 부장

E-mail : jongman@kpx.or.kr