

# 유무효전력설비의 적소투입을 통한 전력손실개선

(System Loss Improvement through Proper Location of Active and Reactive Power Apparatus)

이상중

(Sang-Joong Lee)

## 요 약

본 논문은 有無效 電力設備의 投資위치와 그 용량을 적정화하여 동일한 설비투자량에 대하여 전력손실을 최소화하는 방안에 대하여 설명하였다. 유효 및 무효전력의 미소증분에 대한 손실의 변화를 나타내는 모선의 손실감도를 소개하고 전력손실을 최대한 개선하기 위한 유무효전력 설비의 투자지표로 이용하였다. 각 모선에 주어지는 투자지표의 우선순위에 따라 유효 및 무효전력설비가 투자되어 전력손실을 최소화한다.

## Abstract

This paper presents a method for improving the power loss through optimal location of active or reactive power apparatus. The paper introduces the loss sensitivities which imply the variation of the power loss with respect to the incremental bus power P,Q and uses them as the investment information for the active and reactive power apparatus. Power apparatus are invested, by the priority of loss sensitivities indices given for each bus.

## 1. 서 론

전력콘덴서, 분로리액터, SVC 등의 무효전력 설비나 발전설비를 투입하여 전압 및 전력손실을 개선하고자 할 때, 전압이 낮은 곳에 우선적으로 설비를 투입하는 것이 관례로 되어 왔다. 그러나 전력손실개선 측면에서 볼 때 전압이 낮은 모선에 투자하는 것 보다 모선의 미소전력 P,Q의 변화에 대한 전력손실감도(loss sensitivity)를 계산하여 그 지표의 크기에 따라 투자의 우선순위를 부여함이 수학적으로 타당하다. 모선손실감도를 구하고자 할 경우 기준부하상태(base case)의 전력손실을 모선전력의 함수로 변환하

고 이로부터 편미분을 구하는 B 계수법이 현재까지도 이용되고 있으나 이는 부하상태나 선로의 절속상태 등 계통의 상태가 달라지면 오차가 발생하는 결함이 있다[1]. 1974년 Happ은 chain rule 과 행렬조작기법을 이용하여 시스템의 Jacobian으로부터 손실감도를 유도하는 방법을 개발하였으며[2], 1990년 최적화기법을 적용하여 손실감도를 유도하는 방법이 소개되었다[3]. 본 논문에서는 모선의 유효 및 무효전력의 미소증분에 대한 손실의 변화를 나타내는 손실감도를 소개하고 有無效 電力設備의 投入 위치와 투입량을 최적화하여 電力損失을 최대한 개선하는 방안에 대하여 설명하였다. 사례연구를 통하여 제시된 방법이 전압이 낮은 모선에 유무효 전력설비를 우선 투자하는 경우보다 더 효과적임을 입증하였다.

정회원 : 서울산업대학교 전기과 전임강사  
접수일자 : 2000년 3월 8일

## 2. 전력손실감도

유무효전력 설비의 투입이 선로손실에 얼마나 영향을 미치는가를 평가하는 모선의 전력손실감도를 구하는 하나의 방법을 소개한다.[2] PL을 선로의 전력손실, Pj를 모선의 유효전력 설비용량이라 하면 유효전력설비의 투입용량 변화에 대한 선로손실의 변화는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_j} = \frac{\partial P_L}{\partial \theta_k} \frac{\partial \theta_k}{\partial P_j} \quad \text{단, } k=1, 2, \dots \quad (1)$$

단,  $\theta_k$  는 k 모선의 위상각이다. Qj를 모선의 무효전력 설비용량이라 하면 무효전력설비의 투입용량 변화에 대한 선로손실의 변화는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_j} = \frac{\partial Q_L}{\partial V_k} \frac{\partial V_k}{\partial Q_j} \quad \text{단, } k=1, 2, \dots \quad (2)$$

단,  $V_k$  는 k 모선의 전압이다. 식 (1),(2)를 행렬의 형태로 표시하면,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} & \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} & \frac{\partial P_L}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial P} & \frac{\partial \theta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)을 정방행렬의 역행렬로 표시하면

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} & \frac{\partial P_L}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} & \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)를 전치행렬로 표시하면

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에 나타난 정방행렬은 조류계산시 사용되는 Jacobian 행렬의 전치행렬임을 알 수 있다. 이로부터 아래의  $[\partial P_L/\partial P \ \partial P_L/\partial Q]^T$ 로 표현되는 유무효전력설비의 투입용량 변화에 대한 선로손실의 감도를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P_1} \\ \frac{\partial P_L}{\partial P_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial P_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_1} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_j} \\ \vdots \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial P_L}{\partial \theta_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial \theta_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_1} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_j} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (6)$$

단 J는 Jacobian 행렬이다.

## 3. $[\partial P_L/\partial P \ \partial P_L/\partial Q]$ 지표에 의한 유무효전력설비의 투자

$[\partial P_L/\partial P \ \partial P_L/\partial Q]$ 가 모선전력의 변화에 대한 선로손실의 변화를 나타내므로 전력손실을 최소화하기 위한 유무효전력설비의 투자지표로 활용할 수 있다. 이 값이 클수록 동일한 설비투자에 대한 전력손실의 변화가 크므로  $[\partial P_L/\partial P \ \partial P_L/\partial Q]$  지표가 가장 큰 모선이 전력손실 감소효과를 최대화시킬 수 있는 유무효 전력설비투자의 適所가 될 것이다[3,4,5].

### 3.1 유효전력 설비

$\partial P_L/\partial P_j$  지표의 우선순위에 따라 지표가 가장 큰 모선에 미소량의  $\Delta P$  [MW]의 유효전력설비를 투자하는 아래의 과정을 반복한다.

- 1) 조류계산 수행
- 2) 식 (6)에 근거하여 각 모선의  $\partial P_L/\partial P_j$  를 계산

한다.

3)  $\partial P_L / \partial P_j$  지표가 가장 높은 모선에 미소량  $\Delta P$ [MW]의 유효전력 설비를 투입한다.

4)  $\Sigma \Delta P$ 가 소정의 투자량에 달할 때 까지 1),2) 및 3)의 과정을 반복한다.

### 3.2 무효전력 설비 (전력콘덴서, 분로리액터, SVC 등)

$\partial P_L / \partial Q_j$  지표의 우선순위에 따라 지표가 가장 큰 모선에  $\Delta Q$ [Mvar]의 무효전력설비를 투자하는 아래의 과정을 반복한다.

- 1) 조류계산 수행
- 2)  $\partial P_L / \partial Q_j$  연산
- 3)  $\partial P_L / \partial Q_j$  가 가장 큰 모선에 미소량  $\Delta Q$ [Mvar]의 무효전력 설비를 투입한다.

4) 1),2) 및 3)의 과정을  $\Sigma \Delta Q$ 가 소정의 투자량에 달할 때 까지 반복한다.

## 4. 사례연구

그림 1의 5 모선 모형계통에 대한 사례연구를 수행하였다[6]. 표 1은 선로정수이며 표 2에 초기조류계산 결과와 각 모선의  $\partial P_L / \partial P_j$  및  $\partial P_L / \partial Q_j$  지표값을 도시하였다. 1,3 번 발전모선의 전압은  $V_1=1.04$  및  $V_3=1.02$ 로 일정한 것으로 가정한다. 선로손실 개선을 위하여  $1.0 + j.7$  p.u.의 유무효 전력설비를 투자하는 것으로 한다. 표 2에  $\partial P_L / \partial P_j$  및  $\partial P_L / \partial Q_j$  지표로 유무효전력 설비를 투자한 경우와, 전압이 낮은 모선에 3 장과 유사한 방법으로 유무효전력설비를 투자한 경우를 비교하였다. 부하는 정전력 부하로 가정하였고 표 2의  $INV_j$  는 j 번째 모선에 투자된 설비용량  $P_j + jQ_j$  를 의미한다.

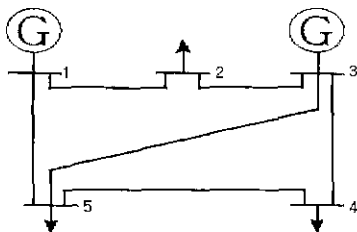


Fig 1. 5 bus system  
그림 1. 5 모선 계통

표 1. 선로정수  
Table 1. Line parameters

from	to	R	X	Charging Mvar
1	2	.042	.168	4.1
1	5	.031	.126	3.1
2	3	.031	.126	3.1
3	4	.084	.336	8.2
3	5	.053	.210	5.1
4	5	.063	.252	6.1

표 2에 나타난 바와 같이  $[\partial P_L / \partial P_j \quad \partial P_L / \partial Q_j]$  지표에 의하여 유무효전력 설비를 투자하는 것이 전압이 낮은 모선에 유무효전력 설비를 투자하는 경우보다 전력손실 개선효과가 더 우수함을 알 수 있다.

표 2. 유무효전력설비의 투자결과 비교  
Table 2. Comparison of investments

	초기 조류계산	전압정보에 의한 투자결과	손실감도에 의한 투자결과
$INV_2$	0 p.u.	.4807+j.3365	.3306+j.3684
$INV_4$	0 p.u.	.3730+j.2611	.4890+j.1940
$INV_5$	0 p.u.	.1463+j.1024	.1804+j.1376
전력손실	.09674	.02952	.02825
$V_2$	.9614	.9992	.9982
$V_4$	.9203	.9992	.9956
$V_5$	.9683	.9992	1.0013
$\partial P_L / \partial P_2$	-.0671	-.0155	-.0206
$\partial P_L / \partial Q_2$	-, -.0284	-, -.0096	-, -.0090
$\partial P_L / \partial P_4$	-.1215	-.0319	-.0206
$\partial P_L / \partial Q_4$	-, -.0489	-, -.0050	-, -.0090
$\partial P_L / \partial P_5$	-.0650	-.0246	-.0206
$\partial P_L / \partial Q_5$	-, -.0278	-, -.0096	-, -.0090
$P_1 + jQ_1$	1.697+j.701	.6295+j.4046	.6282+j.0036
$P_3 + jQ_3$	1.1 + j.703	1.1 + j.0110	1.1 + j.0183
$P_2 + jQ_2$		1.15 + j.6	
$P_4 + jQ_4$		.7 + j.3	
$P_5 + jQ_5$		.85 + j.4	

## 5. 결론

본 논문은 有無效 電力設備의 投資위치와 그 용량을 최적화하여 동일한 설비투자량에 대하여 전력손실을 최소화하는 방안에 대하여 설명하였다. 유효 및 무

효전력의 미소증분에 대한 손실의 변화를 나타내는 모선의 손실감도를 소개하고 전력손실을 최대한 개선하기 위하여 適所에 적당량의 유무효전력 설비를 투입하는 지표로 이용하였다. 각 모선에 주어지는 투자 지표의 우선순위에 따라 유효 및 무효전력설비가 투자되어 전력손실을 최소화한다. 사례연구를 통하여 제시된 방법이 전압이 낮은 모선에 유무효 전력설비를 우선 투자하는 경우보다 더 효과적임을 입증하였다. 실제통의 경우, 요일별, 월별, 계절별 및 연간에 대한 표준 부하변화 패턴을 참조하여 전력손실을 최소화하기 위한 유무효 전력설비의 최적 투자위치를 확인한 다든지, 발송배전설비 및 부하설비의 정기보수, 사고 및 기타의 문제가 발생할 경우 조류계산 결과에 의하여 이동이 가능한 유무효 전력설비의 설치위치 변경을 고려하는 정도는 가능할 것으로 사료된다. 향후 본 논문에서 제시한 알고리즘을 실제통에 적용하는 연구를 계속하고자 한다.

### 참 고 문 헌

- (1) H. H. Happ, "Optimal Power Dispatch - A Comprehensive Survey", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, vol 96, No.3, pp.841-854, May/June/1977
- (2) H. H. Happ, "Piecewise Methods and Applications to Power Systems", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1980. pp.293-297.
- (3) 김건중, 정태호, 이상중, 심국진 "實時間 電壓崩壞 近接度", 전기학회 전력계통분회,釜山 東義大, pp.51-55, 1991.4.
- (4) 이상중, 김건중, 김원경, 김용배, 임제선 "Three Kinds of Voltage Collapse Proximity Indices based on System Loss Sensitivity and their Application to Contingency Evaluation" ICEE'95, Taejon, pp.81-84, 1995. 7.
- (5) 이상중, 김건중, 김원경, 김용배, 임제선 "피상전력 손실감도 지표에 근거한 전압붕괴 근접도지표와 무효전력 투자", 전기학회 논문지 44-10-8, 1995.10, pp.1290-1294.
- (6) W.D. Stevenson, "Elements of Power System Analysis" 4th edition. McGraw-Hill Inc., 1982, pp.201-202.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 이 상 중 (李尙中)

1955년생. 1977년 부산공업고등전문학교 졸업, 1983년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1995년 충남대학교 대학원 졸업(박사). 1995년 전력연구원 책임연구원. 1996년 한국전력 보령화력본부 부장. 현재 서울산업대학교 전기공학과 진임강사