

# 위상각기준의 이동을 통한 새로운 페널티 계수의 계산방법

論 文

50A-1-1

## A New Calculation of Generator Penalty Factors through Transposition of System Angle Reference

李 尚 中\*  
(Lee, Sang-Joong)

**Abstract** - In this paper, a new method for calculating the penalty factors of all generators including the slack bus is presented. A simple transposition of the angle reference, from the conventional slack bus to another bus where no generation exists, enables the derivation of the loss sensitivity of the slack bus. Penalty factors are obtained without any physical assumption through a simple substitution of the bus loss sensitivities. Penalty factors calculated by proposed method are not dependent on reference bus and can also be directly substituted into the general ELD equation for computing the optimal dispatch. Equations for loss sensitivities, penalty factors and ELD are calculated simultaneously in normal power flow computation. A case study on a test system has proved the effectiveness of the proposed 'angle reference transposition' method.

**Key Words** : penalty factor, angle reference transposition, ELD

### 1. 서 론

연료비를 최소화하기 위하여 최적 발전력 분담을 연산하는 경제급전 문제에서 송전손실을 고려한 발전기의 페널티 계수를 정확하게 산출하는 일은 중요하다. 발전출력에 대한 손실감도를 계산하는 통상적인 방법으로서 B 계수법이 있다. B 계수는 Kron의 power-invariant transformation을 이용하여 기준 운전점의 송전손실을 발전출력의 2차함수로 표시하고 근사적인 손실방정식을 유도하는 방법이다. B계수법은 일단 B 계수가 결정되면 페널티 계수가 매우 간단히 구해지는 장점이 있으나 고정된 하나의 운전점을 기준으로 계산된 페널티 계수가 운전조건이나 계통구성이 달라질 경우 오차가 발생하는 단점이 있다.[1,2,3]

74년 Happ은 chain rule을 적용하여 Jacobian 행렬에 근거한 손실감도 유도방법을 소개하였다.[3,4] 이후 Wood, Wollenberg 등에 의하여 Jacobian 행렬에 근거한 페널티 계수의 직접연산법과 경제급전 기법이 발표되었다.[5,6] Jacobian 행렬에 근거한 방법은 페널티 계수가 계통망의 현재 상태를 반영하고 있다는 점에서 B 계수에 비하여 우수하다고 볼 수 있다. 그러나 오늘날까지 통용되고 있는 Jacobian 행렬에 근거한 페널티 계수 산출기법은 슬랙모선을 별도의 개념으로 취급해야 함으로써 계산된 발전기 페널티 계수가 슬랙모선에 종속되고 있다는 데에 다소 문제가 있다.

본 논문에서는 위상각 기준모선이 변경되면 Jacobian 행렬이

재구성되는 행렬의 기본적인 성질을 이용하여, 기존의 슬랙모선으로부터 발전기가 없는 다른 모선으로 위상각 기준을 이동시킴으로써 슬랙 모선을 포함한 모든 발전기의 페널티 계수를 계산하는 새로운 방법을 제시하였으며 또한 이 페널티 계수를 일반식(Classical ELD formulation)에 직접 대입하여 경제급전조건을 구하는 사례를 도시하였다.

### 2. 경제급전 조건식과 기존의 페널티 계수 유도방법

식 (1) 및 (2)는 등중분 연료비 원리에 근거한 계통손실을 고려한 경제급전 조건식이다.[1]

$$\frac{df_i}{dP_{Gi}}(PF_i) = \lambda \quad (1)$$

$$PF_i = 1 / (1 - \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gi}}) \quad (2)$$

단,  $f_i$  는  $i$  번째 발전기 출력  $P_{Gi}$  의 함수로 표시된 연료비,  $P_{loss}$  는 계통손실,  $PF_i$  는  $i$  번째 발전기의 페널티 계수를 나타낸다. 발전기 모선의 손실감도로부터 계산되는 페널티 계수를 구하는 대표적인 기존의 방법에 대하여 설명한다.

#### 2.1 B 계수에 의한 방법

B 계수 방법은 부하전류를 발전기 전류로 표현하고 이를 다시 발전기 유효전력의 함수로 변환하여 발전기 출력에 대한 계통손실감도를 구하는 방법이다. 그림 1과 같은 두 개의 발전기 1,2와 부하모선 3,4로 구성된 4 모선 모형계통을 가정한다.[2]

\* 正 會 員 : 國立서울産業大 電氣工學科 助敎授 · 工博  
接受日字 : 2000年 3月 13日  
最終完了 : 2000年 12月 11日

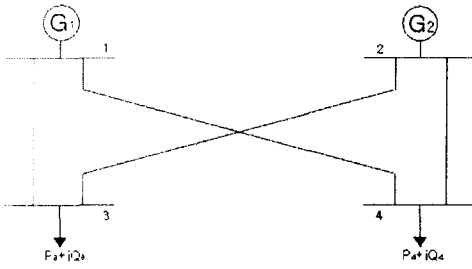


그림 1 4 모선 계통

Fig 1 Single line diagram of 4 bus system

모선전류를 각각  $I_1, I_2, I_3$  및  $I_4$  라 하고 모선의 부하 분담률이 일정하다고 가정하면 변환행렬  $C$ 를 정의하여 아래와 같이 각 모선전류를 발전기 전류로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} I_1^0 \\ I_2^0 \\ I_n^0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

단,  $I_n^0$  는 정전류(no-load current) 이다. 여기서 계통의 유효전력 손실은

$$P_L = [I_1 \ I_2 \ I_n^0] [C^T R_{bus} C^*] \begin{bmatrix} I_1^* \\ I_2^* \\ I_n^{0*} \end{bmatrix} \quad (4)$$

가 되고 발전기의 역률이 일정하다고 가정하면

$$P_L = \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & a_2 & \cdot \\ \cdot & \cdot & I_n^0 \end{bmatrix} [C^T R_{bus} C^*] \begin{bmatrix} a_1^* & \cdot & \cdot \\ \cdot & a_2^* & \cdot \\ \cdot & \cdot & I_n^{0*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ 1 \end{bmatrix} \\ = P_G^T B P_G + P_G^T B_0 + B_{00} \quad (5)$$

로서 발전기 출력  $P_{G1}, P_{G2}$  의 함수와  $B$  계수로 표시되는 손실 방정식을 얻게 된다. 단,  $R_{bus}$  는 임피던스 행렬  $Z_{bus}$ 의 실수부,  $a$  는 상수이다.

### 2.2 기준발전기 $\beta_i$ 계수를 이용하는 방법

부하의 변동이 없는 다수의 발전기로 구성된 계통에서,  $i$  발전기의 출력  $P_i$  가  $\Delta P_i$  만큼 증가할 때 기준발전기 출력이  $\Delta P_{ref}$  만큼 변한다고 한다. 전력수급의 평형을 위해 기준발전기의 출력변화  $\Delta P_{ref}$  는 선로손실의 변화  $\Delta P_{loss}$ 와  $-\Delta P_i$ 의 합이 되어야 한다. 즉,

$$\Delta P_{ref} = -\Delta P_i + \Delta P_{loss} \quad (6)$$

$\beta_i$  를  $-\Delta P_{ref}$  와  $\Delta P_i$  의 비로 정의하면

$$\beta_i = \frac{-\Delta P_{ref}}{\Delta P_i} = \frac{\Delta P_i - \Delta P_{loss}}{\Delta P_i} = 1 - \frac{\Delta P_{loss}}{\Delta P_i} \quad (7)$$

기준발전기 및  $i$  번째 발전기의 연료비 함수를  $F_{ref}(P_{ref})$  및  $F_i(P_i)$  라 하면

$$\frac{1}{\beta_i} \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \frac{dF_{ref}(P_{ref})}{dP_{ref}} \quad (8)$$

의 조건에서 경제급전 상태가 된다. 식 (8)은 경제급전 일반식 (1)과 매우 유사하며  $1/\beta_i$  은 페널티 계수의 형태를 취하고 있음을 알 수 있다.  $\beta_i$  계수는 기준모선을 1번으로 할 경우 아래의 식으로부터 유도된다.[5]

$$\begin{bmatrix} \partial P_{ref}/\partial P_2 \\ \partial P_{ref}/\partial P_3 \\ \vdots \\ \partial P_{ref}/\partial Q_2 \\ \partial P_{ref}/\partial Q_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \partial P_{ref}/\partial \theta_2 \\ \partial P_{ref}/\partial \theta_3 \\ \vdots \\ \partial P_{ref}/\partial V_2 \\ \partial P_{ref}/\partial V_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (9)$$

기준발전기  $\beta_i$  계수를 이용하여 직접 페널티 계수를 구하는 기존의 페널티 계수 유도방법은 경제급전 최적해를 구하는 훌륭한 방법이다. 그러나 식 (8),(9)에서 나타난 바와 같이 수식이 기준모선에 종속되어 있고,  $\beta_i$  계수를 구하기 위하여 식 (9)의 다소 생소한 연산이 추가로 필요하며, 손실감도를 대입하여 페널티 계수를 구하는 것이 아니라  $\beta_i$  계수로 직접 페널티 계수를 구하여 식(8)과 같은 변형된 경제급전 조건식에 의하여 최적해를 연산하는 다소 번거로운 기법이라 볼 수 있다. 이는 슬랙모선에 기준위상각  $\theta_1 = 0$  이 지정되어 슬랙모선을 타 발전모선과 별도의 개념으로 취급해야 함으로써 야기된 문제로 볼 수 있다.

### 3. 모선위상각 기준모선의 이동을 이용한 새로운 페널티 계수 계산방법

아래 식은 그림 1의 4모선 시스템에서 모선 1을 슬랙모선으로 지정한 경우의 조류계산 편차방정식을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix} \quad \text{단, } J = \begin{bmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \quad (10)$$

단,  $J$ 는 Jacobian 행렬이다. 아래 식은 페널티 계수식 (2)에 대입되는 모선의 손실감도를 유도하는 일반식이다.[3,4]

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_1} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_2} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_3} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_4} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial Q_1} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial Q_2} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial Q_3} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial Q_4} \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V_1} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V_4} \end{bmatrix} \quad (11)$$

페널티 계수를 구하는 종래의 방법이 슬랙모션을 별도의 개념으로 취급하고 또한 구해진 페널티 계수들이 슬랙모션에 종속될 수밖에 없었던 이유는 간단하다. 슬랙모션에서는 일정한 크기의 전압  $V_1$ 이 지정되고 동시에 계통모션 위상각의 기준  $\theta_{slack} = \theta_1 = 0$ 이 설정된다. 따라서 편차방정식 (10)과 손실감도 연산식 (11)에서 슬랙모션의 위상각과 관련한 행과 열의 요소는 연산에서 제외되므로 슬랙모션의 손실감도와 페널티 계수를 타 발전모션과 같은 방법으로는 구할 수가 없다.

아무런 물리적 가정없이 슬랙 모션을 포함한 모든 발전기의 페널티 계수를 구할 수만 있다면 바로 식 (1),(2)에 대입하여 경제급전 해를 쉽게 구할 수 있을 것이다. 그러나 계통전압의 위상각 기준이 바로 이 슬랙모션에 지정되기 때문에 이는 불가능했던 것이며 슬랙모션만은 별도로 취급할 수 밖에 없었던 것이다.

여기서, 슬랙모션의 손실감도와 페널티 계수를 구하지 못하는 이유가 슬랙 모션상에 지정되는 기준 위상각 때문이라면 위상각 기준모션을 슬랙 모션이 아닌 다른 모션으로 이동할 수는 없는가에 대하여 의문을 가져볼 만 하며, 결론적으로 이는 가능하다. 본 논문의 핵심은 이 위상각 기준모션을 슬랙 모션으로부터 발전기가 없는 다른 모션으로 이동하여 슬랙 모션의 손실감도와 페널티 계수를 구하자라는 것이다. 예를 들면 슬랙 모션에는 전압  $V_1 = 1.0$  만 지정하고, 부하모션인 3번 모션에서 유효 전력  $P_3, Q_3$ 와 함께 기준 위상각  $\theta_3 = 0$ 을 지정하는 것이다. 이로써 아래 식과 같이 Jacobian 행렬안의 부하모션의 위상각  $\theta_3$ 항은 제외되지만 대신 슬랙 모션의  $\theta_1$  요소는 남아있게 되고 따라서 식 (11)로 부터 슬랙모션의 손실감도와 페널티 계수의 도출이 가능하게 된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix}, \text{ 단 } J = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{41} & a_{42} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \quad (12)$$

즉 슬랙 모션으로부터 발전기가 없는 모션으로 위상각 기준 모션을 간단히 이동함으로써 슬랙 모션을 포함한 모든 발전기 모션의 손실감도와 페널티 계수가 한꺼번에 구해진다.

단지 모션 상호간의 상대적인 위상차  $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$  만이 조류계산에 필요한 것이며 모션 위상각 자체의 크기나 위상각 기준모션의 지정위치는 조류계산에 있어서 아무런 의미가 없다. 위상각 기준모션은 일정전압이 지정되는 슬랙 모션에 반드시 지정되어야 한다는 논리는 있을 수 없다. 계통의 모션수를  $N$ 이라 하면 위상각 기준이 슬랙모션으로부터 타모션으로 이동하더라도 계통전체의 변수의 개수  $2N$ 은 변하지 않으므로 위상각 기준모션은 시스템내의 어떠한 모션이 지정되어도 상관없으며 조류계산결과에 아무런 영향을 미치지 않는다.[부록 1] 계산된 슬

랙 모션을 포함한 모든 발전모션의 손실감도와 페널티 계수는 어떠한 물리적 가정도 전혀 필요치 않는 일반적인 값이며, 따라서 경제급전 일반식 (1),(2)에 바로 대입하여 최적발전력 분담을 직접 연산할 수 있다.

#### 4. 페널티 계수 연산을 위한 방정식 구성

다음의 4개의 수식群이 연립으로 풀리어 최적 발전력 분담해를 구하게 된다.

##### 4.1. 수식群 1 : 조류계산을 위한 전력방정식

$$\begin{aligned} P_k &= V_k \sum V_m (G \cos \theta_{km} + B \sin \theta_{km}) \\ Q_k &= V_k \sum V_m (G \sin \theta_{km} - B \cos \theta_{km}) \end{aligned} \quad (13)$$

##### 4.2. 수식群 2 : 손실방정식 및 감도 (계통손실과 $\theta$ 및 $V$ 에 대한 편미분 $\frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta_k}$ 및 $\frac{\partial P_{loss}}{\partial V_k}$ 을 조류계산식으로부터 계산한다.)

$$P_{loss} = \sum P_k = \sum V_k \sum V_m (G \cos \theta_{km} + B \sin \theta_{km}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta_k} = \frac{\sum P_k}{\partial \theta_k} = \frac{\sum V_k \sum V_m (G \cos \theta_{km} + B \sin \theta_{km})}{\partial \theta_k}$$

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial V_k} = \frac{\sum P_k}{\partial V_k} = \frac{\sum V_k \sum V_m (G \cos \theta_{km} + B \sin \theta_{km})}{\partial V_k}$$

##### 4.3. 수식群 3 : 손실감도 계산식 ( $\theta_3 = 0$ 으로 지정될 경우 식 (11)로부터 아래와 같이 손실감도가 계산된다. $\frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta_k}$ 및 $\frac{\partial P_{loss}}{\partial V_k}$ 은 수식群 3으로부터 얻어진다.)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_1} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_2} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_4} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial Q_3} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial Q_4} \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V_4} \end{bmatrix} \quad (15)$$

단,  $J$ 는 조류계산에 사용된 바로 그 Jacobian 행렬(12)이다.

##### 4.4. 수식群 4 : 계통손실을 고려한 경제급전 조건식 (1) 및 (2) : 수식群 3으로 부터 구해진 손실감도가 페널티 계수 계산식 (2)에 대입되고 경제급전조건식 (1)이 조류계산식과 연립으로 연산된다.

#### 5. 사례연구

그림 1의 계통에 대하여 모션 1을 슬랙 모션으로 선정하고  $V_1 = 1.0$  및  $\theta_1 = 0$ 로 지정하여 초기조류계산을 수행하였다. 선로 정수는 표 1에, 각 모션에 주어진 유효전력 및 전압지정치(이탈력계)와 초기조류계산 결과를 표 2에 도시하였다.

표 1 4 모선 계통의 선로정수

Table 1 Line and bus data (pu) of 4 bus system

from	to	R	X	Shunt Y
1	4	.00744	.0372	0.0775
1	3	.01008	.0504	0.1025
2	3	.00744	.0372	0.0775
2	4	.01272	.0636	0.1275

표 2 초기조류계산 결과

Table 2 base case power-flow solution

bus	P(p.u.)	Q(p.u.)	V(p.u.)	angle(rad)
1	1.913152	1.87224	1.0	0
2	3.18	1.32543	1.0	.0426
3	-2.20	-1.3634	.96051	-.0188
4	-2.80	-1.7352	.94304	-.0458

B 계수에 의한 방법과 식 (8)에 근거한 기존의 Jacobian 행렬을 이용하는 방법을 본 논문에서 제시된 '위상각 기준모선 이동'에 의한 방법과 표 3에 비교하였다.  $P_{G1}$  및  $P_{G2}$ 의 비용함수  $cost(P_{Gi})$ 는 아래와 같이 가정하였다.

$$\begin{aligned} cost(P_{G1}) &= .0040 P_{G1}^2 + 8.0 P_{G1} + 240 \\ cost(P_{G2}) &= .0048 P_{G1}^2 + 6.4 P_{G1} + 120 \end{aligned} \quad (16)$$

base case에서 주어진 B 계수는 아래와 같다.

$$B = \begin{bmatrix} 8.3831 & -.0494 & .3750 \\ -.0494 & 5.9635 & .1949 \\ .3750 & .1949 & .0901 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad (17)$$

표 3 기존의 방법과 '위상각 기준모선 이동' 기법에 의한 경제급전 결과 비교

Table 3 Comparison of ELD results by proposed 'angle reference transposition method' with by traditional methods

	B method	Proposed method	Existing Jacobi-method
total cost (\$/hour)	4557.51	4557.31	4557.31
system Lambda (\$/MWh)	9.839863	9.672609	9.672609
$P_{G1}$ (MW)	190.2204	195.9367	195.9367
$P_{G2}$ (MW)	319.1015	313.2978	313.2978
Transmission Loss (MW)	9.32192	9.23449	9.23449
$\partial P_{loss} / \partial P_{G1}$	.032328	.010867	-
$\partial P_{loss} / \partial P_{G2}$	.038261	.027392	-
Penalty factor $PF_1$	1.03341	1.010987	(1.0)
Penalty factor $PF_2$	1.03978	1.028163	1.01699
Incremental Cost $df1/dP_{G1}$	9.521763	9.567493	9.567493
Incremental Cost $df2/dP_{G2}$	9.463374	9.407659	9.407659

슬랙 모선과 2번 발전모선의 페널티 계수를 얻기 위하여 3번 부하모선을 위상각 기준모선으로, 즉  $\theta_3=0$  으로 지정하였다. 표 3에 나타난 바와 같이 제시된 '위상각 기준모선 이동'에 의한 방법이 기존의 B 계수에 의한 방법에 비하여 더 개선된 결과를 나타내고 있다. 사례연구에서 주어진 B 계수는 최적해와 매우 근접한 계통상태하에서 유도된 것으로서 발전력 분담解가 거의 최적해와 일치할 것으로 예상되지만 본 논문에서 제시된 기법으로 실제 최적해를 구한 결과 발전력 분담에 상당한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한 표 3에 나타난 바와 같이 본 논문에서 제시된 방법은 식 (8)에 근거한 기존의 Jacobian 행렬을 이용하는 방법과 동일한 최적해를 가지게 됨을 알 수 있으며, 이는 본 논문에서 제시된 '위상각 기준모선 이동'에 의하여 계산된 페널티 계수로 연산된 경제급전해 또한 최적해임을 입증한다.

4번 부하모선을 위상각 기준모선으로 지정할 경우에도 동일한 최적 발전력 분담해를 얻을 수 있다. 실제통의 경우 임의의 부하모선을 위상각 기준모선으로 지정하면 된다.

### 6. 모선위상각 기준모선의 이동을 이용한 새로운 페널티 계수 계산방법의 특징

이상의 결과로부터 기존의 방법에 비하여 본 논문에서 제시한 모선위상각 기준모선의 이동을 이용한 새로운 페널티 계수 계산방법의 특징을 열거하면 아래와 같다.

- '위상각 기준모선 이동'에 의한 방법은 연산방법에 있어 슬랙모선을 별도의 개념으로 취급할 필요가 없으며 모선의 손실감도를 계산하는 일반식으로부터 슬랙모선을 포함한 전 발전기 모선의 정확한 손실감도를 한꺼번에 구할 수 있다.
- 구해진 손실감도는 페널티 계수 계산을 위한 일반식에 직접 대입될 수 있고 페널티 계수 또한 경제급전조건 일반식 (Classic ELD formulation)에 직접 대입될 수 있다.
- 조류계산과 더불어 경제급전 최적해를 도출함으로써 해와 조류계산이 항상 일치한다.

### 7. 결 론

본 논문에서는 슬랙모선에 위상각의 기준을 두는 기존의 관례에서 벗어나 위상각 기준모선을 필요에 따라 자유롭게 이동시키는 새로운 연산기법을 소개하고 위상각 기준모선이 변경되면 Jacobian 행렬이 재구성되는 행렬의 기본적인 성질을 이용하여, 기존의 슬랙 모선으로부터 발전기가 없는 다른 모선으로 위상각 기준을 이동시킴으로써 슬랙 모선을 포함한 모든 발전기의 페널티 계수를 한꺼번에 계산하는 새로운 방법을 제시하였다. 기존의 슬랙모선으로부터 임의의 부하모선으로 위상각 기준모선을 이동함으로써 모선의 손실감도를 계산하는 일반식으로부터, 추가적인 연산이나 물리적인 전제없이 슬랙 모선을 포함한 전 발전기 모선의 페널티 계수를 한꺼번에 구하였다. 이렇게 구해진 페널티 계수는 또한 경제급전조건 일반식에의 직접 대입이 가능하다. 손실감도의 대입을 통하여 슬랙모선을 포함한 모든 발전기의 페널티 계수를 구하고 경제급전 최적해를 구하는 사례를 도시하였다.

참 고 문 헌

[1] H.H.Happ, Optimal Power Dispatch-A Comprehensive Survey, IEEE Transaction on PAS, vol.96, No.3, 1977, pp 841-854  
 [2] John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr., "Power System Analysis", Mcgraw Hill Inc., 1994. pp 548-560,  
 [3] H.H.Happ, Optimal Power Dispatch, IEEE Transaction on PAS, vol.93, No.3, 1974, pp 820-830  
 [4] H.H.Happ, Piecewise Methods and Applications to Power Systems, John Wiley & Sons, Inc., 1980, pp 293-297  
 [5] A. J. Wood, B.F. Wollenberg, "Power Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994. pp120-123  
 [6] F.L.Alvarado, Penalty Factors from Newton's Method IEEE Transaction on Power Apparatus and System, vol.PAS-97, Nov/Dec 1978, pp 2031-2037  
 [7] Q.C.Lu, Steven R. Brammer, A New Formulation of Generator Penalty Factor IEEE Transaction on Power System, vol.10, NO.2, May 1995, pp 990-994

부 록

그림 1 계통에 대하여 위상각 기준을 각각의 모선별로 이동한 경우 조류계산 결과

표 A1 2번 모선을 위상각 기준모선으로 선정할 경우 초기조류계산 결과( $\theta_2=0$ )

Table A1 base case power-flow solution for  $\theta_2=0$

bus	P(p.u.)	Q(p.u.)	V(p.u.)	angle(rad)
1	1.913152	1.87224	1.0	-.0426
2	3.18	1.32543	1.0	0
3	-2.20	-1.3634	.96051	-.0614
4	-2.80	-1.7352	.94304	-.0884

표 A2 3번 모선을 위상각 기준모선으로 선정할 경우 초기조류계산 결과( $\theta_3=0$ )

Table A2 base case power-flow solution for  $\theta_3=0$

bus	P(p.u.)	Q(p.u.)	V(p.u.)	angle(rad)
1	1.913152	1.87224	1.0	.0188
2	3.18	1.32543	1.0	.0614
3	-2.20	-1.3634	.96051	0
4	-2.80	-1.7352	.94304	-.0270

표 A3 4번 모선을 위상각 기준모선으로 선정할 경우 초기조류계산 결과( $\theta_4=0$ )

Table A3 base case power-flow solution for  $\theta_4=0$

bus	P(p.u.)	Q(p.u.)	V(p.u.)	angle(rad)
1	1.913152	1.87224	1.0	.0458
2	3.18	1.32543	1.0	.0884
3	-2.20	-1.3634	.96051	.0270
4	-2.80	-1.7352	.94304	0

저 자 소 개



이 상 중 (李 尙 中)

1955년 1월 10일 생. 1976년 한국전력 입사. 1985년 한전영월화력발전소 과장. 1995년 한전전력연구원 책임연구원. 1996년 한전보령화력본부 부장. 1995년 충남대학교 전기공학과 대학원(공박). 1998년 현재 국립

서울산업대학교 전기공학과 조교수

Tel : 02-936-1906, Fax : 02-978-2754

E-mail : sjlee@duck.snut.ac.kr