연료비 최소화를 위한 유무효 발전력 분담

(Minimization of Fuel Cost by Optimal Generation)

이상중*

(Sang-Joong Lee, 서울산업대학교 전기공학과)

Abstract

This paper gives a method for the minimization of the fuel cost by optimal generation. Derivation of the sensitivity of system loss by optimization technique is introduced and the loss sensitivities are substituted into the optimality conditions to obtain the minimized fuel cost.

1. 서 론

전력계통의 연료비 최소화를 위하여 유효 및 무효 전력 최적배분이 필요하다. 본 논문은 전력계통의 연료비 최소화를 위한 최적 발전력 배분에 대한 한 방법을 설명하고 있다. 전력계통 모선의 손실감도를 최적화 기법을 이용하여 구하는 방법을 소개하였다. 또한 'Angle Reference Transposition' 을 이용하여 발전기의 손실감도를 구하고 최적조건식에 대입하여 손실 최소화를 위한 발전력 배분을 구하는 방법을 소개하였다. 기존 문헌에 나오는 간단한 시스템을 예로 들어 제시한 방법의 적용 결과를 도시하였다.

2. 본 론

2.1 연료비 최소화 조건식

식 (1)은 고전적 ELD formulation이다[1].

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } Cost(P_G) \\ &\text{s.t. } \sum P_{Gi} - P_D - P_{loss} = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

제약조건에 무효전력 수급방정식을 더하면[2],

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } Cost = aP_G^2 + bP_G + c \\ &\text{s.t. } \sum P_{Gi} - P_D - P_{loss} = 0 \\ &\qquad \sum Q_{Gi} - Q_D - Q_{loss} = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

단, P_{loss} , Q_{loss} : 계통손실
P_G , Q_G : 발전기 MW-Mvar 출력
P_{Gi} , Q_{Gi} : i 번째 발전기 출력
P_D , Q_D : 총부하
a, b, c : 2차식 연료비 함수의 계수

식 (2) 에 대한 최적해는

$$\mu_P\left(1 - \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial P_{G1}}\right) - \mu_Q \frac{\partial Q_{LOSS}}{\partial P_{G1}} = aP_{G1} + b \tag{3}$$

$$\mu_P \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial Q_{G1}} - \mu_Q\left(1 - \frac{\partial Q_{LOSS}}{\partial Q_{G1}}\right) = 0 \tag{4}$$

가 된다[2].

2.2 최적화에 의한 손실감도의 유도

조류계산의 결과로 부터, 부하의 변화에 따른 계통손실의 변화를 추적할 수 있는 방법을 모색해 보자. 이러한 문제는 계통손실을 목적함수로 조류계산식을 제약조건으로 하는 비선형 최적화 문제로 모형화할 수 있다. 이를 수식으로 정형화하면,

$$\begin{aligned} &\textit{Minimize } P_{LOSS} \\ &\text{s.t} \quad P(V,\theta) = P^{SPEC} \\ &\qquad\ Q(V,\theta) = Q^{SPEC} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 P^{SPEC}, Q^{SPEC} 은 모선지정전력, V,θ는 모선의 전압과 부하각을 나타낸다. 여기서 라그란쥬 함수 M을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} M = P_{LOSS}(V,\theta) &+ \lambda_P^T[P(V,\theta) - P^{SPEC}] \\ &+ \lambda_Q^T[Q(V,\theta) - Q^{SPEC}] \end{aligned} \tag{6}$$

라그란쥬 함수의 최적화 결과 $[\lambda_P, \lambda_Q]$는 모선의 손실감도를 나타내며 아래의 수식으로부터 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = -J^{-T} \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_{LOSS}}{\partial \theta} \\ \dfrac{\partial P_{LOSS}}{\partial V} \end{bmatrix} \tag{7}$$

단, J 는 Jacobian 행렬이다.
$[\lambda_P, \lambda_Q]$ 지표의 계산은 단지 조류계산에서 이미 계산된 자코비안의 역행렬에 $\partial P_{loss}/\partial \theta$ 및 $\partial P_{loss}/\partial V$ 벡터를 곱하는 계산만을 필요로 하므로 계산량은 조류계산시간과 거의 동일하다.

2.3. 사례연구

모형 4모선 계통

그림 1과 같은 두 개의 발전기 1,2와 부하모선 3,4로 구성된 4 모선 모형계통을 가정한다.[3]

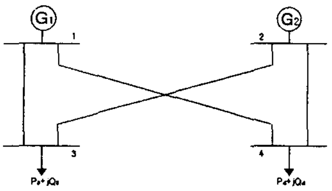

그림 1 4 모선 계통

Fig 1 Single line diagram of four-bus system

모선 1을 slack 모선으로 선정하고 V_1=1.0 및 θ_1=0 로 지정하여 초기조류계산을 수행하였다. 선로정수는 표 1에, 각 모선에 주어진 유무효전력 및 전압지정치(*이탤릭체*)와 초기조류계산 결과를 표 2에 도시하였다.

표 1 4 모선 계통의 선로정수

Table 1 Line data (pu) of four-bus system

fm	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

Angle Reference Transposition

위상각 기준을 임의 k 번째 모선에 두면 $\partial P_{loss}/\partial P_i$, $\partial P_{loss}/\partial Q_i$ 및 $\partial Q_{loss}/\partial P_i$, $\partial Q_{loss}/\partial Q_i$ 는 아래 식으로 부터 구해진다.[4]

$$\begin{bmatrix} \partial P_{LOSS}/\partial P_1 \\ \partial P_{LOSS}/\partial P_2 \\ \vdots \\ \partial P_{LOSS}/\partial P_{k-1} \\ \partial P_{LOSS}/\partial P_{k+1} \\ \vdots \\ \partial P_{LOSS}/\partial Q_1 \\ \partial P_{LOSS}/\partial Q_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = -J^{T} \begin{bmatrix} \partial P_{LOSS}/\partial \theta_1 \\ \partial P_{LOSS}/\partial \theta_2 \\ \vdots \\ \partial P_{LOSS}/\partial \theta_{k-1} \\ \partial P_{LOSS}/\partial \theta_{k+1} \\ \vdots \\ \partial P_{LOSS}/\partial V_1 \\ \partial P_{LOSS}/\partial V_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \qquad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \partial Q_{LOSS}/\partial P_1 \\ \partial Q_{LOSS}/\partial P_2 \\ \vdots \\ \partial Q_{LOSS}/\partial P_{k-1} \\ \partial Q_{LOSS}/\partial P_{k+1} \\ \vdots \\ \partial Q_{LOSS}/\partial Q_1 \\ \partial Q_{LOSS}/\partial Q_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = -J^{T} \begin{bmatrix} \partial Q_{LOSS}/\partial \theta_1 \\ \partial Q_{LOSS}/\partial \theta_2 \\ \vdots \\ \partial Q_{LOSS}/\partial \theta_{k-1} \\ \partial Q_{LOSS}/\partial \theta_{k+1} \\ \vdots \\ \partial Q_{LOSS}/\partial V_1 \\ \partial Q_{LOSS}/\partial V_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \qquad (9)$$

위상각 기준을 발전기가 없는 모선에 두어 식 (8,9)에 의하여 전 발전기의 손실감도를 계산하고 [4], 이를 최적조건식 (3),(4)에 대입하면 연료비 최소화를 위한 유무효 발전력 배분이 구해진다. 본 논문에서 제시된 방법에 의한 발전력 분담 및 연료비 연산결과를 표 3에 도시하였다. P_{G1} 및 P_{G2}의 비용함수 cost(P_G)는 다음과 같이 가정하였다.

$$cost(P_{G1}) = .0040\ P_{G1}^2 + 8.0\ P_{G1} + 240$$
$$cost(P_{G2}) = .0048\ P_{G1}^2 + 6.4\ P_{G1} + 120 \qquad (10)$$

표 3 연료비 비교

Table 3 Comparison of fuel cost

	P_{G1} = P_{G2}	conventional ELD	by proposed method
P_{G1} (p.u.)	254.3	195.9	195.0
P_{G2}	254.3	313.2	314.0
Q_{G1}	176.1	186.3	159.6
Q_{G2}	140.1	133.0	158.5
Cost($/hour)	4591.1	4557.3	4555.8
remark	V_1 = V_2 = 1.0		V_1 = 1.0

3. 결 론

'Angle Reference Transposition' 기법을 적용하여 얻은 발전기의 손실감도를 최적조건식에 대입하여 연료비 최소화를 위한 유무효 발전력 배분을 구하였다. 기존 문헌에 나오는 간단한 시스템을 예로 들어 연산결과를 도시하였다. 후속 연구로서 더 큰 시스템에 대한 타 연산방법과의 비교 검토 연구를 수행하고 있다.

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] 김준현 외, "전력시스템공학", 청문각, p147, 1998, 청문각

[3] John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr., "Power System Analysis", Mcgraw Hill Inc., 1994. pp 548-560,

[4] 이상중, "위상각 기준의 이동을 통한 새로운 페널티 계수의 계산방법", 전기학회 논문지, 50A-1-1, pp 1-5, 2001