

전력계통의 손실 최소화를 위한 최적 발전력 분담

이 상 종
서울산업대학교 전기공학과

Generation Allocation for System Loss Minimization

Lee, Sang-Joong
Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University of Technology

Abstract - 본 논문은 전력계통의 손실 최소화를 위한 최적 발전력 배분에 대하여 설명하고 있다. 각 발전기가 동일한 손실감도로 운전되고 있을 때 전력계통의 손실이 최소화됨을 수식으로 보이고 또한 각 발전기의 손실감도를 최적화 기법과 'Angle Reference Transposition'을 적용하여 구하였다. 기존 문헌에 나오는 간단한 시스템의 손실 최적화 결과를 도시하였다.

Lagrange dual function을 이용하여 식 (3)의 최적해를 구하면

$$\frac{dP_{loss}}{dP_{G1}} = \frac{dP_{loss}}{dP_{G2}} = \dots = \frac{dP_{loss}}{dP_{NG}} \quad (4)$$

를 얻을 수 있다. 식 (4)는 전력계통의 각 발전기가 동일한 손실감도로 운전되고 있을 때 계통의 손실이 최소화됨을 의미한다.

1. 서 론

Cost Minimization 위주의 ELD[1], OPF 등의 연구에 밀려 시스템의 손실감소에 대한 연구가 상대적으로 관심을 끌지 못해 왔던 것이 사실이다. 본 논문에서는 전력계통의 각 발전기가 동일한 손실감도로 운전되고 있을 때 전력계통의 손실이 최소화됨을 수식으로 보이고 또한 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.[2,3,4,5] 기존 문헌에 나오는 간단한 시스템을 예로 들어 제시한 방법의 적용 결과를 도시하였다.

2.2 최적화에 의한 손실감도의 유도

조류계산의 결과로부터, 부하의 변화에 따른 계통 손실의 변화를 추적할 수 있는 방법을 모색해보자. 이러한 문제는 계통손실을 목적함수로 조류계산식을 제약조건으로 하는 비선형 최적화 문제로 모형화할 수 있다. 이를 수식으로 정형화하면,

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

여기서 P^{SPEC}, Q^{SPEC} 은 모선지정전력, V, θ 는 모선의 전압과 부하각을 나타낸다. 여기서 라그랑주 함수 M 을 다음과 같이 정의한다.

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

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

$$\begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = -J^{-T} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (7)$$

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

2. 본 론

2.1 손실 최소 조건식

식 (1)은 발전 연료비의 최적화 문제이다. 제약조건은 수급방정식이 된다.[1]

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

단,
 P_{loss} : 계통손실
 P_G : 발전기 MW 출력 벡터
 P_{Gi} : i 번째 발전기 출력
 P_D : 총부하
 NG : 발전기 대수
 F_i : i 번째 발전기 출력 P_{Gi} 의 함수로 표시된 연료비

식 (1)에 대한 최적해는

$$\frac{dF_i}{dP_{Gi}}(PF_i) = \mu \quad (2)$$

단, PF_i 는 i 번째 발전기의 페널티 계수를 나타낸다. 식 (1)과 유사하게 이번에는 목적함수를 계통손실로 놓으면

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } P_{loss} \\ & \text{s.t. } \sum P_{Gi} - P_D - P_{loss} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

2.3. 사례연구

모형 4모선 계통

그림 1과 같은 두 개의 발전기 1,2와 부하모선 3,4로 구성된 4모선 모형계통을 가정한다.[6]

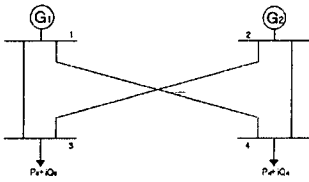


그림 1 4 모선 계통
Fig 1 Single line diagram of four-bus system

모선 1을 slack 모선으로 선정하고 $V_j=1.0$ 및 $\theta_1=0$ 로 지정하여 초기조류계산을 수행하였다. 선로정수는 표 1에, 각 모선에 주어진 유무효전력 및 전압정지치(이탈락체)와 초기조류계산 결과를 표 2에 도시하였다.

표 1 4 모선 계통의 선로정수
Table 1 Line data (pu) of four-bus system

| ln | b | 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 임의의 k 번째 모선에 두면 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 지표는 아래 식과 같이 주어진다.[2,3,4,5]

$$\begin{bmatrix} \lambda_{P1} \\ \lambda_{P2} \\ \vdots \\ \lambda_{Pk-1} \\ \lambda_{Pk+1} \\ \vdots \\ \lambda_{Q1} \\ \lambda_{Q2} \\ \vdots \end{bmatrix} = -J^{-T} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Loss}}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial P_{Loss}}{\partial \theta_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_{Loss}}{\partial \theta_{k-1}} \\ \frac{\partial P_{Loss}}{\partial \theta_{k+1}} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_{Loss}}{\partial V_1} \\ \frac{\partial P_{Loss}}{\partial V_2} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (8)$$

위상각 기준을 발전기가 없는 모선에 두고 식 (8)에 의하여 전 발전기의 손실감도를 계산하고[2,3,4,5] 이를 최적조건식 (4)에 대입하면 손실 최소화를 위한 발전력 배분이 구해진다. 본 논문에서 제시된 방법에 의한 발전력 분담 및 계통손실 연산결과를 표 3에 도시하였다.

표 3 제안된 방법에 의한 계통손실 연산결과 비교
Table 3 Comparison of system loss by proposed method

| | P2 = 0 | P1 = P2 | By proposed method |
|-------------------|--------|---------|--------------------|
| P_{G1} (p.u.) | 5.1453 | 2.5431 | 2.7488 |
| P_{G2} | 0 | 2.5431 | 2.3369 |
| Transmission Loss | .14532 | .08612 | .08567 |

3. 결론

각 발전기가 동일한 손실감도로 운전되고 있을 때 전력계통의 손실이 최소화됨을 수식으로 보였으며 최적화 기법을 이용하여 손실감도를 구하는 방법을 소개하였다. 또한 'Angle Reference Transposition' 기법을 적용하여 얻은 발전기의 손실감도를 최적조건식에 대입하여 손실 최소화를 위한 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.

(참고 문헌)

- [1] H.H.Happ, "Optimal Power Dispatch-A Comprehensive Survey", IEEE Transaction on PAS, vol.96, no.3, 1977, pp. 841-854
- [2] 이상중 외 "위상각 기준모선의 이동과 전력계통 연산", 전력계통연구회 35회 춘계학술발표회, 2000. 5.20 경북대학교, pp 53-56
- [3] 이상중 외 "위상각 기준모선의 이동에 의한 발전기의 Penalty 계수 계산방법", 전기학회 하계학술대회 2000. 7.17, 무주리조트, pp 49-51
- [4] 이상중, "위상각 기준의 이동을 통한 새로운 페널티 계수의 계산방법", 전기학회 논문지, 50A-1-1, pp 1-5, 2001
- [5] Sang-Joong Lee, Kern-Joong Kim, "Re-Construction of Jacobian Matrix by Angle Reference Transposition and Application to New Penalty Factor Calculation", IEEE Power Engineering Review, vol.22, no.2, 2002, pp. 47-50
- [6] John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr., "Power System Analysis", Mcgraw Hill Inc., 1994. pp 548-560,