

송전 손실 재분배를 고려한 최소 손실 조류 계산 알고리즘

채명석*
군장대학

이명환, 신종린
건국대학교

A Loss-Minimized Power Flow Algorithm
Considering Transmission Losses Re-distribution

Myung-Suk Chae* Myung-Hwan Lee, Joong-Rin Shin
Kun-Jang College Konkuk University.
Email : jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr

Abstract - This paper presents a new approach for power flow calculation, which minimizes the transmission losses in power systems with the control of voltage magnitudes on P-V nodes. In this approach, the transmission losses are re-distributed to each P-V node, at each iteration, to reduce the effect of slack. The steepest descent method is adopted, in this study, to minimize the transmission losses augmented with penalty functions to account for voltage constraints.

IEEE 14 and 30 buses test systems were used for the performance demonstration of the proposed method in this paper. The simulation results showed that the proposed method can reduce transmission losses and improve voltage profiles of power systems.

1. 서 론

전력 계통에서 최적 운전점을 찾는 것은 경제적인 시스템 운영 면에서 매우 중요한 일이다. 전력 계통의 최적 운전점을 구하는 문제는 결국 최적 조류(OPF: Optimal Power Flow) 계산을 의미하며 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며 여러 가지 다양한 시도들이 보고되고 있다(1)(2). 본 연구는 OPF를 겨냥한 또 다른 시도의 기초 단계로서 전력 계통의 송전 손실 재분배를 고려한 손실 최소화 조류 계산 알고리즘을 제안하고자 하는 것이다. 손실 최소화 문제는 이러한 관점에서 자주 보고되고 있는 연구과제이다(3).

본 논문에서는 각 모선의 부하 및 발전 배분량이 주어져 있을 때 우선 P-V 모선의 전압크기만을 조정하여, P-Q모선의 전압크기를 허용범위안에 있게 하면서 전력계통의 송전 손실을 최소화하는 조류계산 알고리즘을 정식화하였다. 또한 기존의 조류 계산과정에서 설정하게 되는 슬랙모선의 영향을 실제에 가깝도록 하기 위하여 각 발전 모선에 대한 송전 손실 재분배를 고려하였다. 목적 함수로는 전력계통의 송전손실 방정식을 택하였으며, 등호 제약조건인 수급조건을 만족시키기 위하여는 손실 재분배를 고려한 뉴턴-랩슨 조류계산 알고리즘(4)을 사용하였다. 부등호 제약조건으로는 P-Q모선의 전압크기의 허용범위를 고려하였다. 최적화 기법으로는 부등호제약조건에 대한 벌점함수를 부가시킨 확장된 목적함수를 대상으로 한 최대경사강하법(steepest descent method)을 사용하였다.

제안된 알고리즘의 타당성을 보이기 위하여 IEEE 14 모선, 30 모선 계통에 적용하여 그 결과를 제시하였다.

2. 최소 손실 조류 계산 알고리즘

2.1 문제의 정식화

2.1.1 목적 함수

본 논문은 각 모선의 부하 및 발전 배분량이 주어져 있을 때 발전 단 전압만을 제어하여 계통 전체의 손실을 최소화하는 것이므로 목적 함수로 다음과 같이 전체 전력 계통의 송전 손실 방정식으로 두었다.

$$\min f(x, u) = P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n V_i G_{ij} (-V_i + V_j \cos \delta_{ij}) \quad (1)$$

단, $u = \{V_G\}$: 제어 변수
 $x = \{V_L, Q_G, \delta\}$: 상태 변수

V_G : PV 모선 전압 벡터
 V_L : PQ 모선 전압 벡터
 δ : 모선 위상각 벡터

2.1.2 제약 조건

1) 등호 제약 조건

등호 제약 조건은 $g(x, u) = 0$ 의 형태로서 다음과 같이 손실 재분배를 고려한 수급 조건식이다.

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j \in L} V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (2a)$$

$i \in L$ (P-Q 모선 집합)

$$P_i = P_{Gi} + P_i^{loss} - P_{Li} - \sum_{j \in L} V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (2b)$$

$i \in G$ (슬랙 모선을 제외한 P-V 모선 집합)

$$Q_i = Q_{Gi} - G_{Li} - \sum_{j \in L} V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (2c)$$

여기서, P_{Gi}, Q_{Gi} : P-V 모선 i의 유효·무효 전력
 P_{Li}, Q_{Li} : P-Q 모선 i의 유효·무효 전력

이며, P_i^{loss} 는 P-V 모선 i에 분담된다고 가정된 송전 손실로서 다음과 같다(4).

$$P_i^{loss} = \frac{|I_i|^2}{\sum_{i \in G} |I_i|^2} \times P_{loss}$$

2) 부등호 제약 조건

부등호 제약 조건은 상태 변수인 P-Q 모선 전압과 P-V 모선 무효 전력의 허용 범위를 나타낸 것으로 다음과 같다.

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (3a)$$

$$i \in L$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} \quad (3b)$$

$$i \in G$$

3) 제어 변수의 한계

제어 변수인 P-V 모선의 전압도 다음과 같이 허용 범위 내에 있어야 한다.

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (4)$$

$$i \in G$$

2.2 최적화 해법

2.2.1 등호제약조건의 처리

등호제약조건을 만족하는 해를 얻기 위해서 다음과 같이 라그랑지 승수(λ)를 도입하여 목적 함수를 확장한다.

$$L(x, u, \lambda) = f(x, u) + \lambda^t \cdot g(x, u) \quad (5)$$

부등호제약조건이 없는 경우라면, 최적점에서 다음 식이 만족되어야 한다.

$$\nabla L(x, u, \lambda) = 0 \quad (6)$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial \lambda} \right] = g(x, u) = 0 \quad (7a)$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial x} \right] = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial g}{\partial x} \right]^t \cdot [\lambda] = 0 \quad (7b)$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial u} \right] = \left[\frac{\partial f}{\partial u} \right] + \left[\frac{\partial g}{\partial u} \right]^t \cdot [\lambda] = 0 \quad (7c)$$

여기서, 식 (7a)는 전력평형방정식을 표현하며, 뉴턴-랩슨 조류계산법을 이용하여 상태 변수를 구하면 다음과 같이 라그랑지 승수를 얻을 수 있다.

$$[\lambda] = - \left[\frac{\partial g}{\partial x} \right]^{-1} \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] \quad (8)$$

2.2.2 부등호 제약 조건의 처리

실제 계통 측면에서 보면 식 (3)에 사용된 부등호제약조건은 수학적으로 절대적이라기 보다는 제약한계를 약간 초과할 수도 있는 특성을 가진다. 이러한 제약 변수의 유연 한계를 제공하기 위하여 벌점함수(penalty function)를 사용하여, 다음과 같이 부등호제약 조건을 포함한 목적함수로 확장할 수 있다(1).

$$L_P(x, u, \lambda, s) = L(x, u, \lambda) + \sum_{i \in L} w_{PQ}(s) + \sum_{i \in G} w_{PV}(s) \quad (9)$$

$$w_{PV}(s) = \begin{cases} s_i(Q_i - Q_i^{\max})^2, & \text{for } Q_i > Q_i^{\max} \\ s_i(Q_i - Q_i^{\min})^2, & \text{for } Q_i < Q_i^{\min} \\ 0, & \text{for } Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} \end{cases} \quad (10a)$$

$$i \in G$$

$$w_{PQ}(s) = \begin{cases} s_i(V_i - V_i^{\max})^2, & \text{for } V_i > V_i^{\max} \\ s_i(V_i - V_i^{\min})^2, & \text{for } V_i < V_i^{\min} \\ 0, & \text{for } V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \end{cases} \quad (10b)$$

$$i \in L$$

여기서, s_i 는 벌점 계수이다.

2.2.3 최적화 알고리즘

본 논문에서는 확장된 목적 함수 L_P 를 최소화하기 위하여 최대 경사강하법을 사용하였다. 라그랑지상수(λ)인 식 (8)에 벌점함수 항을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$[\lambda] = - \left[\frac{\partial g}{\partial x} \right]^{-1} \left[\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial w_{PQ}}{\partial x} \right] \quad (11)$$

이때, 최대 경사방향(∇L_P)는 다음과 같이 표시된다.

$$[\nabla f] = \left[\frac{\partial f}{\partial u} \right] + \left[\frac{\partial g}{\partial u} \right]^t \cdot [\lambda] + \left[\frac{\partial w_{PV}}{\partial u} \right] \quad (12)$$

2.3 송전 손실 재분배를 고려한 최소손실 조류 계산

위와 같은 방법에 의하여 얻은 최적해는 결국 P-V 모선 전압 허용범위안에서 송전 손실을 최소화 하는 조류 계산의 해를 얻은 것이다.

본 논문에서 사용한 알고리즘의 순서도는 그림 1과 같다.

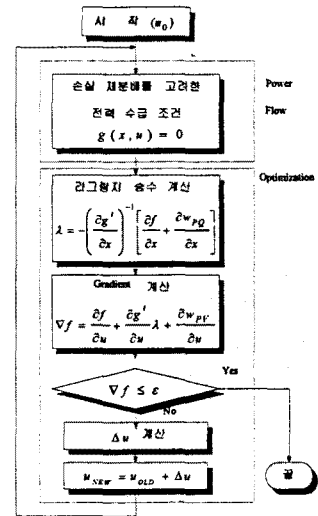


그림 1. 제안된 알고리즘의 순서도
Fig 1. Flow chart of the proposed algorithm

3. 사례 연구

본 연구의 타당성을 검증하기 위하여 IEEE 표준 계통인 14모선과 30모선 계통에 적용하여 결과를 비교하였다. 본 연구의 사용된 시뮬레이션 환경은 Pentium-166, 메모리 32 Mbyte, 한글 win95 이고, 컴파일러는 Visual C++ 5.0(32bit)을 사용하였다. 사례 연구를 위한 초기 조건 및 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

3.1 제약 변수의 한계 영역

본 논문에 사용된 제약변수는 P-V 모선 전압과 P-Q 모선전압 그리고 무효전력 한계는 다음 표와 같다. 여기서, 전압의 크기는 (p.u.)이고 무효전력은 (MVAR)이다.

표 1. 전압의 한계 영역

Table 1. Limits of voltage

	발전기 전압	부하 전압
최 소 값	0.9	0.95
최 대 값	1.1	1.05

표 2. 14 모선계통의 무효 전력 한계

Table 2. Limits of reactive power for 14 bus system

	Q_2	Q_3	Q_6	Q_8
최 소 값	-40.0	0.0	-6.0	-6.0
최 대 값	50.0	40.0	24.0	24.0

표 3. 30 모선계통의 무효 전력 한계

Table 3. Limits of reactive power for 30 bus system

	Q_2	Q_5	Q_8	Q_{11}	Q_{13}
최 소 값	-20.0	-15.0	-15.0	-10.0	-15.0
최 대 값	60.0	62.5	50.0	40.0	45.0

3.2 송전 손실 비교와 부하 모선의 전압 분포

표 4와 표 5는 각 시험 계통 별 발전량 및 송전 손실을 표현하였다. 여기서, 유효 발전량과 송전 손실은 [MW]이고, 무효 발전량은 [MVAR]이다. 사례 연구로는 기존 조류 계산 결과(C1), 손실 재분배를 고려하지 않은 최소손실 조류 계산 결과(C2)와 제안된 방법인 손실 재분배를 고려한 최소손실 조류 계산 결과(C3)를 비교하였다.

송전 손실은 제안된 방법이 앞의 두 가지 방법보다 더 효과적이었으며, 이는 손실 재분배를 고려한 결과라고 생각된다. 전체 송전 손실이 각각의 발전 모선에 분산됨으로써 슬랙모선에 집중된다고 가정하는 기존의 방법보다 좀 더 정밀하게 계산된 결과라고 볼 수 있다.

표 4. 14 모선계통의 방법별 송전손실과 발전량 비교

Table 4. Results of generations and system losses for 14 bus system

	C1	C2	제안 방법(C3)
$\sum P_g$	272.4	272.3	272.2
$\sum Q_g$	78.5	99.8	99.9
P_{loss}	13.4	13.3	13.2

표 5. 30 모선계통의 방법별 송전손실과 발전량 비교

Table 5. Results of generations and system losses for 30 bus system

	C1	C2	제안 방법(C3)
$\sum P_g$	290.5	290.2	288.9
$\sum Q_g$	99.2	93.6	92.0
P_{loss}	7.1	6.9	6.2

그림 2와 그림 3은 각 알고리즘을 수행했을 경우, 부하 모선의 전압 분포를 나타낸 것이다. 부하 모선의 전압 분포가 대체로 허용 한계를 만족하는 결과를 얻었고, 제안된 방법의 결과가 기존 방법보다 개선된 전압 특성을 나타내는 것을 볼 수 있다.

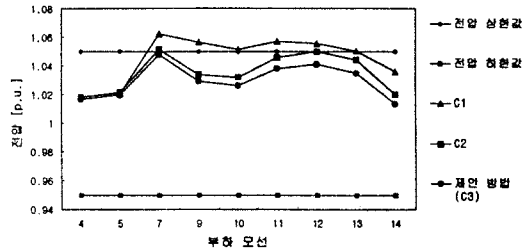


그림 2. 14 모선 계통에 대한 부하 모선의 전압 분포
Fig 2. Distribution of PQ-bus Voltage for 14 bus system

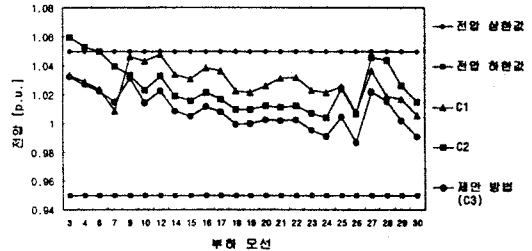


그림 3. 30 모선 계통에 대한 부하 모선의 전압 분포
Fig 3. Distribution of PQ-bus voltage for 30 bus system

4. 결 론

본 논문에서는 계통의 손실을 최소화하고, 전압의 특성을 개선시킨 새로운 조류 계산 해법을 제안하였다. 손실을 최적화하는 과정에서 사용된 등호제약조건인 손실 재분배를 고려함으로써 기존 방법보다 전체 송전 손실이 경감되는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 전압 특성 면에서도 기존 방법보다 제안된 방법이 개선된 결과를 얻었다.

향후 연구 과제로서 대용량 계통의 적용을 고려한 최적화 알고리즘의 보완과 OPF 수행을 위한 알고리즘의 확장이 후행되어야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Hermann W. Dommel, William F. Tinney, "Optimal Power Flow Solutions", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-87, No. 10, October 1968
- [2] R. C. Burchett, H. H. Happ, D. R. Vierath, K. A. Wirgau, "Developments in Optimal Power Flow", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 2, February 1982
- [3] J. Qiu, S. M. Shahidehpour, "A New Approach for Minimizing Power Losses and Improving Voltage Profile", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWR-2, No. 2, May 1987
- [4] J. R. Shin, K. S. Kim, M. S. Chae "Determination of Precise Voltage Profile with Loss Re-Distribution and Static Voltage Dependent Load Models", *The International Conference on Electrical Engineering*, July 1998.
- [5] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons, 1996