

고속의 유효전력 최적조류계산 알고리즘

송경빈* · 김홍래**
대구효성가톨릭대학교* · 순천향대학교**

A Fast Optimization Algorithm for Optimal Real Power Flow

Kyung-Bin Song* · Hongrae Kim**
Catholic University of Taegu-Hyosung* · Soonchunhyang University**

Abstract - A fast optimization algorithm has been evolved from a simple two stage optimal power flow(OPF) algorithm for constrained power economic dispatch. In the proposed algorithm, we consider various constraints such as power balance, generation capacity, transmission line capacity, transmission losses, security equality, and security inequality constraints. The proposed algorithm consists of four stages. At the first stage, we solve the aggregated problem that is the crude classical economic dispatch problem without considering transmission losses. An initial solution is obtained by the aggregation concept in which the solution satisfies the power balance equations and generation capacity constraints. Then, after load flow analysis, the transmission losses of an initial generation setting are matched by the slack bus generator that produces power with the cheapest cost. At the second stage we consider transmission losses. Formulation of the second stage becomes classical economic dispatch problem involving the transmission losses, which are distributed to all generators. Once a feasible solution is obtained from the second stage, transmission capacity and other violations are checked and corrected locally and quickly at the third stage. The fourth stage fine tunes the solution of the third stage to reach a real minimum. The proposed approach speeds up the coupled LP based OPF method to an average gain of 53.13 for IEEE 30, 57, and 118 bus systems and EPRI Scenario systems A through D testings.

1. 서 론

컴퓨터 환경의 발전과 더불어 최적조류계산문제를 해결하기 위한 다양한 연구가 지난 40여년 간 진행되어왔다. 이 분야의 초기연구에서는 등증분연료비법을 중심으로 이론적 기초를 확립하였고, 이후 여러 가지 제약조건을 점차 첨가하여 보다 복잡하고 현실적인 문제의 해결 방안을 제시하여왔다. 현재는 경제적 운용과 안전성을 동시에 고려하면서 제약조건이 포함된 대규모 계통의 최적조류계산문제에 많은 연구자가 관심을 집중하고 있다.

Alsac과 Stott은 선형계획법을 적용하여 최적조류계산 문제를 성공적으로 풀었으며[1], 일련의 논문을 통해 안전을 위한 제약조건을 쉽게 고려할 수 있는 방안을 제시하였다. 선형계획법의 고속연산 특성으로 이들이 개발한 최적조류계산용 프로그램의 상용화가 현실화되고 있다. 실제 계통 운용자는 경제급전이론에 기초하여 발전용량, 송전손실 및 송전선로용량에 대한 제약조건을 반드시 고려하여야한다.

최적조류계산은 궁극적으로 조류계산을 대체함으로써 계통의 안전도를 일차적으로 크게 향상시키는데 그 목적이 있다. 실시간 또는 한시간 내외의 오프라인 급전계획에 상용화되기 위해서는 신뢰할 수 있는 정확한 해를 15

분 이내의 빠른 시간 내에 제공할 수 있어야한다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 여러 가지 가정을 단순화한 개선된 알고리즘 개발의 필요성이 제기된다. 그 대표적인 예가 조류계산이나 상태추정 등에서 그 효과가 입증된 분할기법으로, 이 방법은 최적조류계산에도 도입되었다. 여기서는 문제를 유효전력과 무효전력의 최적화로 분할하여 풀게 되며, 비용관계는 유효전력 최적화문제에서 처리하고 안전도 및 안정도는 무효전력문제에서 주로 처리한다.

지리적으로 광범위하게 분포한 대규모 계통의 최적화 문제를 해결하기 위하여 병렬/분산연산 처리기법의 적용 연구가 활발히 전개되고 있다. 본 논문에서는 알고리즘의 개선에 초점을 두어 대규모 계통에 제약조건을 점진적으로 첨가하는 계층기법의 적용방안을 제시하려 한다. 선행된 연구에서는 계통의 규모가 커지고 다수의 제약조건이 첨가되던 인하여 보다 복잡해진 문제를 2단계의 계층 알고리즘 기법을 적용하여 계산속도를 개선하고 정확한 결과를 제공하였다[2]. 2단계의 계층알고리즘 기법은 제약조건으로 발전기용량, 송전손실, 송전선로용량, 전압의 크기, 변압기 탭용량, 출력증발률 등을 고려할 수 있는 모델을 제시하고, 안전 제약조건인 발전기의 고장, 상정사고 및 갑작스런 부하변동 등을 고려한 방안을 제시하였다.

본 연구에서는 2단계의 계층 알고리즘을 보다 발전시켜 다단계의 계층 알고리즘을 제시한다. 본 알고리즘은 계층기법을 확대 개선함으로써 대규모 전력계통의 실시간 최적조류계산에 기여한다. 본 알고리즘은 4단계로 구성되며 첫 단계에서 발전기의 용량을 제외한 모든 제약조건을 무시한 상태에서 경제급전을 수행하여 해를 구하고, 두 번째 단계에서는 송전손실을 고려한 페널티 팩터를 이용하여 경제급전을 수행한다. 세 번째 단계에서는 두 번째 단계의 해에 대하여 송전선로 용량 등의 제약조건에 대한 위반사항을 검사한 후 발견된 위반사항을 제거한다. 마지막 단계에서는 모든 제약조건을 고려하여 세 번째 단계의 해를 정제한다. 이때 선형프로그램기법에 기초하여 부분분할 유효전력 최적조류계산을 최적해에 도달할 때까지 반복 수행한다. 본 알고리즘의 기본은 최적해 근처에 고속으로 접근하여 정확한 최적해를 구하는 것이며, 구체적인 방법으로 제약조건을 조금씩 첨가하여 해를 구하고 최종단계에서 모든 제약조건을 고려함으로써 계산속도 개선을 주목적으로 한다.

제안된 알고리즘은 IEEE 30, 57, 118모선 계통 및 EPRI 시나리오 계통[8]에 대해 사례연구를 수행하여 발전비용과 해를 검증하고, 선형계획법에 기초한 최적조류계산기법과 연산속도를 비교하여 제시한다.

2. 제약조건을 포함한 유효전력 최적화문제의 정식화

제약조건을 포함한 유효전력 최적화문제는 전력조류계산과 여러 가지 상하한 제약조건과 상정사고를 포함한 안전조건을 가장 경제적인 발전기의 운전점을 결정하는 것이다. 유효전력 최적화문제를 정식화하면 다음과

같다[2].

$$\text{Minimize } J \quad (1)$$

- 단, $g(x, u) = 0$: 등식 제약조건(조류계산)
- $h(x, u) \leq 0$: 부등식 제약조건
- $g'(x, u) = 0$: 등식 안전조건
- $h'(x, u) \leq 0$: 부등식 안전조건

여기서, x 는 상태변수의 집합이고, u 는 제어변수의 집합이고, J 는 모든 발전기의 비용함수의 합을 나타낸다.

위의 식 (1)에서 상태변수와 제어변수는 모선의 형태 및 장치에 따라 변화하며 표 1에 정리하여 나타낸다.

표 1. 상태변수와 제어변수

| 모선형태 및 장치 | 상태변수 | 제어변수 |
|-----------|--------------------|--------------------|
| 발전기 모선 | θ_i, Q_G | $P_{G_i}, V_i $ |
| 부하 모선 | $\theta_i, V_i $ | P_{G_i}, Q_{G_i} |
| 슬랙 모선 | P_{G_i}, Q_{G_i} | $ V_s $ |
| 변압기 | | t_{ij} |

목적함수

목적함수는 발전기의 비용함수의 합을 이차함수로 나타낸 것으로 다음과 같다.

$$f = \sum_{i=1}^{NG} (C_{i0} + C_{i1}P_{G_i} + C_{i2}P_{G_i}^2)$$

여기서, NG 는 발전모선의 수이며, P_{G_i} 는 모선 i 에서의 유효전력 발전량이고, C_{i0} , C_{i1} , C_{i2} 는 발전기의 비용곡선을 나타내는 상수이다.

등식 제약조건

등식 제약조건은 조류방정식의 유효전력의 식으로 구성된다.

$$g_p(x, u) = P_{G_i} - P_{D_i} - \sum_{j=1}^n \frac{|V_i||V_j|}{|Z_{ij}|} \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) = 0$$

부등식 제약조건

제어변수와 상태변수에 대해 부등식 제약조건을 다음과 같이 규정한다.

- 발전기모선과 부하모선의 전압의 크기

$$|V_i|_{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|_{\max} \text{ for } i=1, \dots, n.$$
- 발전기모선과 슬랙모선의 유효전력발전량

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \text{ for } i=1, \dots, NG+1.$$
- 각 송전선로에서 선로전류의 크기

$$A_{ij}|I_{ij}|_{\min} \leq A_{ij}|I_{ij}| \leq A_{ij}|I_{ij}|_{\max} \text{ for } i=1, \dots, n, j=1, \dots, n.$$

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{모선 } i \text{와 } j \text{가 연결됨.} \\ 0, & \text{모선 } i \text{와 } j \text{가 연결안됨.} \end{cases}$$
- 변압기 탭의 변화율

$$K_{ijt}^{\min} \leq K_{ijt} \leq K_{ijt}^{\max} \text{ for } i=1, \dots, n, j=1, \dots, n.$$

$$K_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{모선 } i \text{와 } j \text{ 사이에 변압기 탭이 있음.} \\ 0, & \text{모선 } i \text{와 } j \text{ 사이에 변압기 탭이 없음.} \end{cases}$$

안전 제약조건

여러 가지 상정사고 등을 고려한 안전 제약조건을 고려할 수 있다. 선로나 발전기 고장시 또는 갑작스런 큰 부하의 감소시의 등식 및 부등식 제약조건을 나타낸다. 또한 비상사태시의 부등식 제약조건을 정의하여 첨가할 수 있다. 다양한 종류의 안전조건을 추가할수록 해를 구하기 위한 연산시간이 상당히 증가함을 고려하여 안전조건 추가를 검토해야 한다.

3. 다단계 계층 알고리즘

3.1 제 1단계 알고리즘

제 1단계에서는 고전적인 경제급전문제로 정식을 간략화하여 총수요와 발전기의 발전용량만을 고려한 정제된 람다반복법으로 최적해를 구한다. 제 1단계의 정식화와 최적해를 위한 필요조건은 용량 제한조건 내에서는 등중분 연료비를 갖는 운전점이며, 발전기 용량의 상한에 고정된 발전기의 중분연료비는 등중분 연료비보다 작다. 한편, 발전기 용량의 하한에 고정된 발전기의 중분연료비는 등중분 연료비보다 크다. 제 1단계의 정식화 및 해법인 정제된 람다반복법은 참고문헌[2]에 상세히 제시한다.

3.2 제 2단계 알고리즘

고전적인 경제급전문제에 송전손실을 고려하여 다음과 같이 제 2단계 문제를 정식화한다[7].

$$\text{Minimize } J \quad (2)$$

$$\text{단, } P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max}, \quad i=1, 2, \dots, NG,$$

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{G_i} = P_D + P_L.$$

식 (2)에 사용된 목적함수의 식은 다음과 같다.

$$f = \sum_{i=1}^{NG} C_i(P_{G_i})$$

여기서, $C_i(P_{G_i})$: 발전기 i 의 2차식으로 표현된 비용함수 (= $C_{i2}P_{G_i}^2 + C_{i1}P_{G_i} + C_{i0}$),

P_L : 총 부하,

P_L : 총 송전손실,

P_{G_i} : 발전기 i 에서의 발전량.

제 2단계의 정식은 널리 알려진 페널티팩터 방법에 의해 해를 구하며[3, 4], 페널티팩터는 B계수 또는 자코비안의 전치행렬을 이용해 구할 수 있다. 본 논문에서는 조류계산의 중간과정에서 자코비안의 전치행렬을 이용해 페널티팩터를 구한다[7].

3.3 제 3단계 및 제 4단계 알고리즘

제 2단계에서 발전용량과 송전손실 및 조류방정식의 제약조건이 고려되었다. 제 3단계에서는 송전선로의 용량 및 기타 제약조건을 위반사항을 점검하여 제거한다. 특히 송전선로용량을 위반한 경우에는 쌍의 발전기의 출력을 조정하여 신속히 송전선로용량의 허용범위 안으로 송전선로 전류를 조정하는 방법을 사용한다[5, 6]. 다른 위반사항의 경우 제한범위의 상한 또는 하한에 그 값을 고정시켜 제약조건을 위반사항을 제거한다. 그 다음의 제 4단계에서는 제 3단계의 해를 초기해로 사용하여 모든 제약조건을 포함한 선형화된 최적화문제를 부분분할 선형프로그래밍방법으로 푼다.

부분분할 방법은 분할된 유효전력부분의 자코비안 행렬을 이용하여 선형계획법으로 연속적인 해를 구하면서 중간에 조류계산을 수행하여 그 오차를 제거하며, 부분분할의 효과는 참고문헌[7]에 상세한 설명과 분석이 제시되어 있다. 선형화 프로그래밍 방법의 정식화 및 상세 알고리즘은 참고문헌 [2]에 제시된다.

4. 사례 연구

제안한 알고리즘은 MIPS RISComputer RC3230 시스템에서 IEEE 계통 및 EPRI 시나리오 계통에 대하여 사례연구를 수행하였다. 선형계획법은 IMSL의 서브루틴

표 2. IEEE 및 EPRI 시나리오 시스템에 대한 사례연구

| 시스템 | | IEEE 30 모선 | IEEE 57 모선 | IEEE 118 모선 | SCA | SCB | SCC | SCD |
|-------------------------------|--------------|---------------|---------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 모선수 | | 30 | 57 | 118 | 133 | 128 | 168 | 131 |
| 선로수 | | 37 | 65 | 177 | 176 | 216 | 288 | 195 |
| $\Delta P_c(\text{per unit})$ | | 0.030 | 0.096 | 0.110 | 0.159 | 0.133 | 0.200 | 0.159 |
| 수렴조건(\$) | | 0.008 | 0.119 | 0.404 | 6.991 | 2.207 | 5.172 | 4.178 |
| 선형계획 방법 | 연산시간 | 39.89 | 75.49 | 1530.86 | 4847.18 | 4002.10 | 7956.0 | 4861.5 |
| | 선형계획법 반복수 | 23 | 7 | 38 | 58 | 40 | 25 | 69 |
| | 총송전손실(MW) | 8.04 | 30.19 | 92.44 | 599.48 | 344.17 | 560.98 | 289.67 |
| | 총발전비용(\$/hr) | 809.44 | 11885.84 | 35318.57 | 695916.40 | 219651.78 | 513284.00 | 417871.40 |
| 제안된 방법 | 연산시간 | 3.40 | 11.14 | 28.01 | 58.97 | 45.27 | 140.63 | 67.95 |
| | 선형계획법 반복수 | 7 | 6 | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 |
| | 총송전손실(MW) | 8.73 | 31.22 | 86.63 | 640.58 | 353.84 | 630.39 | 294.25 |
| | 총발전비용(\$/hr) | 809.75 | 11885.43 | 35138 | 697753.33 | 219479.43 | 513899.60 | 417610.97 |
| 총 발전비용 차이 | | 0.03% | 0.00% | 0.51% | 0.26% | 0.08% | 0.12% | 0.06% |
| 연산속도 개선율 | | 11.73 | 6.78 | 54.65 | 82.20 | 88.41 | 56.57 | 71.55 |

을 사용하여 프로그래밍하였다. 제안된 알고리즘은 발전기의 상하한과 변압기 탭, 송전용량, 슬랙모선의 전압의 간격을 위하여 제약조건을 갖고 있지만, 사례연구의 간결성을 위하여 조류계산과 발전기 상하한, 송전용량을 제약조건으로 두었다. 사례연구에 사용된 비용곡선은 참고 문헌[2]의 부록에 제시된다.

사례연구 대상인 IEEE 계통 및 EPRI 시나리오 계통 [8]에 대한 모선수, 선로수, 연산시간, 수렴조건과 선형계획법을 위한 발전량 스텝의 크기, 선형계획법의 반복수, 총 발전비용 등을 표 2에 요약하였다. 표에서 연산시간은 C.P.U.의 사용시간(초)이며, 총 발전비용의 단위는 \$/hr이다. 제 4단계에서의 수렴조건은 제 2단계의 총 발전비용의 0.001%이다. 제안된 방법의 연산시간 개선은 선형계획 방법[1]과 비교한 연산속도 개선율로 나타내며 그 정의는 다음과 같다.

$$\text{연산속도 개선율} = \frac{\text{선형계획 방법의 연산시간}}{\text{제안된 방법의 연산시간}}$$

총 발전비용의 정확성과 연산속도의 개선 정도는 표 2에 제시되었다. 제안된 방법은 선형계획 방법과 비교하여 총 발전비용의 차이가 1%보다 작아 그 정확성을 입증하였으며, IEEE 및 EPRI 시스템의 사례연구에서 연산속도를 평균 53.13배 개선시켜 그 효용성을 검증하였다. 계층개념을 도입하여 최적점 근방으로 빠르게 수렴함으로써 제 4단계의 선형계획법의 반복 횟수를 크게 줄일 수 있었고, 따라서 연산속도에 있어서 크게 향상되었음을 알 수 있다. 예를 들어, IEEE 30모선 계통을 이용할 때 선형계획법의 반복 연산수가 제안된 방법보다 16회나 더 많음을 볼 수 있다.

IEEE 30 모선 계통을 사용하면, 두 개의 선로에서 송전선로용량이 초과되는 사례가 발생하였다. 이 경우, 3번과 4번 모선 사이의 선로에서 송전선로용량의 9.3%를 초과하였으며, 2번과 5번 모선 사이의 선로에서 송전선로용량의 9.9%를 초과하였다. 송전선로용량을 초과한 선로의 제약조건을 만족시키기 위해 오프 라인에서 미리 개선된 각 선로에 대한 발전기 쌍의 오프라인 감도를 사용한다. 각 선로에 대해 가장 감도가 높은 발전기 쌍은 (1, 13)과 (2, 5)를 사용하여 송전선로용량의 초과분을 상한용량에 조정한다[5, 6].

5. 결 론

본 논문에서는 2단계 계층 알고리즘을 다단계 계층 알고리즘으로 개선한 고속 유효전력 최적조류계산기법을 제안하였다. 제안된 방법은 4단계의 계층으로 구성되며

초기 두 단계에서 최적해 근처의 해를 찾고, 제 3단계에서 송전용량의 제약을 고려하며, 제 4단계에서 모든 제약조건을 고려하여 최적해를 찾을 때까지 선형계획법을 반복하여 수행한다. 제안된 방법을 IEEE 및 EPRI 계통에 적용하여 사례연구를 수행하였으며, 제안된 방법이 기존의 선형계획법에 비해 평균 53.13배 빠르게 해에 수렴함으로써 고속의 유효전력 최적조류계산기법임을 검증하였다. 향후, 지리적으로 광범위하게 분포한 대규모 전력계통의 최적화 문제에 본 논문에서 제시한 계층기법과 병렬/분산연산 처리기법을 적용하면 정보처리 기술의 발전과 더불어 최적조류계산의 연구분야 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

[참 고 문 헌]

- [1] O. Alsac and B. Stott, "Optimal Load Flow with Steady State Security," IEEE/PES summer Meeting & EHV/UHV Conference, Vancouver, B.C. Canada, July 1973.
- [2] G. Huang and K. Song, "A Simple Two Stage Optimization Algorithm for Constrained Power Economic Dispatch," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 1818-1824, November 1994.
- [3] F. L. Alvarado, "Penalty Factors from Newton's Method," IEEE Trans. on Power Appar. and Syst., Vol. PAS-97, No. 6, pp. 2031-2037, November/December 1978.
- [4] F. L. Alvarado, "Computational Complexity in Power Systems," IEEE Trans. on Power Appar. and Syst., Vol. PAS-95, No. 4, pp. 1028-1037, July/August 1976.
- [5] J. Zaborszky, G. Huang and S. Y. Lin, "Control of Reactive Power and Voltage in Emergencies," Automatica, Vol. 21, No. 3, pp. 237-246, 1985.
- [6] J. Zaborszky, G. Huang and S. Y. Lin, "Reactive and Real Power Control for Computationally Effective Voltage and Thermal Management," IEEE Trans. on Power Appar. and Syst., Vol. PAS-104, No. 7, pp. 1728-1737, 1985.
- [7] 송경민, 김홍래, "부분분할기법에 의한 유효전력의 최적조류계산" 전기학회 논문지 게재 대기중.
- [8] "Synthetic Electric Utility Systems for Evaluating Advanced Technologies," EPRI EM-285, Final Report, Feb. 1977.