제약조건을 고려한 경제급전 제어를 위한 다단계 최적조류계산 알고리즘

論 文
50A-9-5

A Multi-level Optimal Power Flow Algorithm for Constrained Power Economic Dispatch Control

宋 敬 彬*
(Kyung-Bin Song)

Abstract - A multi-level optimal power flow(OPF) algorithm has been evolved from a simple two stage optimal power flow algorithm for constrained power economic dispatch control. 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 two stage optimization method to an average gain of 2.99 for IEEE 30, 57, and 118 bus systems and EPRI Scenario systems A through D testings.

Key Words : Optimal Power Flow, Economic Dispatch

1. 서 론

컴퓨터 환경의 발전과 더불어 최적조류계산 문제를 해결하기 위한 다양한 연구가 지난 수십 년간 진행되어 왔다. 본 분야의 초기 연구는 등증분 연료비법을 중심으로 이론적 기초를 확립하고 여러 가지 제약조건을 점차 첨가하여 보다 복잡하고 현실적인 문제의 해결방안을 제시하여 왔다. 현재는 경제적 운용과 안전성을 동시에 고려하며 다양한 특성을 갖는 대규모 계통의 제약조건이 포함된 최적조류계산 문제에 많은 연구자가 관심을 집중하고 있다.

Alsac과 Stott은 선형계획법을 적용하여 최적조류계산 문제를 성공적으로 계산하였으며[1], 일련의 논문을 통해 안전 제약조건을 쉽게 고려할 수 있는 방안을 제시하였다. 선형계획법은 고속연산 특성을 장점으로 상용화 기법으로 사용된다. 실계통 운용자는 경제급전이론에 기초한 발전용량과 송전손실과 송전선로 용량에 대한 제약조건 고려를 필수 사항으로 강조한다. 최적조류계산은 궁극적으로 조류계산을 대체함으로써 계통의 안전도를 일차적으로 크게 향상시키는데 그 목적이 있다.

실시간 또는 한시간 내외의 오프라인 급전계획에 상용화되기 위해서는 고속의 신뢰 할 수 있는 정확한 해를 수 분 이내에 제공해야하는 요구사항을 만족해야 한다. 이러한 요구사항을 충족시키기 위해 여러 가지 가정을 단순화한 개선된 알고리즘 개발의 필요성이 제기되며, 대표적인 적용 예로 조류계산과 상태추정 등에서 그 효과가 입증된 분할기법이 최적조류계산에도 도입되었다[2]. 최적조류계산 문제는 유효전력과 무효전력의 최적화로 분할하여 문제를 풀며 비용관계는 유효전력 최적화문제에서 처리하고 안전도 및 안정도는 무효전력문제에서 주로 처리한다.

지리적으로 광범위하게 분포한 대규모 계통의 최적화 문제를 계산하기 위해 다단계 및 병렬/분산연산 처리기법의 적용 연구가 활발히 전개되고 있다[3][4][5][6]. 또한, 전력 시스템의 구조 개편과 더불어 혼잡처리 및 융통전력에 최적조류계산 기법을 응용한 연구가 관심을 끌고 있다[7].

본 논문에서는 알고리즘의 개선에 초점을 두어 대규모 계통에 제약조건을 점진적으로 첨가하는 계층기법의 적용방안을 제시하려 한다. 선행된 연구에서는 계통의 규모가 커지고 다수의 제약조건의 첨가로 인하여 보다 복잡해진 문제를 이단계의 계층 알고리즘 기법을 적용하여 계산속도를 개선하고 정확한 결과를 제공하였다[8]. 이단계의 계층알고리즘 기법은 제약조건으로 발전기용량과 송전손실과 송전선로용량과 전압크기와 변압기 탭 용량과 출력 증발율 등을 고려할 수는 모델을 제시하고, 안전 제약조건인 발전기의 고장과 상정사고와 갑작스런 부하변동 등을 고려한 방안을 제시하였다. 본 연구에서는 이단계의 계층 알고리즘을 보다 발전시켜 다단계의

* 正 會 員 : 啓明大 工學部 傳任講師 · 工博
接受日字 : 2001年 4月 19日
最終完了 : 2001年 8月 30日

계층 알고리즘을 제시한다. 본 알고리즘은 계층기법을 확대 개선하여 대규모 계통의 실시간 최적조류계산을 위해 기여한다.

본 알고리즘은 제 4 단계로 구성되며 첫 단계에서 발전기의 용량을 제외한 모든 제약조건을 무시하고 경제 급전을 수행하여 해를 구하고 둘째 단계에서 송전손실을 고려하여 페널티 팩터를 이용하여 경제급전을 수행한다. 셋째 단계에서는 둘째 단계의 해에 대하여 송전선로 용량 등의 제약조건에 대한 위반사항을 검사하여 발견된 위반사항을 제거한다. 마지막 단계에서는 모든 제약조건을 고려하여 셋째 단계의 해를 정제한다. 이때 선형프로그램기법에 기초하여 부분분할 유효전력 최적조류계산을 최적해에 도달 할 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.

제 2 단계에서 널리 알려진 페널티 팩터 방법을 이용하여 발전기 용량과 송전손실과 조류방정식을 고려한 경제급전 문제를 푼다. 페널티 팩터를 구하는 방법은 정확도와 연산속도에서 우수하고 현재의 시스템의 부하상태 및 구성을 잘 나타내는 자코비안의 전치행렬을 이용한 방법을 사용한다. 또한 분할 자코비안의 전치행렬을 사용하여 페널티 팩터와 송전손실 증분의 계산시간을 절약 할 수 있다. 특이한 경우 제 2 단계의 해가 다른 제약조건을 만족할 경우, 그 해는 제 4 단계를 수행한 해와 정확히 일치한다. 무엇보다도 제 2 단계의 알고리즘이 속도개선에 큰 도움이 되어, 선행된 연구인 제 2 단계의 계층 알고리즘보다 연산속도의 개선을 이룩하였다.

제 3 단계에서 제약조건을 모두 만족하면 해는 최적해가 되어야한다. 하지만 제 3 단계의 제약조건 검사에 모두 만족할지라도 최적해가 안될 수 있는 경우를 발견하였다. 이는 송전손실의 함수(P_L)가 발전량(P_{Gi})에 의해 미분 가능하다는 가정에 의문을 갖는다. 이런 가정의 모순은 페널티 팩터의 부정확성으로 그 결과가 나타나며 참고문헌[2]에 샘플계통에 대한 예제에서 미분 불가능한 점을 제시하였다. 본 논문에서는 미분 불가능한 점에서 멀리 떨어진 운전 점에서 페널티 팩터의 부정확성을 보이며, 이에 대한 해결책으로 제 4 단계의 정확한 최적해를 구하는 반복적인 선형계획법을 적용한다. 따라서, 제 4 단계의 해는 최적해의 쿤터커 조건을 만족시킨다. 특히 제 4 단계는 참고문헌[2]에서 분석된 부분분할법을 적용해 연산속도를 크게 개선하였다.

제안된 알고리즘은 IEEE 30, 57, 118 모선 계통 및 EPRI 시나리오 계통에 대해 사례연구를 수행하여 발전비용과 해가 검증되었으며, 연산속도는 이단계 계층 알고리즘과 비교하여 평균 2.99배 개선되었다.

기 호

P_{Gi} : 모선 i에서의 유효전력 발전량

Q_{Gi} : 모선 i에서의 무효전력 발전량

$|V_i|$: 모선 i에서의 전압

θ_i : 모선 i에서의 전압의 위상각

P_{Di} : 모선 i에서의 유효전력 부하

P_D : 총 유효전력 부하

P_L : 총 손실

NG : 발전기의 수

$C_i(P_{Gi}) = C_{i0} + C_{i1} * P_{Gi} + C_{i2} * P_{Gi}^2$: 발전기 i의 유효전력 발전비용

C_{i0}, C_{i1}, C_{i2} : 발전기 i에 대한 비용함수의 상수

IC_i : 발전기 i의 증분 비용

U : 발전기 용량 상한 제약을 위반한 발전기 집합

L : 발전기 용량 하한 제약을 위반한 발전기 집합

L_i : 발전기 i의 페널티 팩터

P_{Gi}^{max} : 발전기 용량 상한

P_{Gi}^{min} : 발전기 용량 하한

P_{Gs}^{max} : 슬랙 발전기 용량 상한

P_{Gs}^{min} : 슬랙 발전기 용량 하한

Q_{Gs} : 슬랙 모선에서의 무효전력 발전량

2. 제약조건을 고려한 유효전력 최적화문제의 정식화

제약조건을 고려한 유효전력 최적화문제는 전력조류계산과 여러 가지 상하한의 제약조건과 상정사고를 포함한 안전제약조건을 고려하여 가장 경제적인 발전기의 운전점을 결정하는 것이다. 유효전력 최적화문제를 정식화하면 다음과 같다.

$$\textbf{\textit{Minimize}} \quad \boldsymbol{F} \tag{1}$$

단, $g(x, u) = 0$: 등식 제약조건(전력조류 방정식)

$h(x, u) \le 0$: 부등식 제약조건

$g'(x, u) = 0$: 등식 안전조건(상정사고시 전력조류 방정식)

$h'(x, u) \le 0$: 부등식 안전조건

여기서, x는 상태변수의 집합이고,

u는 제어변수의 집합이고,

F는 모든 발전기의 비용함수의 합을 나타낸다.

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

목적함수는 발전비용함수로 보통 2차식으로 근사화 된다. 발전기의 설계시 또는 인수시 최대 출력에 대해 25%, 50%, 75%, 100%로 운전하여 데이터를 취득하고, 최소자승법 등을 사용하여 발전기의 입출력 특성 방정식을 산정 한다. 발전기의 운전 기간이 지남에 따라 특성이 변화하므로 예방정비계획 때 반드시 입출력 특성을 갱신하여야 입출력 특성 방정식의 신뢰도를 높일 수 있다. 복합 화력의 경우, 연료의 혼소비율이 다양하여 모든 경우에 대해 데이터 취득이 어려우므

표 1 상태변수와 제어변수
Table 1 State Variables and Control Variables

모선형태 및 장치	상태변수	제어변수
발전기 모선	θ_i, Q_{Gi}	P_{Gi}, $\|V_i\|$
부하 모선	θ_i, $\|V_i\|$	P_{Gi}, Q_{Gi}
슬랙 모선	P_{Gs}, Q_{Gs}	$\|V_s\|$
변압기		t_{ij}

로, 과거의 자료를 이용한 입출력 특성 방정식 산정 기법이 요구된다.

모든 OPF 문제는 전력 조류 방정식에 의해 등식 제약조건으로 제약된다. 모든 모선에서 유효/무효 전력주입의 계획된 값은 OPF의 해에 대해 무조건 만족되어야 하며, 이 조건이 만족되지 않으면 OPF의 가능해가 될 수 없으며 특별한 조치가 필요하다. 부등식 제약조건은 발전기모선과 부하모선에서 전압의 크기, 발전기모선과 슬랙 모선에서 유효전력발전량, 각 송전선로에서 선로전류의 크기, 변압기 탭의 변화율에 대한 제약을 고려한다.

여러 가지 상정사고 등을 고려한 안전 제약조건을 고려할 수 있다. 계통의 안전도를 높이는 것으로 계통의 상정사고 즉, 선로사고, 발전기 고장정지, 부하탈락을 고려 할 수 있다. 가능한 발생할 모든 상정사고를 고려하면 안전도는 크게 향상될 수 있지만 공학적으로 제약을 받게된다. 여기서 공학적 제약은 시스템의 크기가 매우 대형화되어 연산시간과 계산오차가 현실성을 벗어나는 문제와 현저히 복잡해지는 프로그램 개발 문제가 안전도 향상에 장애가 될 수도 있다는 어려움이 존재한다. 공학적 제약은 현재의 기술수준이 다룰 수 있는 제한된 상정사고를 처리하는 것으로 확률이 높거나 영향이 지대한 상정사고를 선택적으로 고려하는 것이다. 두 번째로 안정도를 향상시키기 위해서는 오프라인 또는 온라인 전압 안정도 해석 도구로부터 산정된 전압의 여유도에 기반을 둔 전압제약조건을 부가하여 전압 안정도를 고려한다. 전압 안정도 연구는 전압붕괴를 예측하는 인덱스가 개발되어 있으며 연속조류계산법에 의해 부하 및 발전량의 변화에 대한 전압 안정도 평가가 가능하다. 전압 안정도에서 제시된 여유도 및 전압의 크기 제약은 지역적으로 작용하므로 OPF에서의 고려가 어느 정도 효과가 있는지는 아직 부정확하다. 일부 상용 OPF 소프트웨어에서 전압 제약을 처리 기능이 없는 것도 전압 제약의 효과에 대한 의구심으로 판단된다. 상정사고 중 선로사고는 1회선 또는 1루트 등의 상정사고가 고려되는데, 이때 계통의 구성이 변화되며 어드미턴스 행렬이 변화하게 된다. 최적조류계산의 해는 상정사고가 발생하여도 정상상태 운전 점으로부터 이동된 운전 점에서 조류방정식을 만족하고 각종 부등식 제약을 만족하는 해를 제공함으로써 계통운전의 최소한의 안전도를 확보할 수 있다. 상정사고의 선택은 상정사고의 영향을 고려한 순서를 미리 정하여 모의 할 수 있다. 발전기 고장은 해당 모선의 발전출력을 영으로 만들어 모의하며, 부하 탈락은 해당 모선의 부하를 빼주면 쉽게 모의가 가능하다. 또한 비상사태시의 부등식 제약조건을 정의하여 첨가할 수 있다. 비상사태시의 부등식 제약조건은 계통 운용 규정에 따라 정상상태보다 제약이 완화된다. 즉, 송전선용량 등의 상한이 확대될 수 있다. 이러한 안전제약은 전력품질의 신뢰성을 높이고 향후 전력품질 향상을 위한 비용계산에도 이용 가능하다. 다양한 종류의 안전조건을 추가할수록 해를 구하기 위한 연산시간이 상당히 증가함을 고려하여 안전조건의 추가를 검토해야 한다.

3. 다단계 계층 알고리즘

본 연구에서는 이단계의 계층 알고리즘을 보다 발전시켜 다단계의 계층 알고리즘을 제시한다. 본 알고리즘은 계층기법을 확대 개선하여 대규모계통의 실시간 최적조류계산을 위해 기여한다. 본 알고리즘은 사단계로 구성되며 첫 단계에서 발전기의 용량을 제외한 모든 제약조건을 무시하고 경제 급전을 수행하여 해를 구하고, 둘째 단계에서 송전손실을 고려하여 페널티 팩터를 이용하여 경제급전을 수행한다. 셋째 단계에서는 둘째 단계의 해에 대하여 송전선로 용량 등의 제약조건에 대한 위반사항을 검사하여 발견된 위반사항을 제거한다. 마지막 단계에서는 모든 제약조건을 고려하여 셋째 단계의 해를 정제한다. 이때 선형프로그램기법에 기초하여 부분분할 유효전력 최적조류계산을 최적해에 도달 할 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.

제 2 단계에서 널리 알려진 페널티 팩터 방법을 이용하여 발전기 용량과 송전손실과 조류방정식을 고려한 경제급전문제를 푼다. 페널티 팩터를 구하는 방법은 정확도와 연산속도에서 우수하고 현재의 시스템의 부하상태 및 구성을 잘 나타내는 자코비안의 전치행렬을 이용한 방법을 사용한다. 또한 분할 자코비안의 전치행렬을 사용하여 페널티 팩터와 송전손실 증분의 계산시간을 절약 할 수 있다. 특이한 경우 제 2 단계의 해가 다른 제약조건을 만족할 경우, 그 해는 제 4 단계를 수행한 해와 정확히 일치한다. 무엇보다도 제 2 단계의 알고리즘이 속도개선에 큰 도움이 되어, 선행된 연구인 이단계의 계층 알고리즘보다 연산속도의 개선을 이룩하였다.

제 3 단계에서 제약조건을 모두 만족하면 해는 최적해가 되어야 한다. 하지만 제 3 단계의 제약조건 검사에 모두 만족 할 지라도 최적해가 될 수 없는 경우를 발견하였다. 이는 송전손실의 함수(P_L)가 발전량(P_{Gi})에 의해 미분 가능하다는 가정에 모순이 있을 수 있다. 이러한 가정의 모순은 페널티 팩터의 부정확성으로 그 결과가 나타나며 참고문헌[2]에 샘플계통에 대한 예제에서 미분 불가능한 점을 제시하였다. 본 논문에서는 미분 불가능한 점에서 멀리 떨어진 운전 점에서의 페널티 팩터의 부정확성을 보이며, 이에 대한 해결책으로 제 4단계의 정확한 최적해를 구하는 반복적인 선형계획법을 적용한다. 따라서 제 4 단계의 해는 최적해의 쿤터커 조건을 만족시킨다.

3.1 제 1 단계 알고리즘

제 1 단계에서는 고전적인 경제급전문제로 정식을 간략화하여 총수요와 발전기의 발전용량만을 고려하여 정제된 람다

반복법으로 최적해를 구한다. 제 1 단계의 정식화와 최적해를 위한 필요조건은 용량 제약조건 내에서는 등증분 연료비를 갖는 운전점이며 발전기 용량의 상한에 고정된 발전기의 증분연료비는 등증분 연료비보다 작고, 발전기 용량의 하한에 고정된 발전기의 증분연료비는 등증분 연료비 보다 크다. 제 1 단계의 정식화 및 해법인 정제된 람다 반복법은 참고문헌 [8]에 상세히 제시되어 있다.

3.2 제 2 단계 알고리즘

고전적인 경제급전문제에 송전손실을 고려하여 제 2 단계 문제를 정식화한다. 제 2 단계의 정식은 널리 알려진 페널티 팩터 방법에 의해 해를 구하며[9][10], 페널티 팩터는 B계수 또는 자코비안의 전치행렬을 이용해 구할 수 있다[11]. 본 논문에서는 조류계산의 중간과정에서의 자코비안의 전치행렬을 이용해 페널티 팩터를 구한다. 자코비안의 전치행렬을 이용한 방법은 B계수를 이용한 방법보다 연산속도 및 정확도에서 우수하고 현재의 시스템 상태에 기초하기 때문에 실시간 시스템 구성 시에도 적합하다. 제 2 단계의 정식은 필요조건을 만족하면 최소해를 찾을 수 있다. 정확한 페널티 팩터의 계산은 다음 식을 사용하여 계산 가능하다.[2]

$$[H^t]\begin{bmatrix} 1-\frac{\partial P_L}{\partial P_{G2}} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1-\frac{\partial P_L}{\partial P_{G2}} \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial P_1}{\partial \theta_{NG}} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서, H는 분할 자코비안행렬 $\left[\frac{\partial P}{\partial \theta}\right]$, P_L은 송전손실, P_{G_i}는 모선 i에서의 발전량.

발전기의 용량을 고려하지 않은 페널티 팩터 방법은 참고문헌[8]에 상세히 기술되어 있다. 제 2 단계에서는 송전손실과 발전기용량을 동시에 고려한 체계적인 알고리즘을 제시한다. 페널티 팩터는 조류계산에서 계산된 자코비안 행렬과 위상각을 식 (2)에 대입하여 계산한다. 알고리즘 기술을 위하여 "U"를 발전기 중 최대용량 제약조건을 위반한 발전기의 출력을 상한에 고정시킨 발전기들의 집합으로 정의하고, "L"를 발전기 중 최소용량 제약조건을 위반한 발전기의 출력을 하한에 고정시킨 발전기들의 집합으로 정의한다. 주의할 것은 초기해는 발전기 용량을 검사하여 위반사항을 제거 한 것으로 가정한다. 알고리즘이 진행되는 동한 집합 "U"와 "L"은 중간해가 변경됨에 따라 상응하는 요소로 대치된다. 새로운 반복계산을 위해 발전용량의 상하한을 위반한 발전기는 해를 상하한에 고정하고 새로운 해를 계산한다. 즉, 집합 "U"와 "L"을 고정하고 그 외의 발전기의 출력점을 조정하는 것이다. 수학적으로 다음 식을 가우스 소거법에 의하여 계산한다.

$$L_i \times (C_{i1} + 2.0 C_{i2} P_{Gi}) = \lambda \tag{3}$$

단, $i=1,2,\ldots,NG,\ i\notin L,\ i\notin U$

$$\sum_{i=1,\, i\notin L,\, i\notin U}^{NG} P_{Gi} + \sum_{i\in L,\, i\in U} P_{Gi} = P_D + P_L$$

여기서, C_{i1}, C_{i2}, L_i, P_D, P_L, (P_{Gi}, 여기서 $i\in L$, $i\in U$)는 상수(알려진 값)이며, λ와 (P_{Gi}, 단, $i=1,2,\ldots,NG,\ i\notin L, i\notin U$)는 변수(미지수)이다.

위의 식 (3)에서 $(NG-n(U)-n(L)+1)$개의 변수는 $(NG-n(U)-n(L)+1)$개의 수식으로부터 계산이 가능하다. 페널티 팩터는 조류계산의 최신정보를 이용하여 매 반복계산 시 보완된다. 알고리즘이 수렴했을 때 상하한에 고정된 발전기의 운전점이 필요조건을 만족하는지 검사가 필요하다. 자세한 알고리즘은 다음과 같다.

<u>송전손실과 발전기 용량을 고려한 경제급전 알고리즘</u>

1) 발전기 용량제약조건을 위반하지 않은 초기해로 부터 자코비안의 전치행렬과 계통의 위상각을 갖고 시작한다.
2) 식(2)을 이용해 페널티 팩터($L_i^{(0)}$)를 구한다. 여기서 아래첨자는 모선을 의미하고 위 첨자는 반복횟수를 나타낸다.
3) $P_{Gs}\geq P_{Gs}^{\max}$면 $P_{Gs}=P_{Gs}^{\max}$ 그리고 $s\in U$. $P_{Gs}\leq P_{Gs}^{\min}$면 $P_{Gs}=P_{Gs}^{\min}$ 그리고 $s\in L$. (슬랙 모선에 대하여 발전기 용량 상하한을 검사하여 위반된 경우 한계점에 고정시키고 고정된 집합에 첨가한다.)
4) 반복 횟수를 k라 하고 k=1로 시작한다.
5) 새로운 운전점 P_{Gi}를 다음 식을 이용해 계산한다:

$$L_i^{(k-1)} \times IC_i = \lambda^k \text{ for } i=1,2,\ldots,NG,\ i\notin L,\ i\notin U$$

$$\sum_{i=1,\, i\notin L,\, i\notin U}^{NG} P_{Gi} + \sum_{i\in L,\, i\in U} P_{Gi} = P_D + P_L$$

여기서, 집합 "U"와 "L"에 속한 발전기의 운전값은 상수이다.

6) 새로운 해에 대해 발전용량 제약조건을 검사한다, 제약조건에 대해 위반사항이 없을 시 7)항으로 이동한다. 제약조건에 대해 위반사항이 발견되면, 위반사항에 상응하는 발전용량의 상하한에 그 값을 고정한다. 즉, $P_{Gi}>P_{Gi}^{\max}$면 $P_{Gi}=P_{Gi}^{\max}$, $i\in U$. $P_{Gi}<P_{Gi}^{\min}$면 $P_{Gi}=P_{Gi}^{\min}$, $i\in L$. 현재의 P_{Gi}를 이용해 조류계산을 수행하고 계통의 위상각과 총 송전손실을 계산하고 자코비안 전치행렬을 갱신한다. 그리고 식(2)을 이용하여 새로운 페널티 팩터($L_i^{(new)}$)를 구하고 반복횟수 k번째의 패널티 팩터를 다음과 같이 갱신한다. $L_i^{(k)}=L_i^{(k-1)}+\alpha(L_i^{(new)}-L_i^{(k-1)})$ 여기서, α는 0.5이다. 반복횟수를 증가시킨다(k=k+1). 5)항으로 이동한다.
7) 현재의 P_{Gi}를 이용해 조류계산을 수행하고 계통의 위상

각과 총 송전 손실을 계산하고 자코비안 전치행렬을 갱신한다. 그리고 식 (2)를 이용하여 새로운 페널티 팩터 ($L_i^{(new)}$)를 구한다. 제약조건을 만족하는 발전 운전점 (i.e. $P_{Gi}^{\min} < P_{Gi} < P_{Gi}^{\max}$)에 대해 등증분 연료비를 찾는다. ($\lambda^{(k)} = L_i^{(k)} \times IC_i$)

8) 다음의 필요조건을 검사한다:

$P_{Gi}^{\min} < P_{Gi} < P_{Gi}^{\max}$에 대해 $\lambda^{(k)} = L_i^{(k)} \times IC_i$

$P_{Gi} = P_{Gi}^{\max}$에 대해 $L_i^{(k)} \times IC_i \le \lambda^{(k)}$

$P_{Gi} = P_{Gi}^{\min}$에 대해 $L_i^{(k)} \times IC_i \ge \lambda^{(k)}$

9) 필요조건을 모두 만족하면 결과물을 출력한다. 필요조건을 만족하지 못하면 10)항으로 이동한다.

10) $P_{Gi} = P_{Gi}^{\max}$에 대해 $L_i^{(k)} \times IC_i > \lambda^{(k)}$이면, 발전기 i 를 상한에 고정시킨 발전기의 집합 "U"로부터 삭제하고 발전량을 상한에서 미세한 값을 빼서 자유도를 제공한다. ($P_{Gi} = P_{Gi}^{\max} - \varepsilon$). $P_{Gi} = P_{Gi}^{\min}$에 대해 $L_i^{(k)} \times IC_i < \lambda^{(k)}$이면, 발전기 i 를 하한에 고정시킨 발전기의 집합 "L"로부터 삭제하고 발전량을 하한에 미세한 값을 더해서 자유도를 제공한다. ($P_{Gi} = P_{Gi}^{\min} + \varepsilon$). 반복횟수를 증가시킨다.(i. e. k=k+1). 5)항으로 이동한다.

알고리즘이 초기부터 6)항까지 발전기 용량에 대해 위반사항이 없는 경우, 7)항에서 k번째의 조류계산해로부터 페널티 팩터와 증분비용 곡선을 계산한다. 7)항에서 페널티 팩터가 갱신되었기 때문에 8)항에서 통상 최적해의 필요조건이 만족되지 않는다. 예를 들어 발전기 용량의 상한에 고정되어 변화하지 않은 경우, 필요조건인 $L_i^{(k)} \times IC_i < \lambda^{(k)}$식을 만족하지 못할 수 있다. 하한에 고정된 경우도 비슷하게 필요조건을 만족하지 못할 수 있다. 이 경우에 발전기의 운전점은 하한 및 상한으로부터 발전기 용량의 범위 안으로 갱신되어야 하고, 집합 U와 L로부터 삭제되고, 5)항에서 10)항까지 필요조건이 만족 할 때까지 반복해야 한다.

3.3 제 3 단계 알고리즘 및 제 4 단계 알고리즘

제 2 단계에서 발전용량과 송전손실과 조류방정식의 제약조건이 고려되었다. 제 3 단계에서는 송전선로의 용량 및 기타 제약조건의 위반사항을 점검하여 제거한다. 특히 송전선로용량을 위반한 경우 참고문헌 [12][13]의 방법인 한 쌍의 발전기의 출력을 조정하여 신속히 송전선로용량의 허용 범위 안으로 송전선로 전류를 조정한다. 선로용량의 위반을 제거하기 위해서는 각 선로에 대해 발전기와의 민감도 계산이 선행되어야하며, 민감도가 우선한 발전기 쌍에 대한 한 발전기는 출력을 올리고 다른 발전기는 출력을 내리는 방법으로 송전선로용량 제약을 만족시킬 수 있다. 여러 개의 발전기를 이용하면 보다 경제적인 송전선로 용량 제약을 만족시키는 해를 구할 수 있지만 연산의 부담이 존재한다. 제 3 단계에서는 제약조건을 만족하는 해를 찾는 것이 목적이므로 간결성이 우선 된다 하겠다. 최적의 해는 제 4 단계에서 고려하므로 모든 가능한 발전기 집합으로부터 해를 구할 필요는 없다. 제 3 단계까지의 알고리즘은 최적화 문제의 크기가 매우 작아 연산이 고속으로 수행되는 장점을 갖고 있다. 즉, 본 알고리즘은 최적해 근처에 고속으로 접근하여 제 4 단계에서의 연산 부담을 줄이는 것이다. 따라서, 다양한 제약조건을 고려 할 때, 단계적으로 제약조건을 첨가함으로써 제약조건의 추가에 따른 최적화 문제의 규모가 커지는 부담을 경감 할 수 있다.

그 다음 제 4 단계는 제 3 단계의 해를 초기해로 모든 제약조건을 포함한 선형화된 최적화문제를 부분분할 방법을 선형 프로그래밍방법으로 푼다. 부분분할 효과는 참고문헌[2]에 상세한 설명과 분석이 제시되어 있으며, 부분분할 방법은 분할된 유효전력부분의 자코비안 행렬을 이용해 선형계획법으로 연속적인 해를 구하면서 중간에 조류계산을 수행하여 그 오차를 제거한다. 제4단계에서는 일반적인 선형계획법과 같은 방법으로 최적조류계산 문제를 해결한다. 즉, 본 논문에서 제안한 알고리즘은 최적해에 근사한 초기해로부터 최적해를 찾는 것이다. 기존의 선형계획법에 기초한 알고리즘이 체계화되지 못한 초기해 선정 방안을 체계화하였다. 샘플계통의 모의에서는 초기해 선정이 매우 간단하지만 대규모 계통의 초기해 선정은 쉽지 않기 때문이다. 또한 동시에 풀어서 나오는 해와 다단계 과정을 풀어서 나오는 해가 같다는 것은 매우 명백하다. 왜냐하면, 제 4 단계에서 기존의 선형계획법과 같은 방법으로 모든 제약조건을 고려하여 쿤터커 조건을 만족하는 유일해를 찾아내기 때문이다. 선형화계획법은 중간해에서 매번 선형화되며 각 변수는 선형화 에러 범위에서 상하한을 정하게 된다. 목적함수의 경우 발전 운전점에서 선형화하여 1차 방정식에 운전값을 곱하여 얻어진다. 일부 상용 소프트웨어에서는 2차 함수를 조각 선형화하여 이용하는데 연산시간 개선에 큰 도움이 되지 못한다. 최적조류계산의 연산시간은 선형계획법의 반복횟수가 지배하는데, 최적해에서 초기해가 멀리 있는 경우 반복횟수가 증가하는 문제가 있다. 또한, 선형화계획법으로 문제를 풀 때 상하한의 범위를 크게 하면 연산속도를 개선할 수 있지만, 선형화 오차로 인한 프로그램의 강인성에 영향을 주거나 결과의 정확성에 영향을 줄 수 있어 세심한 고려가 필요하다. 선형화 프로그래밍방법의 정식화 및 상세 알고리즘은 참고문헌 [8]에 제시된다.

4. 사례 연구

제안한 알고리즘은 MIPS RISComputer RC3230 시스템에서 IEEE 계통 및 EPRI 시나리오 계통에 대하여 사례연구를 수행하였다. 프로그램 중 사용되는 선형계획법은 IMSL의 서브루우틴을 사용하였다. 제안된 알고리즘은 발전기의 상하한과 변압기 탭과, 송전용량과 슬랙 모선의 전압크기 등에 대하여 제약조건을 갖고 있지만, 사례연구의 간결성을 위하여 조류계산과 발전기 상하한과 송전용량을 제약조건으로 두었다.

사례연구 대상인 IEEE 계통 및 EPRI 시나리오 계통[14]에 대한 모선 수, 선로 수, 연산시간, 수렴조건, 선형계획법을 위한 발전량 스텝의 크기, 선형계획법의 반복 수, 총 발전비용이 표 2에 제시되며, 여기서 연산시간은 C.P.U.의 사용시간(초)이며, 총 발전비용의 단위는 $/hr. 이다. 제 4 단계에서의

표 2 IEEE 및 EPRI 시나리오 시스템에 대한 사례연구

Table 2 Numerical results for IEEE Systems and EPRI Scenario Systems

	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
	ΔP_G(*per unit*)	0.030	0.096	0.110	0.159	0.133	0.200	0.159
	수렴조건($)	0.008	0.119	0.404	6.991	2.207	5.172	4.178
이단계 방법	연산시간	3.71	17.94	525.47	625.37	480.5	482.22	211.55
	선형계획법 반복수	15	17	73	55	41	24	20
	총송전손실(MW)	9.90	30.69	76.19	642.09	367.10	573.28	294.27
	총발전비용($/hr)	803.71	11878.76	35055.43	697797.34	219513.45	513139.00	417612.16
제안된 방법	연산시간	1.87	12.32	156.34	112.94	151.90	354.90	52.24
	선형계획법 반복수	5	10	19	9	12	17	4
	총송전손실(MW)	10.13	30.53	77.06	643.81	356.96	570.85	295.29
	총발전비용($/hr)	803.95	11880.51	35058.15	697740.83	219380.86	513146.18	417630.82
	총발전비용 차이	0.03%	0.02%	0.01%	0.01%	0.06%	0.00%	0.00%
	연산속도 개선율	1.98	1.46	3.36	5.53	3.16	1.36	4.05

수렴조건은 제 2 단계의 총 발전비용의 0.001%이다. 제안된 방법의 연산시간 개선은 이단계방법[8]과 비교한 연산속도 개선율로 나타내며 그 정의는 다음과 같다.

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

총 발전비용의 정확성과 연산속도의 개선 정도는 표 2에 제시되었으며, 계통이 커질수록 연산 속도 개선이 우수함을 보인다. IEEE 118 모선 계통의 경우 2분 36초가 소요되며 대규모 실 계통에서 더욱 개선된 결과가 예상된다.

송전선로용량이 초과된 사례는 IEEE 30 모선 계통에서 2 선로에서 발생되었다. 이 경우, 모선 3번과 4번 사이의 선로에서 송전선로 용량의 9.3%를 초과하였으며, 모선 2번과 5번 사이의 선로에서 송전선로 용량의 9.9%를 초과하였다. 송전선로 용량을 초과된 선로의 제약조건을 만족시키기 위해 오프 라인에서 미리 계산된 각 선로에 대한 발전기 쌍의 선로 전류 민감도를 사용한다. 각 선로에 대해 가장 민감도가 높은 발전기 쌍은 (1, 13)과 (2, 5)을 사용하여 송전선로 용량의 초과분을 상한 용량에 조정한다[13].

5. 결 론

본 논문은 이단계 계층 알고리즘을 다단계 계층 알고리즘으로 개선 발전시켜 고속 유효전력 최적조류계산기법을 제시한다. 제안된 방법은 제 4 단계의 계층으로 구성되며 초기 제 2 단계에서 최적해 근방을 찾고, 제 3, 4 단계에서 모든 제약조건을 고려하여 최적해를 찾을 때까지 선형계획법을 반복하여 수행한다. 제안된 방법은 IEEE 및 EPRI계통에 대해 사례연구를 수행하여 기존의 이단계 계층 알고리즘과 비교하여 연산속도를 평균 2.99배 개선하였다. 향후, 지리적으로 광범위하게 분포한 대규모 전력계통의 최적화 문제에 본 논문에서 제시한 계층기법과 병렬/분산연산 처리기법을 적용하면 정보처리 기술의 발전과 더불어 최적조류계산의 연구분야발전에 크게 기여 할 것으로 기대된다. 또한, 계통의 안정도와 연계한 제약조건에 대한 고려가 요구된다. 전력시장의 변화와 더불어 다양한 시장 참여자의 이익을 극대화를 위한 최적조류기법의 개발이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 계명대학교 비사연구기금으로 이루어졌음.

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] Kyung-Bin Song, Jin-Boo Choo, Dong-Hoon Jeon, and Si-Woo Park, " An Analysis of Decoupling Effects in Optimal Power Flow Problems," International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, Seoul, Korea, July 1997.

[3] J. Antonio, W. Tsai and G. Huang, "A Highly Parallel Algorithm for Multistage Optimization Problems and Shortest Path Problems," Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol. 12, No. 3, pp. 213--222, 1991.

[4] J. Antonio, G. Huang and W. Tsai, "A Fast Distributed Shortest Path Algorithm for a Class of Hierarchically

Structured Data Networks," in IEEE Transactions on Computers, Vol. 41, No. 6, pp. 710--724, June 1992.
[5] W. K. Tsai, G. Huang, J. Antonio, and W.T. Tsai, "Distributed Iterative Aggregation Algorithms for Box-Constrained Minimization Problems and Optimal Routing in Data Networks," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 34, No. 1, pp. 34--46, January 1989.
[6] Balho H. Kim and Ross Baldick, " Coarse-Grained Distributed Optimal Power Flow." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 932--939, May 1997.
[7] Richard D. Christie, Bruce F. Wollenberg, and Ivar Wangensteen, " Transmission Management in the Deregulated Environment." Proceedings of the IEEE, Vol. 88, No. 2, pp. 170--195. February 2000.
[8] G. Huang and K. Song, "A Simple Two Stage Optimization Algorithm for Constrained Power Economic Dispatch," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 1818--1824, November 1994.
[9] F. L. Alvarado, "Penalty Factors from Newton's Method," IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-97, No. 6, pp. 2031--2037, November/December 1978.
[10] H. H. Happ, "Optimal Power Dispatch," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 3, pp. 820--830, May/June 1974.
[11] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control," Power Technologies, Inc. Schenectady, New York and Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York, 1983.
[12] 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.
[13] J. Zaborszky, G. Huang and S. Y. Lin, "Reactive and Real Power Control for Computationally Effective Voltage and Thermal Management," IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-104, No. 7, pp. 1728--1737, 1985
[14] "Synthetic Electric Utility Systems for Evaluating Advanced Technologies," EPRI EM-285, Final Report, February 1977.

저 자 소 개

송 경 빈 (宋 敬 彬)

1963년 9월 15일 생. 1986년 연세대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 텍사스 A&M 전기공학과 졸업(공박). 1995년-1996년 LG-EDS 시스템 전문과장. 1996년-1998년 한전 전력연구원 선임연구원. 1998년-2000년 대구효성가톨릭대 전임강사. 현재 계명대 공학부 전임강사.

Tel : 053-580-5926

E-mail : kbsong@kmu.ac.kr