

수학적 분할 기법을 이용한 분산처리 최적조류계산의 수렴속도 향상에 관한 연구

論 文

50A-3-3

On the Convergence Rate Improvement of Mathematical Decomposition Technique on Distributed Optimal Power Flow

許 焜* · 朴鍾根** · 金發鎬***

(Don Hur · Jong-Keun Park · Balho H. Kim)

Abstract - We present an approach to parallelizing optimal power flow that is suitable for distributed implementation and is applicable to very large interconnected power systems. This approach can be used by utilities to optimize economy interchange without disclosing details of their operating costs to competitors. Recently, it is becoming necessary to incorporate contingency constraints into the formulation, and more rapid updates of telemetered data and faster solution time are becoming important to better track changes in the system. This concern led to a research to develop an efficient algorithm for a distributed optimal power flow based on the Auxiliary Problem Principle and to study the convergence rate improvement of the distributed algorithm. The objective of this paper is to find a set of control parameters with which the Auxiliary Problem Principle (Algorithm - APP) can be best implemented in solving optimal power flow problems. We employed several IEEE Reliability Test Systems and Korea Power System to demonstrate the alternative parameter sets.

Key Words : Optimal Power Flow (OPF), Auxiliary Problem Principle (APP), Convergence Rate, Distributed OPF

1. 서 론

최근 전력산업의 규모가 점차 방대해지고 복잡·다양해짐에 따라 사업의 독점과 규제에 따른 비효율성 및 비경제성의 문제가 대두되었으며, 이에 대한 대안으로 경쟁과 선택이라는 시장 원리를 전력사업에 적용하기 위한 많은 연구가 수행되었다. 그 결과 독점 형태로 운영되던 전력산업에도 다수의 시장 참여 및 소비자의 선택권 확보를 통한 경쟁체제의 도입 방안이 제시되었다. 이러한 경쟁 체제의 도입은 최근 전력산업의 구조개편을 단행하여 전력시장의 자유화를 도입한 영국, 미국 등 여러 나라의 예를 통하여 과거의 수직독점체제보다 더욱 효과적이라는 사실이 입증되고 있다. 경쟁 개념이 도입된 전력계통에서 경제성과 안전도와 관련하여 해결되어야 할 문제들은 상당히 많다. 그러나 전력계통 규모의 확대와 인근 계통과의 연계 등으로 그 문제들의 복잡성은 더욱 심화되어 가고 있으며, 이러한 대형 연계 계통의 문제를 분석하는 것은 매우 어려운 것이 사실이다. 지난 수십 년 간 전력계통의 안전하고 경제적인 최적 운용에 관한 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되어 온 결과 최적화 기법 및 제어 기법, 모델링 기법 등이 등장하게 되었다[1]. 특히 1960년대에 등장한 최적조류계산은 전력계통의 운용

및 계획 분야에서 그 유용성이 상당한데, 계통의 운용 분야에 있어서 최적조류계산은 온라인 및 오프라인 연구에 활용될 수 있으며, 계획 분야에 있어서는 송전계통 계획 및 무효전력 보상장치 설치 결정 등에 적용될 수 있다.

최적조류계산은 전력계통의 운용 및 물리적 특성에 의해 발생하는 여러 제약조건을 만족시키면서 주어진 목적함수의 최적값을 구하는 다양한 종류의 비선형 문제를 총칭하는 용어이다. 가장 일반적인 최적조류계산의 형태는 각 발전기의 출력 제약 및 유효전력과 무효전력의 수급제약 조건을 만족시키면서 전체 발전기의 총 연료비용을 최소화하는 것이다. 이러한 기존의 연구 영역 외에도 최적조류계산은 전력 탁송 문제 해결의 기술적 기반을 제공할 뿐만 아니라 송전선 서비스 사용료의 계산[2] 등에도 적용 가능하므로 전력산업의 구조 개편 이후에도 활발한 연구가 진행될 것으로 보인다.

본 논문에서는 최적조류계산 문제의 해를 구하기 위해 사용된 기존의 방법들이 가지고 있는 근사화 과정에 의한 오차 발생, 막대한 계산시간 필요, 최적해로의 수렴 보장 어려움 등의 문제점을 해결하기 위해 전체 문제를 지역적으로 구분하여 문제를 분산화(distributed)하고, 지역으로 나누어진 문제를 풀기 위한 병렬처리 알고리즘으로 Auxiliary Problem Principle을 제시하였다[3]. 또한 분산·병렬처리 방법을 적용하는데 있어서 Auxiliary Problem Principle 알고리즘 내의 계수 사이의 관계를 적절히 설정하면 도출된 해의 수렴속도를 향상시킬 수 있다는 결론을 얻었다.

먼저 2장에서는 기존 AC-최적조류계산의 정식화 및 수학적 모델링을 제시하고, 다음 3장에서는 Auxiliary Problem Principle(APP) 알고리즘을 이용하여 상정사고를 고려하지

* 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 博士課程

** 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 弘益대 工大 電子電氣工學部 助教授 · 工博

接受日字 : 2000年 11月 6日

最終完了 : 2001年 3月 13日

않은 분산처리 최적조류계산(Non-Contingency Constrained Optimal Power Flow)을 어떠한 방식으로 모델링할 수 있는가에 대해서 설명한다. 4장에서는 3장에서 모델링한 방법에 의해 IEEE 계통과 우리나라 계통에 적용하여 분산처리 알고리즘의 유용성에 관해 알아보고, 분산·병렬처리 알고리즘의 수렴속도를 향상시킬 수 있는 Auxiliary Problem Principle 내의 계수 사이의 상관 관계를 각 지역을 연결하는 연계선의 개수, 분할된 지역의 수, 각 지역 내의 모선 수준의 함수로 표현된 식을 도출한다. 마지막으로 5장은 결론 부분으로 본 논문의 요약과 더불어 향후 최적조류계산의 응용분야 등에 대해서 정리한다.

2. 최적조류계산의 개요

2.1 최적조류계산 문제의 정식화

최적조류계산 문제는 전력조류 방정식과 부등식 제약조건 및 안전 제약조건을 만족하면서 유효전력의 발전비용을 최소화하는 문제로 정의할 수 있다. 수학적으로는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \underset{Z}{\text{Min}} f(Z) \\ & \text{s.t. } \begin{cases} g(Z) = 0 \\ h(Z) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, Z 는 제어변수(control variable)와 상태변수(state variable)를 포함하는 결정변수들의 집합이다.

즉, $Z=[U \ X]^T$ 으로 표현되고, U 는 제어변수의 집합, X 는 상태변수의 집합을 의미한다. 최적조류계산 문제에서의 제어변수는 제약조건을 만족하고 주어진 목적함수를 최적화하기 위해서 조정할 수 있는 변수를 가리킨다. 예를 들어 최적조류계산에서의 제어변수는 다음과 같다.

- 제어가능한 발전기의 유효전력 발전,
- 무효전력 발전,
- 변압기의 변압비,
- 병렬 커패시터 또는 리액터,
- 발전기 모선 전압,
- 부하 감소 및 차단

최적조류계산의 문제 형태에 따라 제어변수는 위의 변수들 중에서 선택적으로 사용된다. 반면에 최적조류계산 문제에서 제어변수를 제외한 모든 변수는 상태변수로 규정된다. 주요 상태변수는 모선의 전압 크기와 위상각이다. 대부분의 상태변수는 연속이지만 국부적으로 동작되는 변압기의 경우에는 이산 변수의 특징을 지닌다. (1) 식에서 $f(\cdot)$ 는 목적함수를 나타낸다. 이 목적함수는 제어변수와 상태변수로 이루어진 스칼라 함수 또는 스칼라 함수의 합으로 나타낼 수 있다. 가장 일반적인 형태의 목적 함수는 유효전력 발전과 관련된 운전비용의 최소화이다. 또한 유효전력 손실 최소화, 부하 차단 최소화, 비상시 경제급전 등과 같은 목적함수도 생각할 수 있다. (1) 식에서 $g(\cdot)=0$ 은 등식 제약조건으로서 전력조류 방정식을 의미한다. 그리고 $h(\cdot)\leq 0$ 은 부등식 제약조건으로서 계통 운용과 관련된 유효전력과 무효전력의

출력 상·하한, 선로의 열용량 제약, 각 모선의 전압과 관련된 제약 및 지역간 전력조류 제약 등이 포함된다. 위에서 살펴본 바와 같이 최적조류계산은 수많은 변수와 제약조건으로 이루어져 있으며, 최적조류계산의 해를 구하는 방법 역시 수없이 많이 존재한다. 따라서 문제의 형태에 따른 적절한 정식화 및 풀이 해법을 찾는 것이 무엇보다 중요하다.

다음 절에서는 본 논문에서 사용된 AC-최적조류계산의 정식화에 필요한 기호 및 모델링을 정리해 본다.

2.2 AC-최적조류계산의 수학적 모델링

2.2.1 기호

· 집합

- I 모선 묶음
- M_i 모선 i 에 있는 발전기 묶음

· 첨자

- i, j 모선 번호
- l 송전선 번호
- m 발전기 번호

· 파라미터

- PL_i 모선 i 에서의 유효전력 수요
- QL_i 모선 i 에서의 무효전력 수요
- G_l 선로 l 의 컨덕턴스
- B_l 선로 l 의 서셉턴스
- B_{cap} 선로 l 의 병렬 커패시턴스
- TP_l 선로 l 에서 유효 전력의 최대 송전 용량
- TQ_l 선로 l 에서 무효 전력의 최대 송전 용량

· 변수

- PG_{im} 모선 i 에 있는 발전기 m 의 유효전력 출력
- QG_{im} 모선 i 에 있는 발전기 m 의 무효전력 출력
- PF_{ij} 모선 i 에서 모선 j 로 흐르는 유효전력 조류량
- QF_{ij} 모선 i 에서 모선 j 로 흐르는 무효전력 조류량
- θ_i 모선 i 의 위상각
- V_i 모선 i 의 전압 크기
- f_{im} 모선 i 에 있는 발전기 m 의 발전 비용

2.2.2 정식화

· 목적 함수 :
$$\text{Min } F = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} f_{im} \quad (2)$$

· 연료 비용 함수 $\forall m \in M_i$:

$$f_{im} = a_{im} + b_{im} \cdot PG_{im} + c_{im} \cdot PG_{im}^2 \quad (3)$$

단, a_{im}, b_{im}, c_{im} 은 비용 함수와 관련된 계수이다.

· 유효 전력 수급 균형 제약 $\forall i \in I :$

$$\sum_{m \in M_i} PG_{im} + \sum_{j \in I} PF_{ij} = PL_i \quad (4)$$

· 무효 전력 수급 균형 제약 $\forall i \in I :$

$$\sum_{m \in M_i} QG_{im} + \sum_{j \in I} QF_{ij} = QL_i \quad (5)$$

· 유효전력 조류 방정식 모선 i 와 j 를 연결하는 $\forall l$ 에 대해서 :

$$PF_{ij} = V_i V_j \{ -G_l \cos(\theta_i - \theta_j) + B_l \sin(\theta_i - \theta_j) \} + V_i^2 G_l \quad (6)$$

· 무효전력 조류 방정식 모선 i 와 j 를 연결하는 $\forall l$ 에 대해서 :

$$QF_{ij} = -V_i V_j \{ G_l \sin(\theta_i - \theta_j) + B_l \cos(\theta_i - \theta_j) \} + V_i^2 (B_l - B_{cap}/2) \quad (7)$$

· 유효전력 송전 용량 제약 모선 i 와 j 를 연결하는 $\forall l$ 에 대해서 :

$$PF_{ij} \leq TP_l \quad (8)$$

· 무효전력 송전 용량 제약 모선 i 와 j 를 연결하는 $\forall l$ 에 대해서 :

$$QF_{ij} \leq TQ_l \quad (9)$$

· 발전기의 유효전력 출력 제약 $\forall m \in M_i :$

$$PG_{im}^{\min} \leq PG_{im} \leq PG_{im}^{\max} \quad (10)$$

· 발전기의 무효전력 출력 제약 $\forall m \in M_i :$

$$QG_{im}^{\min} \leq QG_{im} \leq QG_{im}^{\max} \quad (11)$$

· 모선 전압 제약 $\forall i \in I :$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (12)$$

3. 분산처리 최적조류계산의 구현

3.1 분산처리 최적조류계산 문제의 개요

분산처리 최적조류계산에서는 각 발전회사가 자신만의 서비스 지역과 다른 발전회사와 공유하는 경제지역을 포함하는 영역에 대해 기존의 방식과는 다른 수정된 최적조류계산을 제안한다. 수정된 최적조류계산은 공통 모선에서 모델링된 가상의 발전기를 제외하고는 기존의 최적조류계산과는 크게 달라진 점이 없다. 이 내용에 대해서는 다음 절에서 상세히 다루도록 하겠다.

분산처리 최적조류계산의 구현을 위해서는 전체 계통을 지역별로 나누는 작업이 필요하다. 이 때 분산처리 계산속도를 향상시키기 위해서는 지역 사이의 결합을 최소화하여 문제를 푸는 것이 가장 바람직하다. 즉, 지역을 정의하는 선로의 절단집합들 중에서 송전선의 개수가 최소가 되도록 전체 계통을 나누는 것이 가장 바람직하다. 다음 그림 1이 이것을 설명해 준다. 그림 1과 같이 지역 a, b 가 있는 경우 그림 (a)는 두 지역과 관련된 송전선이 2개인 반면, 그림 (b)는 두 지역 간에 결합된 송전선이 모두 6개이다. 또한 그림 (a)는 2개의 공통 모선이 포함되어 있고, 그림 (b)는 3개의

공통 모선을 포함하고 있다. 따라서 그림 (a)와 같은 지역 분할 방법이 더 바람직하다고 볼 수 있다.

일반적으로 이와 같은 지역 분할 방식은 다수의 전력회사가 존재하는 경우 각각의 전력회사별로 나누는 것과 일치한다. 왜냐하면 각 전력회사의 내부에는 복잡한 송전망 시스템을 갖추고 있지만, 외부적으로 보면 방사상으로 연결되어 있거나 상대적으로 거의 연결되어 있지 않은 경우가 대부분이기 때문이다. 요약하면 우리의 병렬체계의 가장 효과적인 구현은 전력회사의 서비스 지역에 따라 나누는 가장 일반적인 방식과 일치한다. 또한 우리의 병렬체계에서는 모든 발전회사마다 동일한 최적조류계산을 수행할 필요가 없으며, 각 지역을 가상의 발전기로 등가화 할 수만 있다면 전체 계통 내의 모든 발전기에 대해 최적조류계산을 수행할 필요가 없이 각 전력회사는 자신의 영역에 대해서만 최적조류계산을 수행하면 된다.

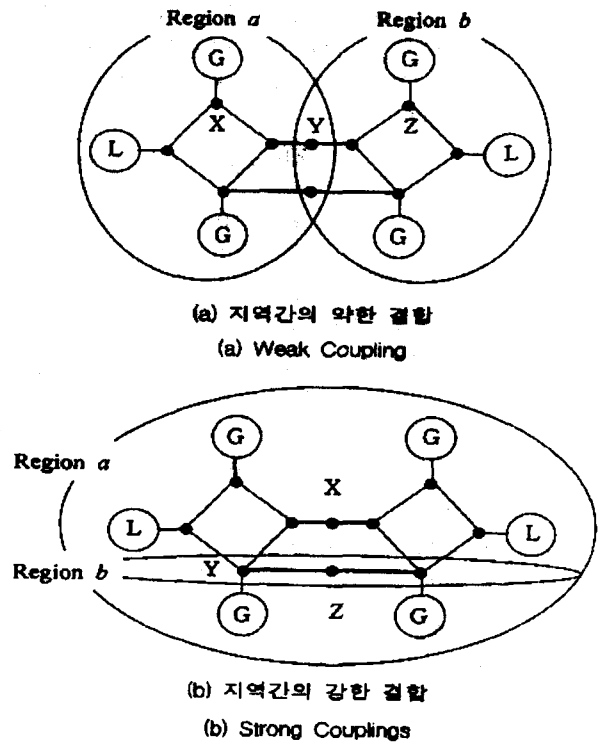


그림 1 지역 분할 방법
 Fig. 1 Illustration of regional decomposition

3.2 분산처리 최적조류계산 문제의 정식화[4]

지역 a 와 b 를 연결하는 하나의 연계선이 존재하는 경우인 그림 2를 생각해 보자. 분할된 두 지역 사이에는 경계변수 벡터 y 를 갖는 공통의 모선이 존재한다. 이 때 공통 부분에 있는 각 연계선마다 모선을 포함해야 하는데 만약 모선이 없을 경우에는 가상의 모선을 임의로 만든다. 따라서 전체 계통은 다음과 같이 분리될 수 있다. 지역 a 는 a 지역만의 자체변수 x 와 경계변수 y 로, 지역 b 는 b 지역만의 자체변수 z 와 경계변수 y 로 표현할 수 있게 된다. 그리고 나서 분산처리 알고리즘인 Auxiliary Problem Principle을 구현하기

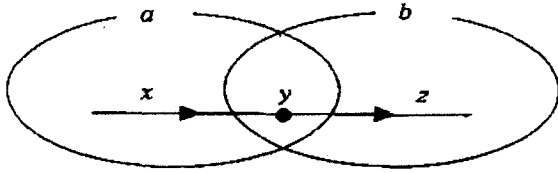


그림 2 전력계통의 지역 분할

Fig. 2 Decomposition of a power system into two overlapping regions a and b

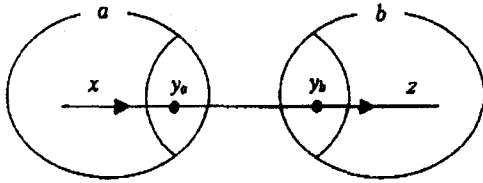


그림 3 경계변수의 복제

Fig. 3 Duplication of the border variables

위해 공통 모선과 경계변수 y 를 그림 3과 같이 복제하여 지역 a 는 a 지역만의 자체변수 x 와 경계변수 y 를 복제한 y_a 로, 지역 b 는 b 지역만의 자체변수 z 와 경계변수 y 를 복제한 y_b 로 표현한다.

위에서 정의된 변수에 따라 우리는 최적조류계산에 있어서 가장 일반적인 목적함수인 발전비용 최소화를 생각해 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min_{(x, y) \in A, (y, z) \in B} \{C_a(x) + C_b(z)\} \quad (13)$$

여기서, 비용함수 C_a 와 C_b 는 각 지역의 실제 비용함수에 대한 2차 근사화 형태이고, 식 (13)에는 유일한 해가 존재한다고 가정한다[5]. 경계변수 y 를 복제하고 두 경계변수 사이의 제약조건을 추가함으로써 식 (13)은 다음 식 (14)와 같은 형태로 변형할 수 있다.

$$\min_{\substack{(x, y_a) \in A \\ (y_b, z) \in B}} \left\{ C_a(x) + C_b(z) + \frac{\gamma}{2} \|y_a - y_b\|^2 : y_a - y_b = 0 \right\} \quad (14)$$

식 (14)에서 추가된 2차 항은 $y_a - y_b = 0$ 이라는 제약조건으로 인해 주어진 문제의 어떠한 해에서든지 목적함수에 추가된 항을 0으로 만들기 때문에 식 (13)의 해와 같은 값을 가지게 된다. 문제를 (14)와 같은 형태로 바꾸어 풀게 되면 수렴성 향상에 커다란 이익을 얻게 된다[6]. 그러나 식 (14)와 같은 형태는 지역별로 분리해서 문제를 푸는 것이 불가능하다. 왜냐하면 $y_a^T y_b$ 라는 항이 존재하여 두 변수가

결합되기 때문에 이 항을 지역별로 나눈다는 것은 불가능하다. 따라서 우리는 이 문제를 해결하기 위해서 Auxiliary Problem Principle이라는 알고리즘을 도입하기로 한다[7, 8, 9]. Auxiliary Problem Principle은 다음과 같은 문제를 계산함으로써 식 (14)를 풀게 된다.

$$\begin{aligned} & (x^{k+1}, y_a^{k+1}, y_b^{k+1}, z^{k+1}) \\ &= \arg \min_{(x, y_a) \in A, (y_b, z) \in B} \{C_a(x) + C_b(z) \\ &+ \frac{\beta}{2} \|y_a - y_a^k\|^2 + \frac{\beta}{2} \|y_b - y_b^k\|^2 \\ &+ \gamma (y_a - y_b)^T (y_a^k - y_b^k) \\ &+ (\lambda^k)^T (y_a - y_b)\} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha (y_a^k - y_b^k) \quad (16)$$

여기서 윗첨자 k 는 반복계산 회수이고, α, β, γ 는 양의 상수이다. 반복 단계 k 에서의 라그랑지안 승수 λ_i 는 제약조건 $y_{ai} - y_{bi} = 0$ 을 만족시키기 위한 비용이 된다. 예를 들어, y_i 가 특정선로의 지역 a 에서 지역 b 로 흐르는 전력의 흐름을 나타낸다면 λ_i 는 그 선로의 전력 거래에 대한 잠재가 (shadow cost)로 볼 수 있다. 이와 같은 방식으로 문제를 변형하게 되면 각 지역별로 분산처리 최적조류계산을 수행하는데 별 어려움이 없다. 즉 분산화 계산을 목적으로 문제 (15)는 각각의 지역 a, b 에 대해서 다음과 같은 부분문제들로 분리할 수 있다.

$$(x^{k+1}, y_a^{k+1}) = \arg \min_{(x, y_a) \in A} \left\{ C_a(x) + \frac{\beta}{2} \|y_a - y_a^k\|^2 + \gamma y_a^T (y_a^k - y_b^k) + (\lambda^k)^T (y_a) \right\} \quad (17)$$

$$(z^{k+1}, y_b^{k+1}) = \arg \min_{(y_b, z) \in B} \left\{ C_b(z) + \frac{\beta}{2} \|y_b - y_b^k\|^2 - \gamma y_b^T (y_a^k - y_b^k) - (\lambda^k)^T (y_b) \right\} \quad (18)$$

식 (17)에서 $\frac{\beta}{2} \|y_a - y_a^k\|^2 + \gamma y_a^T (y_a^k - y_b^k) + (\lambda^k)^T (y_a)$ 항은 지역 a 의 공통 지역에 존재하는 가상 발전기들의 비용함수의 합으로 해석할 수 있다. 마찬가지로 식 (18)은 지역 b 의 발전비용의 합이라고 볼 수 있다.

3.3 분산처리 알고리즘 예제

그림 4와 같은 전체 계통의 부하가 1 p.u.인 3모선 계통을 생각해 보자. 계산의 편의상 모든 부하는 유효전력이라고 가정하고, 또한 모든 송전선로는 손실이 없다고 가정한다. 그리고 각 지역의 발전 비용함수는 다음과 같다.

$$C_a = \frac{1}{2} P_a^2 = \frac{1}{2} x^2 \quad (\text{발전기 } G_1 \text{에 대해서}) \quad (19)$$

$$C_b = P_b^2 = z^2 \quad (\text{발전기 } G_2 \text{에 대해서}) \quad (20)$$

모선 1의 부하는 0.5 p.u.이고 모선 3의 부하도 0.5 p.u.이다. 모선 2는 지역 a 와 b 의 공통 지역의 경계 모선이다. 이 예제의 경우에는 공통 모선에 있는 변수의 개수와 각 지역에 있는 모선의 변수의 개수가 같으므로 병렬처리로 문제를 풀었을 경우가 전체 계통을 한번에 풀었을 경우보다 계산시간이 더 길어질 것이라는 것을 쉽게 예상할 수 있다.

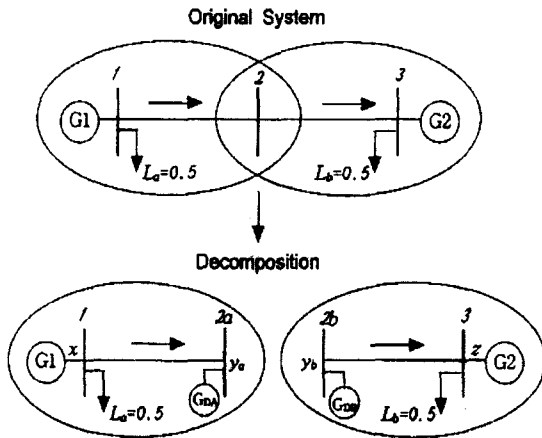


그림 4 분산처리 알고리즘 예제

Fig. 4 Example of distributed implementation

Auxiliary Problem Principle 알고리즘을 그림 4의 3모선 계통에 적용해 보면 다음과 같다.

단계 1 : 공통 모선의 복제

공통 모선 2를 복제하여 모선 2a와 모선 2b를 구성한다. 그리고 나서 모선 2a에 가상 발전기 GDA를, 모선 2b에 가상 발전기 GDB를 설정한다. 또한 공통 모선의 변수를 y라 하면 이것을 복제하여 모선 2a에는 ya라는 경계변수를, 모선 2b에는 yb라는 경계변수를 도입할 수 있다. 이 때, y라는 변수는 공통 모선 2를 통하여 흐르는 전력의 흐름으로 볼 수 있고, ya와 yb는 각각의 가상발전기의 발전량으로 해석할 수 있다.

단계 2 : 지역별 최적조류계산

각 지역별 최적조류계산은 식 (17)과 식 (18)의 정의에 따라 계산될 수 있다. 즉,

$$OPF_a \quad \min_{x+y_a=L_a} \left\{ \frac{1}{2} x^2 + \frac{\beta}{2} \|y_a - y_a^k\|^2 + \gamma y_a^T (y_a^k - y_b^k) + (\lambda^k)^T (y_a) \right\} \quad (21)$$

$$OPF_b \quad \min_{y_b+z=L_b} \left\{ z^2 + \frac{\beta}{2} \|y_b - y_b^k\|^2 - \gamma y_b^T (y_a^k - y_b^k) - (\lambda^k)^T (y_b) \right\} \quad (22)$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha (y_a^k + y_b^k) \quad (23)$$

단계 3 : 병렬 계산

(1) OPFa를 계산한다. 그러면 x^{k+1}과 ya^{k+1}의 해는 다음과 같다.

$$x^{k+1} = \frac{\beta \cdot (L_a - y_a^k) + \gamma \cdot (y_a^k - y_b^k) + \lambda^{k+1}}{1 + \beta}$$

$$y_a^{k+1} = L_a - x^{k+1}$$

(2) OPFb를 계산한다. 그러면 z^{k+1}과 yb^{k+1}의 해는 다음과 같다.

$$z^{k+1} = \frac{\beta \cdot (L_b - y_b^k) - \gamma \cdot (y_a^k - y_b^k) - \lambda^{k+1}}{2 + \beta}$$

$$y_b^{k+1} = L_b - z^{k+1}$$

(3) λ를 갱신한다.

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha (y_a^k + y_b^k)$$

(4) 허용 오차 범위를 만족할 때까지 (1)-(3) 과정을 반복한다.

상수 α=0.375, β=0.750, γ=0.375일 때 그림 4의 계통에 대한 계산 결과가 표 1에 제시되어 있다.

표 1 Auxiliary Problem Principle 알고리즘을 이용한 분산처리 결과 (그림 4의 계통에 대해)

Table 1 Distributed computation results using Algorithm-Auxiliary Problem Principle (in case of Fig.4)

k	x	z	ya	yb	λ ^{k+1}	λ ^k _a	λ ^k _b	ya-yb
0	.5000	.5000	.0000	.0000	.7500	.5000	1.0000	.0000
1	.6428	.4090	-.1428	.0909	.7305	.6428	.8181	.0519
2	.6818	.3701	-.1818	.1298	.7110	.6818	.7402	.0519
3	.6873	.3524	-.1873	.1475	.6961	.6873	.7048	.0398
4	.6838	.3438	-.1838	.1561	.6857	.6838	.6876	.0276
5	.6790	.3393	-.1790	.1606	.6788	.6790	.6787	.0183
:	:	:	:	:	:	:	:	:
12	.6667	.3333	-.1667	.1667	.6667	.6667	.6667	.0000

4. 사례 연구

4.1 사례 연구 대상 계통

Auxiliary Problem Principle 알고리즘을 이용하여 구현한 분산처리 최적조류계산의 수렴속도를 향상시키도록 APP 알고리즘 내의 계수 α, β, γ 사이의 관계식을 유도하는 것이 본 논문의 목적이다. 그러나 수렴속도 향상을 가져오는 α, β, γ 사이의 관계는 분할된 지역의 수, 연계선의 개수, 각 지역 내에 있는 모선의 수 등 여러 요소에 의해 달라질 수 있다. 따라서 이러한 요소들의 영향을 고려하여 다음과 같은 6개의 계통에 대해서 실험적으로 구한 식을 제시하고자 한다. 사례 연구에 사용된 계통들이 표 2에 정리되어 있다. 표 2의 세 번째 열은 사례 연구 계통의 전체 모선 수를 나타내고, 네 번째 열은 전체 계통을 분할했을 때 나누어진 지역의 수이며, 다섯 번째 열은 각 지역 내에 존재하는 그 지역 자체의 모선 수이다. 그리고 여섯 번째와 일곱 번째 열은 지역을 연결하는 연계선의 개수와 전체 선로의 개수를 나타낸다. 여기서 6번 계통은 우리나라의 1999년도 총 부하가 35,000MW일 때의 계통으로서 우리나라를 경인지역과 비경인지역 2개 지역으로 구분하였고, 연계선은 경인지역과 비경인지역을 연결하는 345kV 북상선로로 선정하여 사례 연구 대상으로 하였다. 그림 5는 2개 지역으로 분할된 우리나라 계통을 보여준다.

먼저, 표 2의 사례 연구 계통에 대해서 전체 계통을 분할하지 않고 한번에 푸는 중앙집중방식(Centralized)의 최적조류계산을 GAMS 2.25[10, 11]의 MINOS solver를 이용하여 풀었다. 그리고 이 계산 결과는 분산처리 최적조류계산의 계산시간과의 비교를 위해서 표 3, 4, 5에 제시하였다. 그리고 나서 우리는 분산처리 최적조류계산도 GAMS 2.25의 MINOS solver를 이용하여 수행하였다. 상정사고를 고려하지 않은 분산처리 최적조류계산의 목적함수는 식 (15)에 주어져 있다.

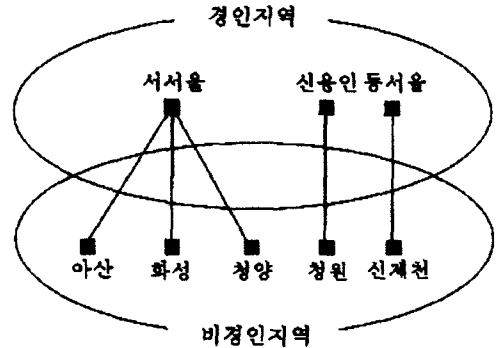


그림 5 2개 지역으로 분할된 우리나라 계통
Fig. 5 Korea power system divided into two regions

또한 식 (15)는 지역별로 나누어서 풀 수가 있는데 이때 각 지역의 목적함수는 식 (17)과 식 (18)과 같은 형태이다. 제약 조건으로는 각 발전기의 유효전력과 무효전력 출력의 상·하한 제약, 각 모선에서의 전압 제약(10% 여유), 각 송전선로의 열용량 제약 등을 포함하고 있다. 그리고 분산처리 최적조류계산은 지역 a 와 지역 b 의 공통 모선에서의 변수값, 즉 y_a 와 y_b 에 다음과 같은 $\|y_a - y_b\| \leq \epsilon$ 이라는 제약조건이 추가되고, 여기서 y_a 와 y_b 의 성분은 다음과 같다.

$$y_a = (p_a, q_a, v_a, \theta_a), \quad y_b = (p_b, q_b, v_b, \theta_b) \quad (24)$$

이 때, p, q, v, θ 는 각각 공통 모선을 복제하여 생성한 지역 a 와 지역 b 의 가상 모선에서의 유효전력 조류, 무효전력 조류 및 가상 모선에서의 전압의 크기 및 위상각을 의미한다. 그리고 식 (16)에서 제약 조건의 라그랑지안 승수[12]를 갱신하기 위해서 공통 지역에서의 가격정보는 인접 지역 간에 서로 교환된다.

표 2 사례 연구 계통

Table 2 Case study systems

데이터	번호	전체 모선수	분할된 지역의 수	각 지역 내의 모선 수	연계선의 개수	전체 선로 개수
IEEE	1	50	2	24, 24	2	80
	2	78	3	24, 24, 24	6	126
	3	108	4	24, 24, 24, 24	12	186
	4	238	2	118, 118	2	376
	5	360	3	118, 118, 118	6	570
Korea	6	779	2	209, 562	8	1507

4.2 사례 연구 결과

분산처리 최적조류계산의 수렴속도는 분할된 지역의 수, 지역을 연결하는 연계선의 수, 또는 공통 지역을 제외한 각 지역 내에 있는 자체 모선의 수 등과 같은 계통의 특성 및 Auxiliary Problem Principle 알고리즘 내의 계수 α, β, γ 의 값에 의존한다. 따라서 우리는 Auxiliary Problem Principle 알고리즘을 이용하여 구현한 분산처리 최적조류계산의 수렴속도를 향상시킬 수 있는 최적의 계수사이의 관계를 도출하는 것을 논문의 목적으로 하고 있다.

또한 분산처리 알고리즘은 반복 계산을 수행하기 때문에 정지 조건이 필요하게 되는데, 우리는 이 조건으로 경계모선의 변수값의 차이가 0.01보다 작도록 하였다. 즉, 모든 경계모선에서의 유효전력 조류, 무효전력 조류, 전압, 위상각의 차이가 0.01보다 작도록 하였다. 0.01로 설정한 이유는 전체 계통을 분할하지 않고 한번에 문제를 풀었을 때와 분산처리로 문제를 풀었을 때와의 목적함수 값의 차이가 0.1% 이내이기 때문이다. 여기서 목적함수는 유효전력의 발전비용[13] 최소화이다.

다음은 지역을 각각 2개, 3개, 4개로 분할했을 경우의 분산처리 최적조류계산의 결과이다.

4.2.1 분할된 지역이 2개인 경우

표 3에 실험 결과가 제시되어 있다. 먼저 분할된 지역이 2개인 경우는 IEEE Reliability Test System의 24모선 계통과 118모선 계통, 그리고 우리나라 계통을 대상으로 모의하였다. IEEE Reliability Test System의 경우는 두 지역을 연결하는 연계선의 개수를 1개, 2개, 3개로 바꾸어 가면서 연계선의 수와 수렴속도와의 상관 관계를 살펴보고, 우리나라의 계통은 그림 5와 같이 두 지역 간의 연계선이 각 1회선인 경우 (총 5개의 연계선), 연계선이 각 2회선인 경우 (총 10개의 연계선), 그리고 실제 계통 구성 형태인 아산-서서울과 화성-서서울의 경우는 1회선이고 나머지는 2회선 (총 8개의 연계선)으로 상정하여 사례 연구를 실시하였다.

표 3의 세 번째 행과 네 번째 행은 각각의 계통에 대해서 전체 계통을 분할하지 않고 단일 연산을 수행하여 해를 구하는 중앙집중방식과 지역을 분할하여 Auxiliary Problem Principle 알고리즘으로 구현한 분산처리방식의 계산시간을 보여준다. 분할된 지역과 모선의 수가 적을 경우에는 분산처리방식보다 중앙집중방식이 더 빠른 것을 알 수 있는데, 이것은 분산처리방식의 계산시간에는 서로 데이터를 교환하는 시간, 교환된 데이터를 읽어들이는 시간, 준비시간(Set-up Time) 등이 포함되어 있기 때문에 중앙집중방식에 비해 계산속도가 느리다는 것을 알 수 있다. 그러나 계통이 커질수록 분산처리방식의 효율성은 증가한다.

표 3의 다섯 번째 행은 Auxiliary Problem Principle 알고리즘 내의 계수 값을 변화시켜 가면서 분산처리방식이 가장 빨리 수렴할 때의 반복회수이다. 그림 6은 IEEE Reliability Test System의 118모선 계통의 각 연계선의 수에 대해서 α, β, γ 의 관계에 따른 반복회수의 변화를 나타낸 것이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 $\alpha=\gamma$ 의 관계를 가질 때가 다른 경우에 비해서 수렴이 빠르다는 것을 알 수 있다. 그림 7은 우리나라 계통에 대해서 α, β, γ 의 관계에 따른 반복회수의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면 연계선의 개수가 증가할 때, β/α 의 값이 커질수록 수렴이 빠르다는 것을 알 수 있다. 즉, 연계선의 개수가 5개에서 10개로 증가하는 경우, 수렴이 가장 빠를 때의 β/α 의 값도 1.8에서 2.5로 증가한다는 것이다. 그림 6과 7에서 ● 표시는 수렴이 가장 빠를 때의 계수사이의 관계를 나타내는 점을 표시한 것이다.

표 3의 여섯 번째 행은 속도 향상(speed-up)에 대한 지표이다. 즉, 속도 향상율은 분산처리방식에 의해 단축된 계산시간을 중앙집중방식의 계산시간으로 나눈 값을 %로 나타낸 것이다. 여기서 주의할 점은 분산처리방식의 계산시간은 표 3의 네 번째 행이 아니라, 이 값을 지역의 수로 나눈 값이라는 것이다. 왜냐하면 각 지역별로 문제를 분리해서 풀기 때문에 실제 분산·병렬처리로 문제를 푼 시간은 전체 계산시간을 분할된 지역의 수로 나누는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

표 3 분할된 지역이 2개인 경우의 사례 연구 결과

Table 3 Case study results of 2-regions

지역 자체 모선수	24			118			209/562		
	1	2	3	1	2	3	5	8	10
연계선의 개수									
계산 속도 (초) (Central)	2.7			15.1			67.3		
계산 속도 (초) (Parallel)	7.6	6.6	9.4	27.6	22.1	38.5	125.7	83.9	104.8
반복 회수 (회)	8	7	10	5	4	7	6	4	5
속도 향상율 (%)	-40.74	-22.22	-74.07	8.61	26.82	-27.48	6.61	37.67	22.14
목적함수값 (백만원) (Parallel)	106.60	106.59	106.62	253.71	253.69	253.74	913.42	913.17	913.31
목적함수값 (백만원) (Central)	106.52			253.48			912.58		

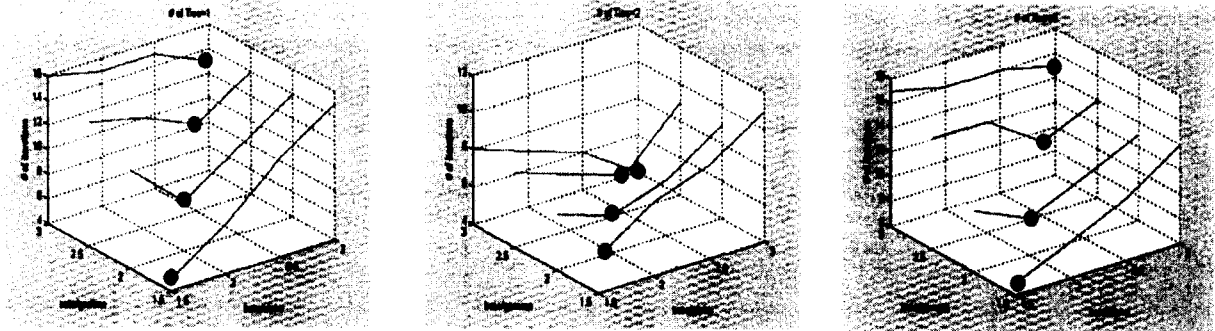


그림 6 분할지역이 2개인 경우의 반복회수와 계수와의 관계 (IEEE 118모선)

Fig. 6 Number of iterations versus parameters for 2-region IEEE118-Bus Reliability Test System

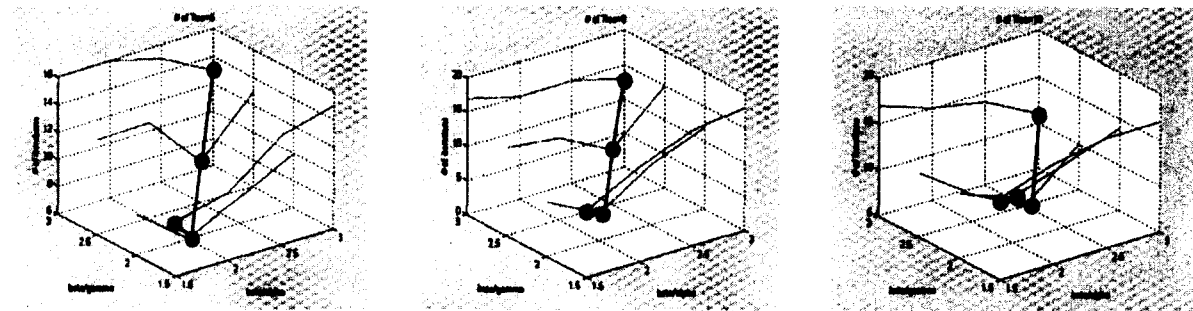


그림 7 분할지역이 2개인 경우의 반복회수와 계수와의 관계 (우리나라 계통)

Fig. 7 Number of iterations versus parameters for 2-region Korea Power System

마지막으로 표 3의 일곱 번째와 여덟 번째 행은 문제를 중앙집중방식과 분산처리방식으로 풀었을 경우의 유효전력 발전비용을 나타낸 것이다. 실제 목적함수 값에는 큰 차이가 없지만 분산처리 방식의 목적함수 값이 약간 더 큰데, 그 이유는 각 지역의 공통변수 값의 차이, 즉 $\|y_a - y_b\|$ 에서 기인한다고 볼 수 있다. 3.3절의 예제에서는 12번 반복 계산 후 $\|y_a - y_b\| = 0$ 이 되므로 이 문제는 중앙집중방식이나 분산처리방식이나 목적함수의 값이 일치하지만, $\|y_a - y_b\| = \epsilon$ 이 되면 식 (15)에서 알 수 있듯이 중앙집중방식의 발전비용 항 ($C_a(\cdot) + C_b(\cdot)$) 이외에 가상발전기에 대한 발전비용 항이 추가된다. 이 항으로 말미암아 약간의 비용 증가가 생기게 되나, 그 값은 전체 비용의 0.1% 이내가 된다. 물론 $\epsilon \rightarrow 0$ 으로 함으로써 중앙집중방식과 분산처리방식의 목적함수 값의 차이를 거의 0에 수렴하도록 할 수도 있다.

4.2.2 분할된 지역이 3개인 경우

표 4에 실험 결과가 제시되어 있다. 분할된 지역이 3개인 경우는 IEEE Reliability Test System의 24모선 계통과 118

모선의 계통을 가지고 모의하였다. 연계선의 수와 수렴속도와의 관계를 살펴보기 위하여 각 지역을 연결하는 연계선의 개수를 3개, 6개, 9개로 변화시켜 가면서 살펴보았다. 분할 지역의 개수가 2개인 경우와는 달리 분산처리방식의 계산속도가 중앙집중방식의 계산속도보다 빠르다는 것을 속도 향상율이라는 지표를 통해서 알 수 있다. 그리고 반복회수도 분할 지역이 2개인 경우보다 더 적어진다는 것을 알 수 있다. 따라서 분할된 지역의 수 및 전체 모선의 개수가 적다고 해서 반복회수가 더 적어지는 것은 아니라는 것을 알 수 있다. 또한 중앙집중방식이나 분산처리방식이나 목적함수의 차이는 거의 없음을 표 4로부터 알 수 있다.

분할된 지역이 3개인 경우는 연계선의 개수가 늘어날수록 가장 빠른 수렴특성을 갖게 하는 β/a 의 값도 증가함을 보여준다. 즉, 연계선의 개수가 3개에서 9개로 증가함에 따라 β/a 의 값도 1.5에서 2.5로 증가한다. 그러나 a, γ 의 관계는 앞의 경우와 마찬가지로 $a = \gamma$ 관계를 가질 때 가장 수렴속도가 빠르다는 것을 그림 8로부터 알 수 있다. 분할된 지역이 3개인 경우의 사례 연구 결과는 표 4에, IEEE 118모선에 대한 연계선의 개수에 따른 반복회수와 계수와의 관계는 그림 8에 제시되어 있다.

표 4 분할된 지역이 3개인 경우의 사례 연구 결과

Table 4 Case study results of 3-regions

지역 자체 모선수	24			118		
연계선의 개수	3	6	9	3	6	9
계산 속도 (초) (Central)	4.4			23.9		
계산 속도 (초) (Parallel)	6.3	3.1	5.2	37.3	18.7	25.1
반복 회수 (회)	6	3	5	6	3	4
속도 향상율 (%)	52.27	76.52	60.61	47.98	73.92	64.99
목적함수값 (백만원) (Parallel)	176.95	176.88	176.91	380.58	380.37	380.44
목적함수값 (백만원) (Central)	176.79			380.23		

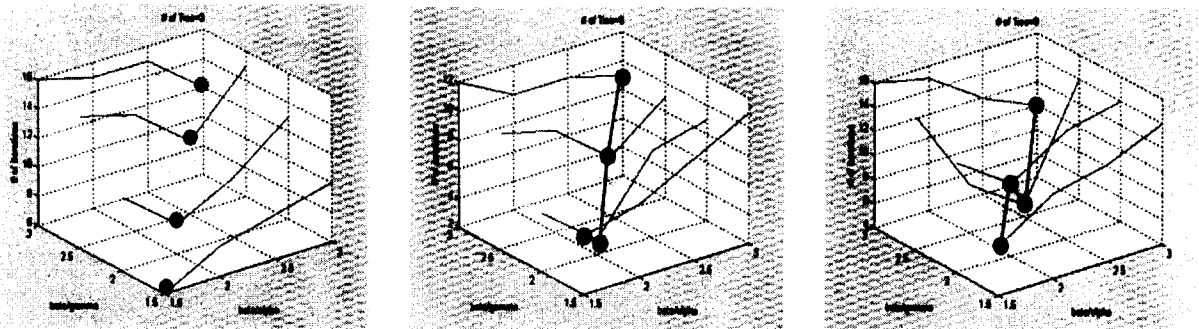


그림 8 분할지역이 3개인 경우의 반복회수와 계수와의 관계 (IEEE 118모선)

Fig. 8 Number of iterations versus parameters for 3-region IEEE118-Bus Reliability Test System

4.2.3 분할된 지역이 4개인 경우

분할된 지역이 4개인 경우의 사례연구 결과는 표 5에, IEEE 24모선 계통에 대한 연계선의 수에 따른 반복회수와 계수와의 관계는 그림 9에 제시되어 있다. 분할된 지역이 4개인 경우는 IEEE Reliability Test System의 24모선 계통에 대해 연계선의 개수를 6개, 9개, 12개로 변화시켜 가면서 연계선의 수와 수렴속도와의 관계를 살펴보았다. 분할된 지역이 4개인 경우도 분산처리방식이 중앙집중방식에 비해 계산속도가 더 빠르다는 것을 알 수 있고, 목적함수 값의 차이도 그리 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 여기서 주의해야 할 사실은 연계선의 수에 상관없이 β/α의 값이 1.5일 때 수렴속도가 가장 빠르다는 것이다. 이것은 그림 9를 통해서 확인할 수 있다.

그리고 분할된 지역의 수에 관계없이 각 지역 간의 연계선의 개수가 2개일 때 반복회수가 가장 작아지는 것을 표 3, 4, 5에서 확인할 수 있다. 즉, 분할지역이 2개인 경우는 연계선의 개수가 2개일 때, 분할지역이 3개인 경우는 연계선의 개수가 6개일 때, 분할지역이 4개인 경우는 연계선의 개수가

12개일 때가 다른 경우에 비해 반복회수가 더 적다는 것이다. 또한 IEEE Reliability Test System은 각 지역 자체 모선의 개수(24모선, 118모선)가 동일하지만, 우리나라의 계통은 경인지역의 자체 모선 수는 209모선, 비경인지역의 자체 모선 수는 562모선으로 서로 비대칭인 경우에 대한 계통을 고려함으로써 대상 계통에 대한 수렴속도의 특성에 대해 좀 더 일반적 해석을 가능하게 해 준다.

우리는 사례 연구를 통하여 수렴속도를 향상시킬 수 있는 Auxiliary Problem Principle 알고리즘 내의 계수사이의 관계를 지역 자체의 모선 수, 연계선의 수, 분할된 지역의 수, 반복회수 등의 함수로 표현할 수 있는 식을 선형회귀분석을 통하여 도출할 수 있다. 도출된 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\beta}{\gamma} = 1.2053 + 0.0025 \times (\text{반복 회수}) - 0.1105 \times (\text{분할된 지역 수}) + 0.0825 \times (\text{연계선의 수}) + 0.0012 \times (\text{두 지역간 자체모선 수의 평균}) \quad (25)$$

따라서, 식 (25)에 주어진 계수 사이의 관계를 APP 알고리즘에 적용하면 수렴속도의 향상을 가져올 수 있다.

표 5 분할된 지역이 4개인 경우의 사례 연구 결과

Table 5 Case study results of 4-regions

지역 자체 모선수	24		
연계선의 개수	6	9	12
계산 속도 (초) (Central)	6.3		
계산 속도 (초) (Parallel)	13.7	12.0	8.5
반복 회수 (회)	8	7	5
속도 향상율 (%)	45.63	52.38	66.27
목적함수값 (백만원) (Parallel)	246.59	246.53	246.49
목적함수값 (백만원) (Central)	246.35		

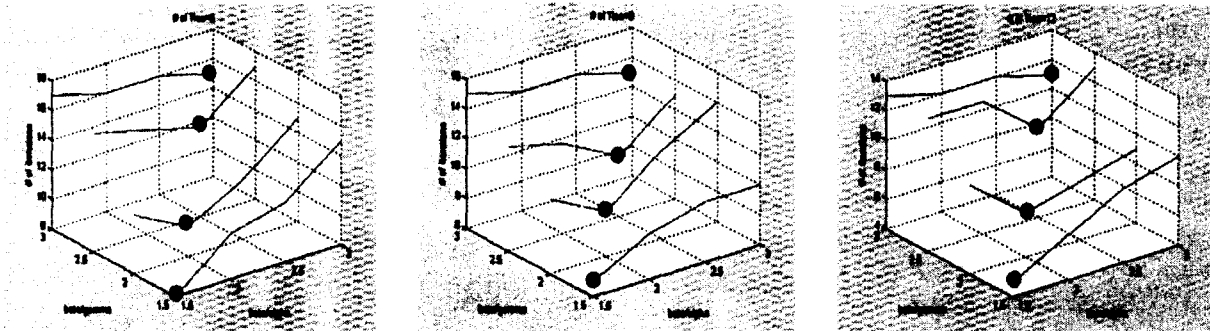


그림 9 분할지역이 4개인 경우의 반복회수와 계수와의 관계 (IEEE 24모선)

Fig. 9 Number of iterations versus parameters for 4-region IEEE24-Bus Reliability Test System

5. 결 론

본 논문에서는 전력 계통의 운용 및 계획, 그리고 전력경제 분야 연구에 기초적이고 필수적인 방법론을 제공할 수 있는 최적조류계산의 해를 구하기 위한 새로운 방법을 제시하였다. 그러나 최적조류계산 문제의 해를 구하기 위해 사용된 기존의 방법들은 근사화 과정에 의한 오차 발생, 막대한 계산 시간 필요, 최적해로의 수렴 보장 불가 등의 문제점들을 가지고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 전체 계통을 지역별로 구분하여 문제를 분산화하고 이를 병렬 계산하는 분산·병렬처리 기법을 통하여 효율적이고 빠른 최적조류계산을 제시하였으며, 이것을 IEEE Reliability Test System과 우리나라 계통에 적용하여 분산처리 최적조류계산의 유용성을 알아보았다. 또한 분산처리 최적조류계산을 구현하기 위한 수학적 분할 기법으로 Auxiliary Problem Principle을 소개하였으며, 3모선 계통의 간단한 문제를 통하여 분산처리 최적조류계산에 APP 알고리즘이 어떠한 방식으로 적용되는가를 살펴보았다.

결론적으로 우리는 분산처리 최적조류계산을 수행함에 있어서 좀 더 빠른 시간 안에 해를 구하는 작업이 요구되는데 이를 위해서 APP 알고리즘 내의 계수 사이의 관계를 적절히 조정하면 분산처리 최적조류계산의 수렴속도 향상을 달성할 수 있고, 이 계수 사이의 관계는 계통의 특성, 즉 분할된 지역의 수, 연계선의 수, 분할된 지역 자체의 모선 수 등에 좌우된다는 것을 알 수 있었다. 또한 사례 연구 대상 계통에 대해 수렴속도를 향상시킬 수 있는 계수 사이의 관계식을 SAS (Strategy Approach Software) 프로그램을 이용하여 유도하였다. 제안된 식을 통해 수렴속도와 계산시간을 향상해서 전력계통의 실시간 적용이 가능하게 되었으며, 전력계통 분야의 병렬처리 기법과 관련하여 많은 응용을 할 수 있게 되었다.

앞으로 최적조류계산의 목적은 사회적 후생을 최대화하는 문제로 바뀌어 갈 것이고, 또한 발전사업자의 입찰을 고려한 제약 조건의 정식화 및 수요의 불확실성을 고려한 가변 부하의 처리 등 구조개편과 관련하여 해결해야 할 문제는 상당히 많다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] M. Huneault and F. D. Galiana, "A survey of the optimal power flow literature," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, No. 2, pp.762-770, May 1991.

[2] H. Singh, H. Shangyou, and A. Papalexopoulos, "Transmission congestion management in Competitive Electric Markets," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, No. 2, pp.672-680, May 1998.

[3] Guy Cohen, "Optimization by decomposition and coordination: A unified approach," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 23, No. 2, pp.222-232, April 1978.

[4] 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.

[5] B. Stott, O. Alsac, and A. J. Monticelli, "Security analysis and optimization," Proceedings of the IEEE, vol. 75, No. 12, pp.1623-1644, December 1987.

[6] J. Batut and A. Renaud, "Daily generation scheduling optimization with transmission constraints: A new class of algorithms," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 7, No. 3, pp.982-989, August 1992.

[7] Guy Cohen, "Auxiliary problem principle and decomposition of optimization problems," Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 32, No. 3, pp.277-305, November 1980.

[8] Guy Cohen and Bernadette Miara, "Optimization with an auxiliary constraint and decomposition," SIAM Journal on Control and Optimization, vol. 28, No. 1, pp.137-157, January 1990.

[9] Guy Cohen and Dao Li Zhu, "Decomposition coordination methods in large scale optimization problems," Advances in Large Scale Systems, vol. 1, pp.203-266, 1984.

[10] Anthony Brooke, David Kendrick, and Alexander Meeraus, GAMS User's Guide, The Scientific Press, Redwood City, CA, 1990.

[11] David Kendrick and Alexander Meeraus, GAMS : An Introduction, World Bank, 1985.

[12] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, Wiley, New York, 2nd edition, 1996.

[13] Martin L. Baughman et al., "Electric Utility Resource Planning and Production Costing Projects : Final Report," Center for Energy Studies, The University of Texas at Austin, 1993.

저 자 소 개



허 돈 (許 焯)

1974년 1월 17일 생. 1997년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학부 박사과정
Tel : 02-886-3101, Fax : 02-886-3102
E-mail : hanwha@snu.ac.kr



박 종 근 (朴 鍾 根)

1952년 10월 21일 생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 일본 동경대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1983년~현재 서울대 전기공학부 교수

Tel : 02-880-5516, Fax : 02-883-0827
E-mail : parkjk@snu.ac.kr



김 발 호 (金 發 鎬)

1962년 7월 11일 생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 미국 University of Texas at Austin 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 미국 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997년~현재 홍익대 전자전기공학부 조교수

Tel : 02-320-1462, Fax : 02-320-1110
E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr