

분산 병렬처리 최적교류계산의 구현 및 한전계통에의 적용

허 돈*, 박 종 근*, 김 발 호**

(*서울대 공대 전기공학부, **홍익대 공대 전기정보제어공학과)

1. 서 론

1960년대 초, 전력 계통의 경제급전 (Economic Dispatch) 문제의 연장선상에서 최적조류계산 (Optimal Power Flow) 문제가 대두된 이후, 최적조류계산 문제는 전력 계통에서 매우 각광받고 있는 핵심적인 문제이다. 1962년 Carpentier에 의해 최적조류계산 문제가 처음으로 제안된 후, 이러한 최적조류계산 문제는 최적화 기법과 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 전력산업의 구조 개편 논의가 활발히 진행되고 있는 우리나라의 경우, 전력 계통의 운용과 계획에서 가장 기본적이고 필수적인 도구인 최적조류계산에 대한 관심이 높아지는 것은 당연하다. 최적조류계산의 응용 분야로는 경제급전과 상정사고를 고려한 최적조류계산 (Security-Constrained Optimal Power Flow)과 같은 실시간 운용 또는 발전기 운전비용 최소화와 같은 운용단계의 문제, 무효전력 보상장치의 투자결정과 같은 장기투자계획 문제 등이 있다.

최적조류계산 문제는 제약조건이 있는 비선형 최적화 문제로 정의할 수 있다. 기존의 경제급전 문제가 목적함수로서 유효전력 발전비용의 최소화만을 고려하고 제약조건으로 전력수급조건을 고려한 것과는 달리, 최적조류계산 문제는 다양한 종류의 목적함수와 제약조건들을 고려할 수 있는 일반적인 최적화 문제로 정식화 할 수 있다. 지금까지 최적조류계산 문제의 해를 구하는 다양한 방법들이 제안되었다. 이러한 방법들을 최적조류계산 문제에 적용된 최적화 기법을 기준으로 분류하면, 선형계획법 (Linear Programming)에 기초한 방법과 비선형계획법 (Nonlinear Programming)에 기초한 방법으로 분류할 수 있다. 선형계획법에 기초한 방법은 선형화 과정을 통해 원문제를 간단화하고 근사화하여 해를 구한다. 따라서 수렴속도가 빠른 장점을 가지고 있는 반면, 전력 계통과 같은 대형 계통을 이러한 선형화 과정을

통해 근사화할 경우, 필연적으로 발생하는 오차를 어떻게 줄일 수 있는가 하는 것이 해결되어야 할 선결과제이다. 또한 무효전력의 최적화 문제에도 선형계획법을 이용한 방법이 시도되었지만, 수렴성과 신뢰도에는 아직 한계가 있다. 또한 비선형계획법을 이용하여 해를 구하는 방법도 대상 계통이 대형화, 복잡화되어감에 따라 최적의 해를 구하는데 막대한 시간이 걸리거나, 실제로 해를 찾기 못하는 경우도 발생한다. 요약하면 최적조류계산 문제의 해를 구하기 위해 사용된 기존의 방법들은 근사화 과정에 의한 오차 발생, 막대한 계산시간 필요, 최적해로의 수렴 보장 불가 등의 문제점을 가지고 있다 [1]. 따라서 이러한 기존의 방법들은 전력 계통과 같은 복잡하고 대형 계통에 적용할 경우 많은 문제점들이 발생할 수 있다. 즉, 근사화 과정에 의해 발생하는 오차가 시스템의 한계를 벗어나게 되어 계통의 고장이나 사고를 유발하게 되고, 막대한 계산시간을 요구함으로써 전력 계통의 실시간 운용을 불가능하게 하며, 최적해로의 수렴을 보장할 수 없기 때문에 전력 계통의 최적 운용을 불가능하게 한다. 또한 기존의 최적조류계산 모델에 안전도 제약 조건을 추가하여 정식화해야 할 필요성이 증가하고 있으며, 최적조류계산의 해를 찾기 위한 알고리즘의 수렴속도를 향상시키려는 시도가 진행되고 있는 상황이다 [2]. 전력계통의 실시간 적용을 위해서는 빠른 계산속도가 필수적이며, 분산 병렬처리는 이 목적을 충족시켜 줄 수 있는 중요한 수단으로 볼 수 있다 [3].

따라서, 본 연구에서는 기존의 중앙집중처리 (centralized processing) 방식의 단점을 해결하기 위해 분산 병렬처리 (distributed parallel processing) 방식을 제안하고자 한다. 우리가 제시한 분산 병렬처리는 전체 계산 과정을 각 계산 단계별로만 병렬처리하는 기존의 병렬처리와는 달리 [4, 5, 6, 7], 전체 문제를 지역적으로 구분하여 문제를 분산화하고, 이를 병렬 계산하는 방법이다 [8].

본 논문은 크게 5 부분으로 이루어져 있다. 제 2장은 기존 최적조류계산의 특징들과 AC-최적조류계산의 수학적 모

델링을 설명한다. 제 3장은 최적조류계산의 분산 병렬처리 구현을 가능하게 하는 수학적 분할 기법에 대한 기본적인 이론을 정립하고, 제 4장에서는 3장에서 설명된 확장된 라그랑지안 (augmented Lagrangian) 함수를 사용하여 상정 사고를 고려하지 않은 최적조류계산 문제가 어떤 식으로 정식화되고 지역적으로 분할될 수 있는가를 보여 준다. 그리고 제 5장에서는 분산 병렬처리 알고리즘을 사용한 분산 처리 최적조류계산을 IEEE RTS와 ERCOT 및 우리나라 계통에 적용해 보았다. 마지막으로 제 6장은 분산처리 최적조류계산에 대한 결론과 더불어 앞으로의 최적조류계산의 역할, 응용 분야 등에 대해 토의하기로 한다.

2. 최적조류계산의 개요

2.1 최적조류계산의 특징

전력계통의 안전도와 경제성은 전력사업의 가장 중요한 목적이거나 할 수 있다. 일반적으로 이러한 전력계통은 다음과 같은 두 가지의 제약조건을 만족하면서 운용된다고 볼 수 있다. 첫 번째는 주로 부하와 관련된 제약조건이며, 두 번째는 운전상의 제약조건을 말하는데, 이러한 제약조건을 어느 정도 만족하고 있는가에 따라 계통의 상태를 정상상태, 긴급상태, 복구상태 등으로 구분할 수 있다. 전력계통 운용자는 적절한 운전상태를 얻기 위해 제어 가능한 설비의 조정을 포함한 정상상태의 전력계통 문제를 최적조류계산 문제로 정식화하여 풀 수 있다. 따라서 일반적인 의미의 최적조류계산 문제를 정의해 보면 최적조류계산은 발전과 송전계통의 최적의 정상 운전상태를 결정하는 것이라고 볼 수 있다. 이 때 최적의 정상 운전상태는 위에서 언급한 부하와 관련된 제약 조건 (등식 제약조건) 및 운전상의 제약 조건 (부등식 제약조건)을 만족하면서 주어진 목적함수를 최적화할 수 있는 제어변수들의 조정에 의해 달성된다. 이상을 수학적 기호를 사용하여 정의해 보면 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(u, x) \\ \text{s.t. } & g(u, x) = 0 \\ & h(u, x) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$u = m$ 개의 제어변수 집합

$x = n$ 개의 상태변수 집합이다.

그리고, 각각

$f : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 는 목적함수,

$g : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ 는 등식제약조건 함수,

$h : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^q$ 는 부등식 제약조건 함수이다.

일반적으로 최적조류계산에서 시스템의 상태를 나타내는 변수는 다음과 같다.

- 전압 크기,
- 전압 위상각,
- 제어되지 않는 발전기들의 유효·무효 출력,
- 제어되지 않는 부하들의 유효·무효전력,

반면에 제어변수는 다음과 같다.

- 제어가능한 발전기의 유효전력 발전 및 무효전력 발전,
- 변압기의 변압비,
- 순 전력거래 (net interchange),
- 병렬 커패시터 또는 인덕턴스,
- 발전기 모선 전압,
- 선로 스위칭,
- 부하 감소 및 차단 (load reduction or shedding),
- 위상각 변환각 (phase shift angle).

선택할 수 있는 목적함수는 다음과 같다.

- 운전비용의 최소화,
- 선로의 유효·무효전력 손실 최소화,
- 부하차단 최소화,
- 제어되는 변수의 개수 최소화,
- 송전전력의 최대화,
- 총 배출량의 최소화,
- 비상사 경제급전.

가장 일반적인 형태의 목적함수는 발전기의 유효전력과 관련된 운전비용 최소화이다. 다음으로 제약조건을 살펴보면 다음과 같다. 등식 제약조건은 전력조류방정식으로 주어지고, 부등식 제약조건은 계통 운용과 관련된 발전기의 출력 상·하한 제약이나, 송전선로의 최대 용량 제약, 각 모선의 전압과 관련된 제약, 상정사고 제약 등이 포함된다 [9, 10]. 일반적으로 최적조류계산 문제는 수많은 변수와 제약조건으로 이루어져 있으며, 최적조류계산의 해를 구하는 방법 역시 수없이 많이 존재한다 [11, 12]. 여기서 우리가 관심을 가지고 볼 사항은 최적조류계산 해의 쌍대변수 값으로부터 얻을 수 있는 경제적인 정보이다. 예를 들어 전력조류방정식과 관련된 쌍대변수 값은 각 모선에서의 유효전력 및 무효전력의 모선 가격 (nodal price)으로 해석할 수 있다는 점이다. 마찬가지로 부등식 제약조건과 관련된 쌍대변수 값은 제약조건의 변화에 대한 목적함수 값의 민감도로 볼 수 있다는 점을 우리는 명심해야 한다.

먼저 정식화에 필요한 기호들을 정의하고 나서, AC-최적조류계산 문제의 수학적 모델링을 표현해 보기로 한다.

2.2 기호

집합

I 모선 묶음 / M_i 모선 i 에 있는 발전기 묶음
참자

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_i 선로 i 의 컨덕턴스
- B_i 선로 i 의 서셉턴스
- B_{cap} 선로 i 의 병렬 커패시턴스
- TP_i 선로 i 에서 유효 전력의 최대 송전 용량
- TQ_i 선로 i 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

2.3 정식화

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

· 연료 비용 함수 $\forall m \in M_i$:

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

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

· 유효 전력 수급 균형 제약 $\forall i \in I$:

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

· 무효 전력 수급 균형 제약 $\forall i \in I$:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

· 모선 전압 제약 $\forall i \in I$:

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

최적조류계산의 정식화는 해법의 종류, 문제 형태 등에

따라 다양하게 바뀔 수 있으며, 목적함수나 제약조건 역시 문제의 요구에 따라 취사선택할 수 있다. 결론적으로 최적 조류계산은 문제 정식화, 연계 계통의 표현 정도, 해를 구하기 위한 알고리즘의 종류 및 구현 방법 등에 있어서 상당한 유연성을 가지고 있다.

3. 분할 조정 방법

(Decomposition Coordination Method)

3.1 개요

이번 장에서는 분리된 구조를 갖는 대규모 계통을 풀기 위한 분할조정기법의 기본적인 개념에 대해 설명하고자 한다. 이 방법은 Cohen에 의해 처음으로 제안되어 개발된 Auxiliary Problem Principle (APP) 알고리즘이다 [2, 13, 14, 15]. 먼저 우리는 Auxiliary Problem Principle (APP)의 기본적인 이론에 대해 설명하고, 분산처리 최적조류계산의 구현에 적합한 알고리즘을 도출하는데 있어서 Auxiliary Problem Principle (APP)이 어떠한 방식으로 확장된 라그랑지안 함수 정식화에 적용될 수 있는가에 대해 알아보기로 한다.

다음과 같이 분리된 구조를 갖는 전형적인 볼록함수 (convex) 형태의 문제를 생각해 보자.

$$(P) \quad \min_{x, z} \{ f_a(x) + f_b(z) : Ax = z \}$$
 (13)

이 때, 문제 (P)에 대한 확장된 라그랑지안은 다음과 같이 구성된다.

$$\mathcal{L}(x, z, \lambda) = f_a(x) + f_b(z) + \lambda^T (Ax - z) + \frac{\gamma}{2} \|Ax - z\|^2$$
 (14)

여기서 λ 는 라그랑지안 승수이고, γ 는 상수이다. 확장된 라그랑지안은 표준 라그랑지안에 비해 몇 가지 장점을 갖는다. 그러나 분할 기법의 가장 큰 단점은 함수 \mathcal{L} 내에 존재하는 $\gamma/2 \|Ax - z\|^2$ 항이 존재하므로 x 와 z 를 분리할 수 없다는 것이다. 왜냐 하면, 두 변수는 $z^T Ax$ 의 내적에 의해 결합되어 있기 때문이다. 이것이 확장된 라그랑지안 접근법의 가장 큰 단점으로 오랫동안 인식되었으며, 수많은 기법들이 이 어려움을 극복하고자 제안되었다 [16, 17, 18, 19]. 1958년 Uzawa는 단순히 (λ 는 고정하고) x 와 z 에 대해서 라그랑지안 함수 \mathcal{L} 을 최소화하고, 라그랑지안 승수 λ 를 갱신하는 것을 제안하였다 [20]. 이 방법에서 f_a 와 f_b 는 강볼록함수라고 가정을 하게 되는데, 이것이 실제 문제를 응용하는데 상당한 걸림돌로 작용하게 되었다.

[2, 13]와 좀 더 최근의 논문 [14, 15]에서, Cohen은 2-단계 알고리즘과 구배법 (gradient), 뉴턴-랩슨법 (Newton-Raphson)과 같은 기존의 최적화 알고리즘과 같은 백락의 Auxiliary Problem Principle (APP)을 기초로 한 통합된 틀을 제공하였다. 또한 Cohen은 새로운 분할 알고리즘을 분석, 개발하는데 있어서 Auxiliary Problem Principle (APP)의 위력과 유용성을 제시하였다.

3.2 Auxiliary Problem Principle (APP) 알고리즘

다음과 같은 형태의 최적화 문제를 고려해 보자.

$$\min \{f(u) : \Theta(u) = 0\} \tag{15}$$

여기서 f 는 볼록 (convex), 고유 (proper), 준연속 (lower semi-continuous) 함수, 그리고 $\Theta(u)$ 는 가법 (additive)의 성질이 있다고 가정하자. 그러면 문제 (15)를 푸는 것은 다음과 같은 추가문제의 수열을 푸는 것과 동가이다 [2, 13].

Algorithm -APP [21]

$$u^{k+1} = \arg \min_{u \in H^i} \{ \beta K(u) + f(u) - \beta \nabla K(u^k)^T u + (\lambda^k + \gamma \Theta(u^k))^T \Theta(u) \} \tag{16}$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha \Theta(u^{k+1}) \tag{17}$$

여기서, K 는 미분가능한 함수이고, α, β 는 상수이다.

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_N \end{pmatrix}; u_i \in H_i; H = H_1 \times \dots \times H_N; H^i = H_1^i \times \dots \times H_N^i$$

$$f(u) = \sum_{i=1}^N f_i(u_i); \Theta(u) = \sum_{i=1}^N \Theta_i(u_i)$$

의 경우에서, f 와 Θ 함수는 분해된 H 에 대해 가법이므로, 추가의 함수 $K(u) = \|u\|^2/2$ 라고 하면 $i=1, \dots, N$ 에 대해서 다음과 같은 부분제를 도출할 수 있다.

$$\text{Min}_{u_i \in H_i^i} \left\{ f_i(u_i) + \frac{\beta}{2} \|u_i - u_i^k\|^2 + (\lambda^k)^T \Theta_i(u_i) + \gamma \left(\sum_{j=1}^N \Theta_j(u_j^k) \right)^T \Theta_i(u_i) \right\} \tag{18}$$

예를 들어, $N=2; u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix}; f = f_a + f_b; \Theta(u) = Ax - z$ 라고

한다면, 식 (15)는 문제 (13)과 일치한다. 그리고, (18)식에 있는 마지막 항은 추가된 항 $\gamma/2 \| \Theta(u) \|^2$ 를 선형화한 형태이다. 따라서 APP는 확장된 라그랑지안의 선형화를 포함한 문제의 수열을 푸는 것으로 해석할 수 있다.

$$\mathcal{L}_\gamma(u, \lambda) = f(u) + \lambda^T \Theta(u) + \frac{\gamma}{2} \|\Theta(u)\|^2 \tag{19}$$

4. 분산 병렬처리 최적조류계산의 구현

이번 장에서는 각각의 발전회사가 자신의 서비스 지역과 다른 발전회사와 공유하는 경계 지역을 포함하는 영역에 대해 수정된 최적조류계산을 계산하는 방법을 제안하고자 한다. 수정된 최적조류계산은 공통모선에서 모델링된 가상의 발전기를 제외하고는 표준 최적조류계산과 비슷하다. 당연히 각 지역에서 계산되는 최적조류계산은 가장 빨리 수렴할 수 있는 알고리즘으로 구현될 수 있다. 또는 각 전력회사가 자신의 지역에 대해서는 다른 정식화를 사용할 수도 있다. 전체 알고리즘은 각 최적조류계산의 결과와 갱신된 가격신호와 관련이 있다. 원칙적으로 이것은 전체 발전비용을 최소화하기 위해 각 전력회사가 적절한 발전 수준을 도출하면서 전체 전력회사의 최적조류계산의 해에 수렴하게 된다. 제약조건에서의 라그랑지안 승수(multiplier)는 유효·무효전력 거래에 대한 가격을 설정하는데 사용된다. 우리는 앞에서 제안된 수학적 분할 기법을 이용한 상정사

고(contingency)를 고려되지 않은 최적조류계산 문제가 각 지역별로 어떻게 나누어 질 수 있는가를 보이고, 분산처리 최적조류계산 알고리즘의 문제 정식화와 실제적인 구현에 대해 상세히 설명하기로 한다.

4.1 변수

지역 a 와 b 를 연결하는 하나의 연계선이 있는 경우인 그림 1을 고려하자. 두 지역 사이의 공통 부분에는 변수 벡터 y 라고 명명된 공통모선이 존재한다. 각 연계선마다 공통 부분에는 모선을 포함해야 한다. 연계선에 모선이 존재하지 않는 경우에는 우리는 가상의 모선 (dummy bus)을 만든다. 각 가상 모선에는 모선을 통과하는 유효·무효전력과 모선에서의 전압, 위상각의 요소가 존재한다. 즉 벡터 y 는 각 연계선마다 4개의 성분을 가지고 있다고 할 수 있다. 또한 그림 1에는 x 와 z 가 나타나 있다. 벡터 x 는 y 에는 포함되지 않고 지역 a 에 관계된 OPF 변수로 구성되어 있다. 마찬가지로 z 는 y 에는 포함되지 않고 지역 b 의 변수들을 포함한다. 요약하면 지역 a 는 상태 벡터 (x, y) 를, 지역 b 는 상태벡터 (y, z) 를 갖는다. y 변수를 중첩(overlap) 또는 경계(border) 변수라 하고, x 와 z 는 각각 지역 a 와 b 에 대한 자체(core) 변수라고 불린다.

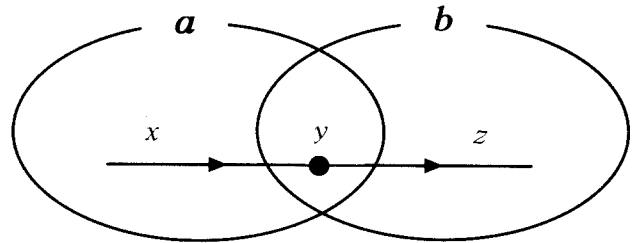


그림 1. 지역 a 와 b 로 분할된 전력계통

4.2 제약조건

시스템의 제약조건은 x 와 z , 또는 x, y, z 가 아닌 x 와 y , y 와 z 변수에 관계된다고 가정한다. 즉, 각 지역에서의 제약조건은 단지 그 지역에서의 자체 변수와 경계 변수로만 표현된다고 가정한다. 이 가정은 모선 어드미턴스 행렬이 단지 선로에 직접적으로 연결된 모선에 속한 변수들에 의해서만 결합되어 있으므로, 전력조류방정식의 경우에는 바람직하다. 이런 가정에 따라 우리는 지역 a 의 전력조류방정식은 $g_a(x, y) = 0$ 의 형태로, 지역 b 는 $g_b(y, z) = 0$ 의 형태로 쓸 수 있다. 마찬가지로 우리는 지역 a 의 부등식 제약조건은 $h_a(x, y) \leq 0$ 의 형태로, 지역 b 는 $h_b(y, z) \leq 0$ 의 형태로 쓸 수 있다. 함수 h_a 와 h_b 는 각 지역에서의 선로용량, 전압, 그리고 상정사고 제약조건을 나타낸다. 두 개의 집합을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} A &= \{(x, y) : g_a(x, y) = 0, h_a(x, y) \leq 0\}, \\ B &= \{(y, z) : g_b(y, z) = 0, h_b(y, z) \leq 0\} \end{aligned} \tag{20}$$

그러면 전력조류의 가능해는 $(x, y) \in A$ 와 $(y, z) \in B$ 를 만족하는 점 (x, y, z) 이다.

4.3 정식화

위의 변수와 제약조건의 정의에 따라 OPF문제는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\min_{(x, y) \in A, (y, z) \in B} \{f_a(x) + f_b(z)\} \quad (21)$$

여기서 우리는 비용 함수 f_a 와 f_b 는 각 지역에서의 실제 비용 함수에 대한 볼록함수 근사이고, 식 (21)에는 유일한 해가 존재한다고 가정한다. 우리는 경계변수를 복사하고 Auxiliary Problem Principle을 적용함으로써 문제 (21)을 지역별로 나눌 수 있다.

단계 1 : 경계 변수의 복사

지역 a와 지역 b에 대해 경계 변수 y 를 복사한 것을 각각 y_a 와 y_b 라 한다.

단계 2 : Auxiliary Problem Principle 알고리즘 적용

식 (18)을 이용하여 다음과 같은 문제를 계산함으로써 식 (21)을 풀 수 있다.

$$\begin{aligned} & (x^{k+1}, y_a^{k+1}, y_b^{k+1}, z^{k+1}) \\ &= \arg \min_{(x, y_a) \in A, (y_b, z) \in B} \{ f_a(x) + f_b(z) + \\ & \quad \frac{\beta}{2} \|y_a - y_a^k\|^2 + \frac{\beta}{2} \|y_b - y_b^k\|^2 + \\ & \quad \gamma (y_a - y_b)^T (y_a^k - y_b^k) + \\ & \quad (\lambda^k)^T (y_a - y_b) \} \quad (22) \end{aligned}$$

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

여기서 윗첨자 k 는 반복회수이고, α, β, γ 는 양의 상수이다. 초기 조건 $x^0, y_a^0, y_b^0, z^0, \lambda^0$ 는 이전 단계의 해가 초기해가 될 수 있다.

단계 3 : 지역별 최적조류계산

분산화 계산을 목적으로 식 (22)의 문제는 각각의 지역 a와 b에 대해 다음과 같은 소문제들로 쪼갤 수 있다.

$$\begin{aligned} & (x^{k+1}, y_a^{k+1}) \\ &= \arg \min_{(x, y_a) \in A} \left\{ f_a(x) + \frac{\beta}{2} \|y_a - y_a^k\|^2 + \gamma y_a^T (y_a^k - y_b^k) + (\lambda^k)^T (y_a) \right\} \quad (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (z^{k+1}, y_b^{k+1}) \\ &= \arg \min_{(y_b, z) \in B} \left\{ f_b(z) + \frac{\beta}{2} \|y_b - y_b^k\|^2 - \gamma y_b^T (y_a^k - y_b^k) - (\lambda^k)^T (y_b) \right\} \quad (25) \end{aligned}$$

여기서 식 (24)의 목적함수에서

$\frac{\beta}{2} \|y_a - y_a^k\|^2 + \gamma y_a^T (y_a^k - y_b^k) + (\lambda^k)^T (y_a)$ 항은 지역 a의 공통 모선에 놓여진 발전기의비용 함수의 합으로 해석할 수

있음에 유의한다. 이 가상발전기의 비용 함수는 유효·무효 전력, 전압지원, 그리고 위상각 제어를 위한 비용을 포함한다. 식 (25)의 항에 대해서도 동일한 해석을 할 수 있다. 지금까지의 과정을 요약하면 그림 2와 같다.

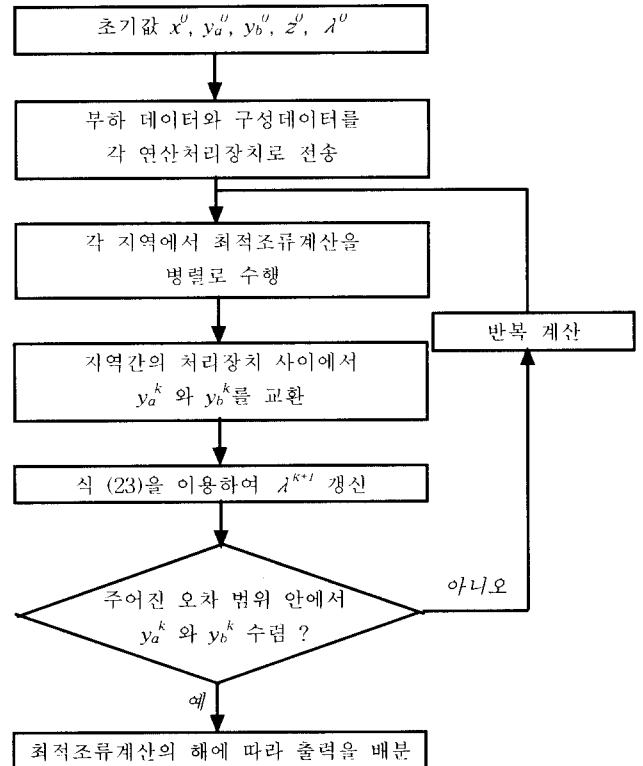


그림 2. 분산 병렬처리 최적조류계산의 구현

5. 사례 연구

5.1 대상 시스템

이번 장에서는 분산 병렬처리 최적조류계산의 타당성을 입증하기 위해 IEEE Reliability Test System과 Electric Reliability Council of Texas (ERCOT) System, 우리나라의 1999년 전력계통에 대하여 사례연구를 수행하였다. 표 1에 사례 연구의 대상 계통이 정리되어 있다. 표 1의 첫 번째 열은 계통의 형태를 나타내고, 두 번째, 세 번째 열은 가상 모선을 포함한 전체 모선 수 및 분할된 지역의 수를 나타낸다. 네 번째 열은 공통 지역이 아닌 자기 자신의 영역 내에 있는 그 지역만의 자체 모선 수를 나타낸다. 마지막으로 다섯 번째와 여섯 번째 열은 두 지역을 연결하는 연계선의 수와 계통 전체의 선로 수를 표시한다. 그림 3은 2개 지역으로 나누어진 우리나라의 계통 모습을 보여준다. 즉, 크게 경인지역과 비경인지역으로 구분하고, 두 지역을 연결하는 연계선은 345kV의 복상선로로 선정하여 분산 병렬처리 최적조류계산을 수행하였다. 아산-화성의 경우만 1회선이고 나머지는 모두 2회선씩이므로 총 7개의 연계선이 존재하게 된다.

표 1. 사례 연구 대상 계통

형태	모선 수	분할된 지역 수	지역 모선의 수	연계선의 수	전체 선로의 수
IEEE	108	4	24, 24, 24, 24	12	186
	360	3	118, 118, 118	6	570
ERCOT	753	4	271, 105, 128, 237	12	1100
	1459	6	271, 105, 128, 237, 365, 325	28	2145
KOREA	778	2	209, 562	7	1507

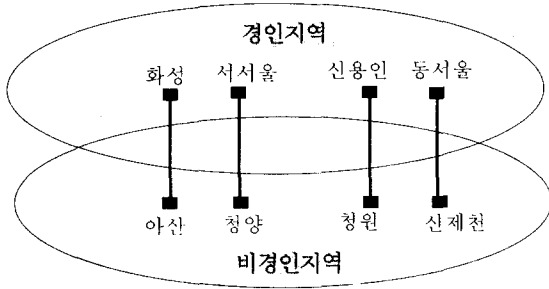


그림 3. 경인지역과 비경인지역으로 나누어진 우리나라 계통

5.2 사례 연구 결과

본 연구에서의 목적함수는 발전기의 유효전력 발전과 관련된 운전비의 최소화이다. 제약조건으로는 각 발전기들의 출력 제약과 각 송전선로의 열용량 제약, 그리고 각 모선의 전압제약 (10% 여유) 등을 고려하였다.

표 2에는 분할 기법을 사용하지 않고 단일 연산으로 계산하는 중앙집중방식과 수학적 분할 기법을 고려하여 다중 연산으로 해를 구하는 분산처리 방식을 적용하여 표 1의 계통에 대하여 최적조류계산의 해를 구했을 경우의 계산 시간과 효율성이 나타나 있다 [22]. 표 2의 결과에서 알 수 있듯이, 분산처리방식이 중앙집중방식에 비해 계산속도가 더 빠르고 효율적이라는 것을 알 수 있다. 또한 IEEE Reliability Test System의 경우를 살펴보면 계통이 커질수록 분산처리 방식이 더 좋은 성능을 유지하고 있으며, 그때의 효율성은 35.0%에서 76.5%로 향상되는 것을 알 수 있다. 반면 ERCOT 계통의 경우에는 IEEE Reliability Test System의 경우에 비해 효율성은 상대적으로 약간 뒤지지만, 역시 계통이 커질수록 효율성이 더 좋아짐을 알 수 있다. 표 3에는 우리나라 계통에 대한 결과가 정리되어 있다.

표 2. 중앙집중방식과 분산처리방식의 계산시간 비교

계통 유형	IEEE		ERCOT		KOREA
모선 수	108	360	753	1459	778
지역의 수	4	3	4	6	2
계산시간 (초) (중앙집중방식)	4.2	11.7	37.3	66.2	67.3
계산시간 (초) (분산처리방식)	3.0	5.1	15.1	16.9	41.9
효율성 (%)	35.0	76.5	61.7	65.3	37.7

표 3. 분산처리 방식에 의한 최적조류계산 결과

특정 선로	회선	분산처리방식에 의한 유효 전력량 (MW)	중앙집중방식에 의한 유효 전력량 (MW)	변화율 (%)
신제천 동서울	1	735.1	732.2	0.396
	2	735.1	732.2	0.396
이산 화성	1	1003.2	1001.5	0.170
	2	1003.2	1001.5	0.170
청양 서서울	1	531.1	534.3	-0.599
	2	531.1	534.3	-0.599
침원 신용인	1	210.7	209.3	0.699
	2	210.7	209.3	0.699
총 발전비용 (억원/시간)		9.1290	9.1258	0.035

표 3에서 변화율은 중앙집중방식에 대한 분산처리방식에 중앙집중방식의 변화량의 비율을 의미한다. 여기서 두 방식에 의한 목적함수의 값 차이는 0.035%에 불과해 분산처리방식으로 문제를 풀어도 해는 중앙집중처리 방식으로 문제를 풀었을 때의 해로 수렴함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 전력계통과 같은 대규모 계통에 적합한 분산 병렬처리를 통해 효율적이고 빠른 최적조류계산 알고리즘을 제시하였으며, 이를 바탕으로 우리나라 및 미국 텍사스주의 실계통에 적용하였으며, 적용 결과에 대해서는 5장에서 간단히 언급하였다. 본 연구의 결과, 분산 병렬처리 최적조류계산의 수렴 속도와 계산 시간 향상을 통해 전력 계통에의 실시간 적용 가능성이 높아졌으며 전력 계통 분야의 병렬처리 기법과 관련된 연구 능력을 향상시킬 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로, 국내의 전력 경제 부문에 연구 기반을 조성하는데 기여할 수 있었으며, 국내의 전력 산업 구조 개편 논의의 기술적 기반을 제공하는 데에도 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다. 또한 전력 탁송 문제 해결의 기술적 기반을 제공하고, 실계통 적용에 의해 현실적 문제도 해결하는 능력을 향상시킬 수 있었다고 생각된다.

또한 본 연구에서 제안한 분할 기법은 2차의 독립적인 (separable) 목적함수를 사용하는 전력 계통내의 다른 어느 최적화 분야라도 적용이 가능하다. 앞으로 이러한 연구 결과를 토대로 전력 계통의 분산처리 상태-추정 (distributed state-estimator) 개발 작업에도 적용할 수 있다고 생각된다. 그리고, 본 연구에서 제안된 분산병렬처리 기법의 결과를 발전기 사고나 송전선 사고와 같은 전력 계통의 상정사고(contingency)를 고려한 최적조류를 계산하는 (Security Constrained OPF) 연구에도 적용할 수 있다.

참고문헌

- [1] B. Stott, O. Alsac, and A. J. Monticelli, "Security analysis and optimization," *Proceedings of the IEEE*, 75(12): pp. 1623-1644, December 1987.
- [2] Guy Cohen, "Optimization by decomposition and coordination: A unified approach," *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-23(2): pp. 222-232, April 1978.
- [3] Task Force of the Computer and Analytical Methods Subcommittee of the Power Systems Engineering Committee, "Parallel processing in power systems computation," *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(2): pp. 629-637, May 1992.
- [4] G. Huang and W. Ongsakul, "Speedup and synchronization overhead analysis of Gauss-Seidel type algorithms on a Sequent balance machine," *IEE Proceedings, Part C*, 141(5): pp. 437-444, September 1994.
- [5] IEEE Working Group on Power Plant Response to Load Changes, "MW response of fossil fueled steam units," *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3): pp. 1197-1210, August 1992.
- [6] Shyan-Lung Lin and J. E. Van Ness, "Parallel solution of sparse algebraic equations," *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2): pp. 743-749, May 1994.
- [7] Tsutomu Oyama, Tatsuya Kitahara, and Yasuo Serizawa, "Parallel processing for power system analysis using band matrix," *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(3): pp. 1010-1016, August 1990.
- [8] Balho H. Kim and Ross Baldick, "Coarse-grained distributed optimal power flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(2): pp. 932-939, May 1997.
- [9] Ross Baldick, "Optimization of Power Systems," *Lecture Notes in Electrical and Computer Engineering*, The University of Texas at Austin, 1994.
- [10] Arthur R. Bergen, *Power Systems Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1986.
- [11] Badrul H. Chowdhury and Saifur Rahman, "A review of recent advances in economic dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(4): pp. 1248-1257, November 1990.
- [12] Alex Papalexopoulos, Shangyou Hao, Edwin Liu, and Ken Kato, "Cost/benefit analysis of an optimal power flow: The PG&E experience," *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2): pp. 796-804, May 1994.
- [13] Guy Cohen, "Auxiliary problem principle and decomposition of optimization problems," *Journal of Optimization Theory and Applications*, 32(3): pp. 277-305, November 1980.
- [14] Guy Cohen and Bernadette Miara, "Optimization with an auxiliary constraint and decomposition," *SIAM Journal on Control and Optimization*, 28(1): pp. 137-157, January 1990.
- [15] Guy Cohen and Dao Li Zhu, "Decomposition coordination methods in large scale optimization problems," *Advances in Large Scale Systems*, 1: pp. 203-266, 1984.
- [16] D. P. Bertsekas, "Convexification procedures and decomposition methods for nonconvex optimization problems," *SIAM Journal on Control and Optimization*, 29(2): pp. 169-197, October 1979.
- [17] O. Guler, "On the convergency of the proximal point algorithm for convex minimization," *SIAM Journal on Control and Optimization*, 29(2): pp. 403-419, March 1991.
- [18] S. P. Han and G. Lou, "A parallel algorithm for a class of convex programs," *SIAM Journal on Control and Optimization*, 26(2): pp. 345-355, March 1988.
- [19] M. R. Hestenes, "Multiplier and Gradient methods: Survey paper," *Journal of Optimization Theory and Applications*, 4(5): pp. 303-320, May 1969.
- [20] H. Uzawa, "Studies in Linear and Nonlinear Programming," SpringerVerlag, 1958.
- [21] Balho H. Kim and Ross Baldick, "A comparison of distributed optimal power flow algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(2): pp. 599-604, May 2000.
- [22] Ross Baldick, Balho H. Kim, and Craig Chase, "A Fast Distributed Implementation of Optimal Power Flow," *IEEE/PES Summer Meeting*, San Diego, CA, 1998.
- [23] J. Batut and A. Renaud, "Daily generation scheduling optimization with transmission constraints: A new class of algorithms," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 7(3): pp. 982-989, August 1992.
- [24] Anthony Brooke, David Kendrick, and Alexander Meeraus, *GAMS User's Guide*, The Scientific Press, Redwood City, CA, 1990.
- [25] 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.
- [26] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, Wiley, New York, 2nd edition, 1996.
- [27] Yu-Chi Wu, Atif S. Debs, and Roy E. Marsten, "A direct nonlinear predictor-corrector primal-dual interior point algorithm for optimal power flows," *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2): pp. 876-883, May 1994.

저 자 소개



허 동(許 焯)

1974년 1월 17일 생. 1997년 서울대 전기공학부 졸업. 1999년 서울대 대학원 전기공학부 졸업 (석사). 1999년-현재 서울대학교 공과대학원 전기공학부 박사과정



김발호(金發鎭)

1962년 7월 11일 생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1992년 University of Texas at Austin 전기공학과 졸업 (석사). 1996년 University of Texas at Austin 전기공학과 졸업 (공학박사). 1997년 9월-현재 홍익대학교 전기정보 제어공학과 조교수



박종근(朴鍾根)

1952년 10월 21일 생. 1973년 서울대 전기공학과 졸업. 1979년 동경대 전기공학과 졸업 (석사). 1982년 동경대 전기공학과 졸업 (공학박사). 1983년-현재 서울대학교 전기공학부 교수