

최적조류계산의 효율적인 분산병렬처리

An Efficient Distributed Parallel Processing in Optimal Power Flow

김 발호

연구책임자

홍익대학교 전기제어공학과

김 진호, 허 돈

연구원

서울대학교 전기공학부

Abstract

본 연구에서는 워크스테이션 상에서 최적조류계산의 효율적인 분산병렬처리 기법을 개발하였다. 본 연구의 결과를 실제로 2587개의 송전선을 포함하는 미국 ERCOT 계통에 대하여 사례 연구한 결과 성능이 뛰어남을 알 수 있었다. 본 연구는 최적조류계산을 병렬 처리하는 일반적인 방식을 제시해 줄 수 있을 것이라 생각된다.

1. 서론

본 연구에서는 기본적 OPF 엔진으로서, Interior point OPF code를 사용하여, 워크스테이션 상에서 알고리즘의 신속한 구현 결과를 제시하고자 한다. 또한, 미국의 ERCOT 계통에 대해, 완전한 AC OPF 해를 포함하여, 연구한 여러 연구사례 등을 기술하려고 한다. 많은 기존의 병렬처리 조류계산에 대한 접근방식은 factorization과 관계된 병렬처리기법을 기본으로 하고 있다. 전형적으로, 이는 모든 자료들이 전체 데이터베이스 안에 집적된다는 성향을 보여준다. 그러나, 전체 데이터베이스를 조합하고 유지하는데 있어서 많은 어려움이 있기 때문에, 분산처리기법의 가능성을 본질적으로 제한하는 방식이 될 수밖에 없다. 특별히, 계산이 몇몇 계통들의 시스템을 엮는 것이라면, 양립할 수 없는 데이터베이스를 결합시키는 데에서 치명적인 오류가 발생할 수도 있는 것이다. 반면, 본 연구의 접근방식은 전체 전력계통을 지리학 상으로 구분하고, 병렬적으로 각각의 지역에 대해서 계산을 수행하는 방식을 취하고 있다. 또, 최적 상황에서 매끄러운 처리구현을 하지 못하는 접근방식과는 달

리, 본 연구의 분해방식(decomposition)은 자연스럽게 최적 구조에 어울리는데, 지역간의 통신이 적절하기 때문에, 각 지역의 계산에 할당된 각각의 연산처리가 이루어지는 분산처리 계산과 분해기법은 매우 적절하게 조화가 이루어진다. 각각의 지역 연산처리는 단지 해당 지역의 발전, 수요, 네트워크 데이터만을 필요로 할뿐 아니라, 이미 존재하는 서비스 지역과 일치하게끔 지역이 선택될 수 있어서 이질적인 데이터베이스를 통합하는데 있어서 문제들이 해소될 수 있다. 이런 체제 아래에서 각각의 지역은 계산을 독자적으로 수행하는데, 하나의 연산처리에서 문제가 생기거나, 지역간의 통신에 문제가 생겼을 때, 비용이 많이 들긴 하더라도, 남아 있는 지역들만으로도 계속적으로 그 기능을 할 수 있다. 2장에서는, 기본적인 분할 접근 방식을 제시하고, 3장에서는 효율적인 분산처리 기법을 이용하는 Interior point OPF code로의 변형 방식에 대해서 설명하겠다. 4장에서는 분산 계산 방법을 운영하는 환경에 대해서 다루고, 5, 6장에서는 각각, 사례연구 시스템과 그 사례연구 결과 및 결론을 맺도록 하겠다.

2. 분할처리기법(Decomposition scheme)

분할 처리 기법은 그 접근 방식이 부가 문제 원리(Auxiliary problem principle)에 그 기반을 두고 있다. 기본적인 접근 방침은 전체 시스템과 그에 해당하는 전반적인 최적조류계산을 지리학상의 지역으로 구분하는 것으로, 두 지역의 경계에 가상 버스를 추가함으로써, 인접 지역을 가로지르는 송전 라인을 개념적으로 두 개의 라인으로 복제한다. 유효, 무효 전력 조류의 변수와 전압, 전류 변수가

가상 버스에 대해서 정의되고, 각 지역에 복제된 값이 할당됨과 동시에, 네 개의 변수가 복사된다. 전체 최적조류계산식을 구성하기 위해서, 복사된 변수에 해당하는 각각의 변수가 같은 값을 가질 것을 요구하는데, 즉, 네 개의 변수를 복사된 변수와 같아지도록 하기 위하여, 네 개의 변수를 문제의 제한조건에 추가해야한다. Augmented 라그랑지식 접근방식을 이용하여 각각의 변수들을 이원화하고, 부차적 문제 이론(Auxiliary problem principle)에 의하여 Augmented 라그랑지식에서 교차 항목들을 선형화한다. 이런 식의 접근은 모든 전반적인 문제에 대하여, 각 지역에 대해서 최적화된 문제의 집합으로 분해시켜 준다. 지역적 최적화 문제의 해는 평형조건에서의 라그랑지 계수의 갱신(update)과 함께 변경된다. 각 지역의 최적화 문제는 다른 시스템을 무시한 상태로 그 지역에 대해서만 뿐 기존의 최적조류계산과 매우 유사하다. 특별히, 지역간의 각각의 발전기에 대한 비용은 그 목적함수 범위 안에 주어진다. 그러나, 이 비용과 함께, 각 가상 버스에 할당된 가상 발전기에 대한 목적함수 항들이 더 있다. 각각의 지역 발전기들은, 유효·무효 전력, 전압의 크기, 전류, 즉 버스와 연관된 4가지 변수에 대해서 볼록한 2차 함수의 비용 함수를 가지고 있는 것이다. 가상 발전기의 결과 값은 시스템의 나머지 부분과 상호작용을 통해서 나타나는데, 지역의 경계에서 발전기의 비용함수로써도 해석을 할 수 있다. 이런 이유로, 각 지역에서는, 규모가 큰 분산 최적조류계산을 개선하기 위하여 존재하는 최적조류계산 소프트웨어의 변형된 버전을 이용할 수 있는 것이다. 각각의 연산장치에서의 지역적 문제를 푸는 것을 생각하는 것은 어려운 일이 아니다. 예를 들면, 두 지역간의 문제에서, 지역 b 연산장치에서 풀어지는 동안 지역 a 연산장치가 풀어지는 것이다. 연산장치 내부의 통신은 오직 인접 지역의 가상 발전기에서 계산된 경계변수의 가장 최근 값들을 서로 비교하면 된다. 이러한 정보들은 가상 발전기에서 비용함수를 갱신하고, 라그랑지 계수들을 갱신하는데 사용된다. 연속적인 계산과정에서 풀어진 최적조류계산의 해는 같은 제한 요인들을 가지고 있다. 최적조류계산은, 가상 발전기에 해당하는 항들에 따라서 다른 결과를 보여주고 있다. 첫 번째 이후의 반복

계산에서는, 최적조류계산의 알고리즘이, 과거의 계산 결과에서 유추되어지는 그럴듯한 초기 해로부터 시작해서 풀어질 수 있다. 과거 계산 값은 첫 번째에 영향을 받는 각 반복 계산의 결과가 빨리 수렴하는데 매우 유용하게 작용한다. 과거 연구에서는 수렴 조건에 대해서 논의하였는데, 많은 계통의 케이스 연구를 통해서, 기존의 시스템에 널리 적용되어 온, 분해기법을 이용하지 않은 최적조류계산 알고리즘에 의해 주어진 것과 비슷한 유형의 결과로 수렴하는데, 분해 기법이 단지 3 ~ 5 정도의 반복 계산만 거친다는 것을 경험적으로 증명하였다. 만약 지역들이 작은 개수의 경계 조건만을 갖도록 신중하게 선택된다면, 연산장치 내부의 통신에 큰 부하가 걸리지 않을 것이다. 다중이용 시스템의 연구에서, 자연스러운 지역화는 시스템을 그것의 구성 요소로 나누어주는데, 이는 이용 서비스 지역 내에서의 전송 라인의 수에 비해서, 보통 요소간에는 작은 수의 연결 고리로만 연결되기 때문이다. 최적조류계산의 비효율적인 개선에 기초한 예비적 수렴의 결과와 더불어 분산 기법에 관련된 보다 자세한 점들은 보고서에서 언급하겠다.

3. Interior point OPF

본 연구에서는 이미 언급된 Interior point 최적조류계산(IPOPF) 코드를 사용하였다. 이 소프트웨어는 단지, 유효전력만을 고려하여 얻은 결과로써 제한된 비수렴성을 개선해 주는데, 본 연구에서는 IPOPF의 기본 코드가 분산 기법에서 이용될 수 있게끔 변환시키는 것을 설명하려고 한다. 이미 언급되었듯이, 분산 기법은 유효·무효 전력, 전압의 크기와 위상에 관한 2차의 독립적인 가상 발전기 비용함수를 이용한다. 이것을 보다 포괄적으로 개선하기 위해서, 가상 발전기에 대한 비용함수가 두 가지 주요한 분야에서 IPOPF 코드를 변화될 것을 요구한다.

1. 외부 비용 정보를 적용시키기 위해서 데이터 파일의 세부사항을 증대시켰다.
2. 새로운 결과를 반영시키기 위해서, [16]의 (9)식의 갱신 식에서 항들을 계산하는 코드들을 변경하였다. 특별히, 이것은 그래

디엔트와 최적조류계산에 해당하는 라그랑지의 헤시안을 계산하는 코드를 변경하는 것을 포함하고 있다.

본 연구의 분할 기법 접근 방식은, 각각의 반복 연산이 다음과 같은 조건 아래에서 수행되도록 하였다.

- 동일한 제한조건
- 실제 발전기에 대한 동일한 비용함수
- 가상 발전기의 경우 약간 다른 발전기 데이터

본 연구에서는 IPOPF 코드를 변경하였는데, 그 결과는 아래와 같다.

- IPOPF는 호출프로그램에서 불러질 수 있다.
- 비용함수는 호출 프로그램으로부터 얻어지는 연속적인 호출에 대해서 수정될 수 있다.
- IPOPF는 과거에 얻어진 값들로부터 재 시작될 수 있다.

4. 분배 환경(Distributed Environment)

본 연구에서는 분산 최적조류계산 알고리즘을 워크스테이션의 네트워크 상에서 수행하기 위해서 병렬 가상 머신(PVM) 시스템 ver 3.3을 사용하였다. PVM은 병렬계산을 위하여 무료로 얻을 수 있는 소프트웨어이며, 미 국립 연구소에서 개발하였으며, 약 10000명 정도의 공동 사용자를 보유하고 있다. 그밖에 PVM을 개발하고 튜닝하는데 이용되는 유용한 많은 소프트웨어들이 있는데, PVM의 사용에 대한 상세한 정보들은 PVM 홈페이지에서 찾아볼 수 있다. 본 연구에서는 PVM의 일부분 기능만을 이용하였는데, 본 연구에서 이용한 PVM의 기능은 다음과 같다.

- 네트워크 상에서 떨어진 기계로의 접근 시도
- 기계와 독립적인 이진 배열의 데이터의 축적
- 기존의 의미를 전달하는 메시지를 주고받는 것

실험을 수행하기 위해서, 본 연구에서는 128M RAM을 가지고 있으며, Solaristm을 작동시키는 시

스템을 운영하는, 일곱 개의 Sun UltraSparctm 워크스테이션의 네트워크를 이용하였다. 여덟 개의 지역을 가진 완전한 ERCOT 시스템을 구성하기 위해서, 하나의 추가적인 컴퓨터, Sun Sparc 20tm을 이용하였다. 각각의 워크스테이션마다, 하나의 지역이 할당되고, 공동의 프로그램이 전체 워크스테이션을 통틀어서 수행되었는데, 해당 지역에 대한 발전기, 수요, 네트워크 데이터들을 포함한 각각의 데이터 파일과 함께, 각 네트워크는 다른 데이터 파일들도 읽어 들인다. 이와 같은 방법론은 하나의 프로그램으로써, 많은 데이터를 병렬 처리하는 것이라 할 수 있다. 시스템의 구동은 네트워크 상의 하나의 기계에 대해서 주프로그램을 시작함으로써 시작되는데, 나머지 7개까지의 다른 워크스테이션에 대한 종속적인 수행을 위해서, PVM을 이용한다. 주요 네트워크와 그에 따른 종속적인 네트워크들은 각각의 데이터 파일을 읽어 들이는데, 이런 관점에서 보면, 연산들은 서로 상호작용을 함을 알 수 있다. 반복 연산을 통해서 계산은 진행되는데, 각 반복 연산마다, 근접 지역을 모델링하는 연산들은, 각 지역간의 연결 라인에 대한 유효·무효 전력, 전압의 위상과 크기의 값을 포함하는 메시지를 전송함으로써 서로 통신을 한다. 반복 연산 과정은 6장에서 언급될 정지 조건을 만족시킬 때까지 진행되어서, 그 이후에 정지된다.

<표 1> 사례연구 시스템

버스	지역	핵심 버스	연결	연결 라인	부하
50	2	24,24	2	80	50
78	3	24,24,24	6	126	74
108	4	24,24,24,24	12	186	100
238	2	118,118	2	376	76
360	3	118,118,118	6	570	126
376	2	271,105	3	574	157
753	4	271,105,128,237	12	1100	209
1459	6	271,105,128,237,365,325	28	2145	395
1777	8	271,105,128,237,365,325,74,213	59	2587	462

5. 사례연구 시스템

본 연구에서는 9개의 사례연구 시스템을 이용하였는데, 1부터 5까지의 시스템은 IEEE의 신뢰성 있는 실험용 시스템(RTS)의 다양한 조합을 보여주고, 6부터 8까지의 시스템은, 지역적 경계 조건에 따라 나누어진, ERCOT 시스템의 부분들을 보여준다. 9번 시스템은, ERCOT에서 주요한 역할로 나누어진 ERCOT 시스템을, 가상적으로 완성시켜준다. <표 1>은 실험용 시스템을 요약하고 있다. <표 1>의 첫 번째 열은 각 시스템의 전체 버스의 수를 보여주고 있으며, 두 번째, 세 번째 열은 지역의 수와 각 지역 내에서, 원래의 시스템에 있는 버스들을 지칭하는 “핵심적인” 버스들의 수를 보여준다. 네 번째 열은 각 지역들을 연결하는 연결 라인의 수를 나타내며, 다섯 번째 열은 각각의 시스템 전체에 있는 모든 연결 라인들의 수를 나타낸다. 마지막 열은 시스템 내에서 전체적인 단위당 부하의 총량을 보여주고 있다. 목적함수는 전체적인 시스템에 대해서 유효·무효 전력의 총 생산 비용이며, 무효전력은 같은 발전기의 유효전력 비용의 10^{-6} 정도에서 결정된다. α, β, γ 는 각 시스템에서 수렴을 빨리 하게끔 튜닝을 하였으며, 이 변수들을 결정하는 데 있어서 보다 이론적인 배경에 대해서는 보고서에 언급하였다. 송전 제한 조건은 개별적 라인에서의 온도제한과 모든 버스에서의 전압 제한요인으로 모델링하였다. 사례 연구 결과, 분산 최적조류계산의 가능성에 대한 장점을 충분히 보여주고 있다.

6. 결과 및 결론

<표 2>는 두 가지 방법으로 해를 구하였을 때의 계산 시간을 보여주고 있는데, 하나는 기존의 중앙 집중 방식이고(Centralized), 다른 하나는 분산화(Distributed) 방식이다. 두 경우 모두에 대해서, IPOPF 코드를 사용하였다. 본 연구에서는 0.03 [p.u]를 최대 허용오차로 하여 분산처리 알고리즘의 정지 조건 이용하였다. <표 2>의 마지막 두 행은, 0.03 [p.u]를 정지조건으로 한 상태에서의 속도 증가분과 효율을 보여주는데, IEEE RTS에 대한 효율성은 보다 큰 시스템에서 더 좋은 성능을 나타내면서 20%에서 75% 사이의 값을 갖는 반면, ERCOT 시스템의 효율은 50%에서 65%사이의 값을 갖는다. 이 결과는, 통신 지연이 전체 할당된 시간의 1% 미만으로 주어질 때, 물리적으로 근접한 워크스테이션 상에서 얻어진다. 이러한 효율성은, 중대한 통신 지연을 포함하고 있고, 지역적으로 분리되어 있는 연산처리 상에서 최적조류계산이 수행된다면, 다소 낮아질 수도 있다. 그럼에도 불구하고, <표 2>의 결과는 분산 기법의 효율성이 압도적으로 우월하다는 것을 보여준다.

본 연구에서는 최적조류계산을 효율적으로 분산병렬 처리하는 방법에 대하여 연구하였다. 본 연구의 결과를 계통의 상정사고를 고려한 최적조류계산, 즉 SCOPF(Security-Constrained OPF)에 적용하여 연구를 확장하자고 한다.

표 2 속도 향상과 효율성

계통 유형	IEEE RTS					ERCOT 시스템			
	50	78	108	238	360	376	753	1459	1777
버스 수	50	78	108	238	360	376	753	1459	1777
지역과 연산 수	2	3	4	2	3	2	4	6	8
시간 (중앙집중)[sec]	1.9	2.4	4.2	7.2	11.7	17.6	37.3	66.2	89.5
시간 (분산화)[sec]	4.6	3.3	3.0	5.2	5.1	16.5	15.1	16.9	19.3
속도증가	0.4	0.7	1.4	1.4	2.3	1.1	2.5	3.9	4.6
효율성[%]	20.7	24.2	35.0	69.2	76.5	53.3	61.7	65.3	57.9