

병렬 PSO 알고리즘을 이용한 전력계통의 상태추정

정희명*, 박준호*, 이화석**
*부산대학교, **거제대학

Power System State Estimation Using Parallel PSO Algorithm

Hee Myung Jeong*, June Ho Park*, Hwa-Seok Lee**
*Pusan National University, **Kojoe College

Abstract - In power systems operation, state estimation takes an important role in security control. For the state estimation problem, conventional optimization algorithm, such as weighted least squares (WLS) method, has been widely used. But these algorithms have disadvantages of converging local optimal solution. In these days, a modern heuristic optimization methods such as Particle Swarm Optimization (PSO), are introducing to overcome the problems of classical optimization.

In this paper, we suggested parallel particle swarm optimization (PPSO) to search an optimal solution of state estimation in power systems. To show the usefulness of the proposed method over the conventional PSO, proposed method is applied on the IEEE-57 bus system.

1. 서 론

산업의 발달로 전력품질에 대한 관심이 증가되고 있으며 전력 수요의 증가와 더불어 전력계통은 대규모, 복잡화 되고 있다. 따라서 고도의 계통운전 기술의 필요성이 증가되고 있으며 최소 정전으로 소비자에게 양질의 전력을 공급하기 위해 EMS를 사용하여 효과적으로 에너지 시스템이 제어되고 있다. 이러한 EMS의 제어능력을 향상시키기 위해서는 시스템의 실제 운전상태를 정확하게 추정하는 것이 필수적이다. 따라서 전력계통의 상태추정은 계통의 안전운전을 위한 필수조건이 되었다[1, 2].

전력계통 상태추정은 1969년 Fred Schweppe에 의해 처음으로 전력계통에 응용되기 시작하였으며[1], 현재는 EMS내에서 전력계통의 안정된 운용을 위하여 사용되는 중요한 기본 기능의 하나가 되었다[3, 4]. 상태추정의 주요 기능은 측정데이터로부터 에러를 여과하고 계통의 상태를 추정함으로써 현재 계통에 대한 정확한 데이터베이스를 구축하는 것으로 그 동안 다양한 연구와 개발이 이루어져 왔다[5-7].

현재 전력계통의 상태추정은 Newton 방법에 의한 반복적 수렴방법으로 이용하여 해를 찾고 있다. 그러나 전력계통의 실제장비들은 비선형적 성격을 가지고 있어 미분불가능이고 불연속적이다. 현대의 heuristic 알고리즘은 이러한 비선형 최적화 문제에 효과적이다. Particle Swarm Optimization (PSO) 알고리즘은 진화연산기법의 일종인 heuristic 알고리즘이다[8].

본 논문에서는 병렬 PSO 알고리즘을 전력계통의 상태추정 문제에 적용하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 IEEE-57모선 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 검증하였다.

2. 전력계통의 상태추정

2.1 전력계통의 상태추정 정식화

수학적으로 전력계통의 상태추정은 상태변수, 즉 전압의 크기와 위상각에 대하여 잔류편차의 합을 최소화하는 최적화 문제로 수식화 할 수 있다. 이와 같이 최적화 문제로 수식화 된 상태추정의 평가함수는 일반적으로 가중최소자승법(Weighted Least Square)을 적용하여 구성하며 측정오차가 포함된 측정치와 상태벡터와의 상관관계를 식으로 나타내면 식(1)과 같은 비선형 함수로 나타낼 수 있다.

$$Z = f(X) + e \quad (1)$$

여기서, Z : $m \times 1$ 측정벡터

X : $n \times 1$ 상태벡터

e : $m \times 1$ 측정오차벡터, 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정

규분포

$f(X)$: 상태벡터에 의해 계산된 추정값

m : 측정데이터의 개수

n : 상태변수의 개수

가중최소자승법을 이용한 상태추정의 목적함수는 식(2)와 같다.

$$J(X) = \frac{1}{2} [Z - f(X)]^T R^{-1} [Z - f(X)] \quad (2)$$

$$\text{여기서, } R = \text{diag}[\sigma_1^2 \cdots \sigma_m^2] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \sigma_m^2 \end{bmatrix}$$

3. 병렬 PSO 알고리즘을 이용한 전력계통의 상태추정

3.1 PSO 알고리즘 개요

Particle Swarm Optimization(PSO)는 새로운 진화연산기법의 일종으로 1995년에 J. Kennedy와 R. Eberhart에 의해 제안되었다. PSO는 물고기의 떼(schooling)와 조류의 무리(flocking)와 같은 조직체의 행위에 관한 연구에서 동기가 유발되었다[8-10]. PSO의 특징은 알고리즘이 간단하고, 구현하기 쉬우며, 계산시간이 짧으며 다른 휴리스틱 알고리즘과는 달리 PSO 탐색공간에서 전역해와 국부해 사이를 균형있게 탐색함으로써 조기 수렴하는 것을 극복 할 수 있다는 점이다.

각 개체는 현재의 위치 벡터와 속도 벡터 및 Pbest, Gbest를 이용해서 식 (3)에 의해 이동을 하게 된다. 여기서 속도는 각 탐색점의 방향을 변화시킬 수 있고, 식 (3a)의 전역 및 국부탐색의 결합을 볼 수 있다. 각 개체의 위치벡터 수정은 현재의 위치와 수정된 속도를 이용해서 식 (3b)과 같이 갱신된다.

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 \cdot \text{rand}_1(P_{best} - s_i^k) + c_2 \cdot \text{rand}_2(G_{best} - s_i^k) \quad (3a)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (3b)$$

여기서, v_i^k : i 번째 현재 개체의 속도 벡터

s_i^k : i 번째 현재 개체의 위치 벡터

v_i^{k+1} : i 번째 현재 개체의 속도 벡터

s_i^{k+1} : i 번째 현재 개체의 위치 벡터

N : 개체의 총 수

w : 관성 가중치(inertia weight)

c_1, c_2 : 가속 상수(acceleration constant)

P_{best_i} : i 번째 개체가 지금까지 탐색 중 발견한 최적의 위치벡터

G_{best} : 전체 개체가 지금까지 탐색 중 발견한 최적의 위치 벡터

$k = 1, 2, \dots, N$

3.2 병렬 PSO 알고리즘 개요

일반적으로 해집단 탐색을 토대로 하는 진화연산기법에서 해집단의 크기는 탐색성능에 직접적인 영향을 미치는 중요 파라미터 중의 하나이다. 해집단이 클 경우 좋은 탐색성능을 기대할 수 있지만, 상대적으로 많은 연산시간이 소요되는 단점이 있다.

본 논문에서는 동일한 수준의 탐색성능을 유지하면서 연산시

간을 단축하기 위해서 병렬 PSO 알고리즘을 제안하고 이를 PC 클러스터 시스템을 이용하여 병렬화 하였다. 병렬 PSO는 해집단을 여러 개의 서브 해집단으로 나누고 서로 인접한 서브 해집단과 정보를 교환하는 링 구조로 되어있다. 이들 서브 해집단들은 각각 독립적으로 탐색을 수행하고, 수행된 탐색정보를 인근 해집단과 상호 교환함으로써 탐색성능의 저하없이 연산시간을 단축할 수 있다.

3.3 PC 클러스터 시스템 구축

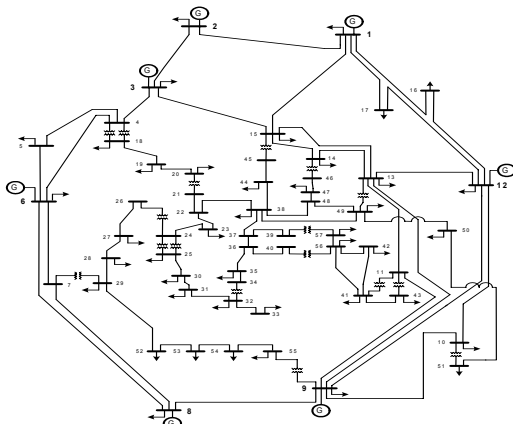
PC 클러스터 시스템이란 다수의 PC 또는 workstation을 고속 네트워크로 연결하여 하나의 컴퓨팅 시스템으로 사용하는 것으로 고성능 또는 고가용성을 얻을 수 있도록 하는 기술을 말한다. 이러한 클러스터 시스템은 일반 PC를 이용함으로써 저렴한 가격에 쉽게 구입하여 이용할 수 있으며, 기존의 병렬형 슈퍼컴퓨터보다 수백에서 수십 배 작은 비용으로 동일한 성능의 시스템 구성이 가능하여 가격 대 성능비가 우수하다.

본 논문에서 사용하기 위해 구축한 것은 Ethernet switch 기반 Fast ethernet 방식의 6-node PC 클러스터 시스템이다. 운영 체제는 Windows 2000 server와 Windows2000 pro를 사용하였으며, NIC으로는 Fast ethernet card를 사용하여 스위칭 허브로 연결하였고, 데이터 전송은 TCP/IP를 이용한 MPI library를 이용하였다. 원격 관리프로그램으로 symantec PC-anywhere, 병렬프로그래밍을 위해 MS Visual C++ 6.0을 사용하였다.

4. 사례 연구

4.1 대상계통 : IEEE-57 모선

본 논문에서 제안한 PSO 알고리즘을 이용한 전력계통 상태추정해법의 유용성을 입증하기 위하여 그림 1과 같은 IEEE-57 모선 계통에 적용하였다.



<그림 1> IEEE 57 모선 계통

모의 계통은 6개의 발전기, 80개의 분기로 구성되어 있으며, 참고문헌[11]의 선로데이터를 이용하여 각 모선의 전압크기 및 각 모선의 위상각을 계산하였고 그 계산된 상태변수를 이용하여 각 선로의 양끝에서의 유, 무효전력을 계산하고 표준편차가 0.01인 정규분포오차를 포함시켜 상태추정을 위한 실측정치로 가정하였다. 전력계통의 상태추정 계산 시 사용한 PSO 알고리즘의 파라미터는 표 1에 나타내었다.

<표 1> 시뮬레이션 개수

파라미터	값
세대 수	500
해집단 수	80
서브 해집단 수	8
c_1, c_2	2.0
w	0.9~0.4

4.2 검토 결과

아래 표 2, 3에서는 IEEE 57 모선 계통에 대한 상태추정을 PSO 알고리즘으로 한 검토결과를 나타내고 있다. 표 2에서 전압크기와 위상각이 실제 조류계산 결과값과 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었고 표 3에서 PC 클러스터 시스템 기반 병렬 PSO 알고리즘을 적용한 결과, 목적함수값은 병렬화 이전과 동일한 수준

의 값을 나타내었으며, 연산시간은 1대의 프로세서를 사용하는 경우 약 12.5초가 소요되는 반면, 8대의 프로세서를 사용한 경우 1.65초가 소요되어 본 논문에서 목적한 탐색성능의 저하없는 연산시간 단축을 확인할 수 있었다.

<표 2> 시뮬레이션 결과 비교

bus	load flow results		state estimation results	
	$ V $	phase angle	$ V $	phase angle
2	1.01	-1.18	1.01	-1.1759
3	0.985	-5.97	0.985	-6.8650
6	0.98	-8.65	0.981	-9.3589
8	1.005	-4.45	1.005	-4.5165
9	0.98	-9.56	0.986	-9.6582
12	1.015	-10.46	1.0162	-11.078

<표 3> 연산시간 비교

프로세서 수(대)	$J(X)$	연산시간(sec)	Speedup
1	6.26	12.5	1
8	6.38	1.65	7.6

5. 결 론

본 논문에서는 PSO 알고리즘을 이용한 전력계통 상태추정문제에 시간단축을 위하여 PC 클러스터 시스템 기반 병렬 PSO 알고리즘을 제안하였다. 그 유용성을 입증하기 위해 IEEE-57 모선 상태추정문제에 적용하였으며 전력계통의 상태추정문제에 PSO 알고리즘을 이용하여 연산시간 단축효과를 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제(R-2005-7-064)임.

[참 고 문 헌]

- [1] F. C. Schweppe, J. Wildes and D. P. Rom, "Power System Static State Estimation", part 1, 2, and 3, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, pp. 120-135, 1970.
- [2] J. F. Dopazo, O. A. Klitkin, G. W. Stagg and L. S. Van Slyck, "State Calculation of Power System from Line Flow Measurements", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, pp. 1698-1708, 1970.
- [3] T. Dy Liacco, "The Role and Implementation of State Estimation in an Energy Management System", *Electric Power and Energy Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 75-79, 1990.
- [4] F. Wu, "Power System State Estimation: A Survey", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 80-87, 1990.
- [5] L. Holten, et al., "Comparison of Different Methods for State Estimation", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 556-564, 1990.
- [6] A. Monticelli and A. Garcia, "Fast Decoupled State Estimator", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 556-564, 1990.
- [7] A. Abur and M. Celik, "A Fast Algorithm for the Weighted Least Absolute Value State Estimation", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, pp. 1-8, 1992.
- [8] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", *Proceedings of IEEE international Conference on Neural Networks (ICNN '95)*, Vol. 4, pp.1942-1948, 1995.
- [9] P. Angeline, "Using selection to improve particle swarm optimization", *In Proc. of Int. Conference on Evolutionary Computation*, Alaska, USA, May 1998.
- [10] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimization", *In proc. of IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation*, Anchorage, USA, May 1998.
- [11] M.A. Pai, "Computer Techniques in Power System Analysis", New Delhi: McGraw-Hill, 1979, pp. 212-216.