

PSO를 이용한 전력계통의 상태추정에 관한 연구

박성진\*, 정희명\*, 박준호\*, 이화석\*\*  
 \*부산대학교, \*\*거제대학교

A Study on Power System State Estimation Using PSO

Sung Jin Park, Hee Myung Jeong\*, June Ho Park\*, Hwa-Seok Lee\*\*  
 \*Pusan National University, \*\*Koje College

**Abstract** - 전력계통에서 상태추정은 신뢰도 높은 제어  
 를 위해 매우 중요한 역할을 한다. 최근에는 상태추정  
 문제를 위해 가중최소자승법과 fast decoupled 방법이  
 많이 쓰이고 있다. 그러나 이런 알고리즘들은 지역해로  
 수렴하기 쉬운 단점이 있다. 이런 문제점을 극복하기 위  
 해 PSO와 같은 heuristic한 방법을 이용한다.  
 본 논문에서는 전력계통에서 상태추정의 최적해를 구하  
 기 위한 방법으로 PSO 알고리즘을 제안한다. 제안한  
 PSO알고리즘의 유용함을 증명하기 위해 IEEE-118모선  
 시스템에 적용해 보고, 그 결과로부터 전력계통의 상태  
 추정에 PSO 알고리즘의 적용가능성을 증명하였다.

의 잔류편차  $e$ 는 측정치와 추정치와의 오차로 정의하며,  
 추정모델을 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$Z = f(X) + e \tag{1}$$

여기서,  $Z$  :  $m \times 1$  측정벡터  
 $X$  :  $n \times 1$  상태벡터  
 $e$  :  $m \times 1$  측정오차벡터, 평균이 0이고 분산이  
 $\sigma^2$  인 정규분포  
 $f(X)$  : 상태벡터에 의해 계산된 추정값  
 $m$  : 측정데이터의 개수  
 $n$  : 상태변수의 개수

1. 서 론

산업의 발달로 전력수요는 꾸준히 증가하고 있으며,  
 전력계통은 대규모화, 복잡화가 가속되고 있는 실정이다.  
 또한, 수요자의 전력품질에 대한 관심도 지속적으로 증  
 대하고 있다. 따라서 고도의 계통운전 기술의 필요성이  
 증가되고 있으며 최소 정전으로 소비자에게 양질의 전력  
 을 공급하기 위해 EMS를 사용하여 효과적으로 에너지  
 시스템이 제어되고 있다. 이러한 EMS의 제어능력을 향  
 상시키기 위해서는 시스템의 실제 운전상태를 정확하게  
 추정하는 것이 필수적이다. 따라서 전력계통의 상태추정  
 은 계통의 안전운전을 위한 필수조건이 되었다[1, 2].

전력계통의 상태추정은 1969년 Fred Schweppe에 의  
 해 처음으로 응용되기 시작하였으며[1], 현재는 EMS내  
 에서 전력계통의 안정된 운영을 위하여 사용되는 중요한  
 기본 기능의 하나가 되었다[3, 4]. 상태추정의 주요 기능  
 은 측정데이터로부터 에러를 걸러내고 계통의 상태를 추  
 정함으로써 현재 계통에 대한 정확한 데이터베이스를 구  
 축하는 것으로 그 동안 다양한 연구와 개발이 이루어져  
 왔다[5-7].

현재 전력계통의 상태추정은 반복적인 수렴방법인  
 Newton 방법을 이용하여 해를 찾고 있다. 그러나 전력  
 계통의 실제장비들은 비선형적 성격을 가지고 있어 미분  
 불가능하고 불연속적이다. 현대의 heuristic 알고리즘은  
 이러한 비선형 최적화 문제에 효과적이다. Particle  
 swarm optimization(PSO) 알고리즘 역시 진화연산기법  
 의 일종인 heuristic 알고리즘이다[8].

본 논문에서는 전력계통의 상태추정 문제에 PSO알고  
 리즘을 적용하였다. 본 논문에서 제안한 방법을  
 IEEE-118모선 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행하  
 였으며, 그 결과를 검증하였다.

2. 상태추정

2.1 상태추정 정식화

전력계통의 상태추정 문제는 수학적으로 상태변수, 즉  
 전압의 크기와 위상각에 대하여 측정오차의 합을 최소화  
 하는 최적화 문제로 수식화 할 수 있다. 여기서 측정치

가중최소자승법을 이용한 상태추정의 목적함수는 식  
 (2)와 같다.

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

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

2.2 불량데이터 검출

상태추정을 위한 측정치 수집에 있어서 측정계기의 고  
 장 혹은 정보 전송의 오류 등으로 인하여 일부 측정데이  
 터에 불량정보가 전송될 수 있다. 이 경우 불량데이터는  
 상태추정과정에서 신뢰도(reliability)를 떨어뜨리는 결과  
 를 초래한다. 따라서 불량데이터를 제거하고 신뢰도를  
 유지하는 것이 매우 중요하며, 현재까지 알려진 불량데  
 이터 추출기법 중 가장 보편적으로 이용되는 기법은 잔  
 류편차에 의한 불량정보 검출 기법이다.

상태추정 결과를  $\hat{x}$  라고 하면 실제 측정치와 추정합수  
 치와의 잔류편차는 식 (3)과 같다.

$$r = Z - h(\hat{x}) \tag{3}$$

$i$ 번째 측정치  $Z_i$ 에 대한 잔류 편차  $r_i$ 가 크면  $Z_i$ 는 불량  
 데이터라고 볼 수 있으나 일상적으로 포함되는 편차를  
 고려할 경우 반드시 불량데이터라고 단정할 수 없다. 따  
 라서 정규잔류편차(normalized residual error)의 대소에  
 의하여 불량데이터를 판정할 필요가 있다. 정규잔류편차  
 $r_N$ 는 식 (4)와 같다.

$$r_N = R^{-1/2} [Z - h(\hat{x})] \tag{4}$$

잔류편차에 의한 불량데이터 판정 알고리즘은 우선 측정  
 치에 대한 잔류편차를 계산하고 기준치를 초과할 경우

측정치를 불량데이터로 판정한다. 그리고 불량데이터로 판명된 측정치들은 제거한 후 상태추정을 행하여 상태추정 신뢰도가 임정치 이상으로 유지되면 중단하고 그렇지 못할 경우에는 반복하여 불량데이터 추출을 시도하는 알고리즘이다[11].

### 3. PSO 알고리즘

#### 3.1 PSO 알고리즘의 개요

PSO(Particle Swarm Optimization)는 1995년에 J. Kennedy와 R. Eberhart에 의해 제안된 새로운 진화연산 기법이다. 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 heuristic 알고리즘과는 달리 PSO 탐색공간에서 전역해와 국부해 사이를 균형있게 탐색함으로써 조기 수렴하는 것을 극복할 수 있다는 점이다. 이러한 PSO 알고리즘의 특징은 다음과 같다.

- (1) PSO는 유전알고리즘 등과 같이 복수의 탐색점을 가지며 각 탐색점의 Pbest와 집단의 Gbest를 이용하여 각 탐색점을 확률적으로 변경시키므로써 전역적 최적해를 탐색하는 최적화 방법이다.
- (2) PSO는 전역 및 국부 탐색의 결합으로 기존 방법들보다 전역해를 찾는데 더 유연하고 강인하다.
- (3) PSO는 기존의 다른 휴리스틱 방법과는 달리 초기 해집단에 좌우되지 않는다. 따라서 탐색공간 어디에서 출발하여도 각 개체들 사이에 공유된 정보에 의해서 조기 수렴을 극복할 수 있고 전역 최적해로 수렴할 수 있다.
- (4) PSO의 개념은 원래 2차원 공간에서 고안되었으나 n차원 공간으로도 확장 가능하다.

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 (5a)의 전역 및 국부탐색의 결합을 볼 수 있다. 각 개체의 위치벡터 수정은 현재의 위치와 수정된 속도를 이용해서 식 (5b)과 같이 갱신된다.

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 \cdot \text{rand}_1(P_{best} - s_i^k) + c_2 \cdot \text{rand}_2(G_{best} - s_i^k) \quad (5a)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (5b)$$

- 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 번째 개체가 지금까지 탐색 중 발견한 최적의 위치벡터  
 $G_{best}$  : 전체 개체가 지금까지 탐색 중 발견한 최적의 위치 벡터  
 $k = 1, 2, \dots, N$

PSO 알고리즘의 전체 흐름도는 그림 1과 같다.

#### 3.2 PSO 알고리즘을 이용한 전력계통의 상태추정

##### (1) 초기화

전력계통의 상태추정 문제를 풀기 위하여 제약조건을 만족하는 상태벡터 particle를 랜덤하게 생성한다. 이때 상태변수인 모션 전압 크기와 위상각을 그림 2에 나타내었다.

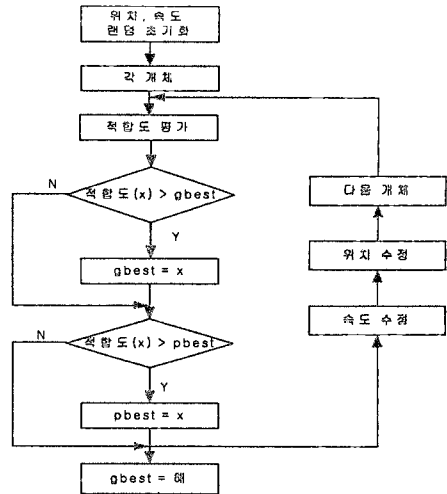


그림 1 PSO 흐름도

$$\begin{bmatrix} \theta_2 & \theta_3 & \dots & \theta_n & V_1 & V_2 & \dots & V_n \end{bmatrix}$$

$\theta_i$ : i번째 bus의 위상각

$V_i$ : i번째 bus의 전압크기

그림 2 particle 구조

##### (2) 적합도 평가

$$J(X) = \min \sum_{i=1}^n \left( \frac{(z_i - f(X))^2}{\sigma_i^2} \right) \quad (6)$$

전력계통의 상태추정 문제는 목적함수  $J(X)$ 를 최소화하는 상태변수인 유효전력(MW), 무효전력(MVAR)를 찾는 문제이다. 그러므로 반복연산마다 목적함수  $J(X)$ 가 최소값을 가지는 상태변수 particle를 평가한다.

##### (3) 종료

본 논문에서는 미리 설정한 세대 수에서 종료하게 된다.

### 4. 사례연구

본 논문에서 제안한 PSO 알고리즘을 이용한 전력계통 상태추정해법의 유용성을 입증하기 위하여 그림 3과 같은 IEEE-118 모션 계통에 적용하였다. PSO 알고리즘의 swarm의 크기는 80 particle, 최대반복횟수는 1000회, 파라메타  $c_1, c_2$ 는 2.0으로 설정하였다. 프로그램은 Windows 와 Visual C++환경에서 구현하였다. 그리고 시뮬레이션 결과는 10번 반복하여 평균값으로 나타내었다.

모의 계통은 53개의 발전기, 179개의 분기로 구성되어 있으며, 참고문헌[12]의 선로데이터를 이용하여 각 모션의 전압크기 및 각 모션의 위상각을 계산하였고 그 계산된 상태변수를 이용하여 각 선로의 양끝에서의 유효, 무효전력을 계산하고 표준편차가 0.01인 정규랜덤오차를 포함시켜 상태추정을 위한 실측치로 가정하였다.

또한 측정치 개수는 716개, 상태변수 235개에서 자유도가 481이다. 따라서 카이분포의 유의수준  $\alpha=0.01$ 의 값을 가질 때 경계값  $t_f=556.1$ 이다.

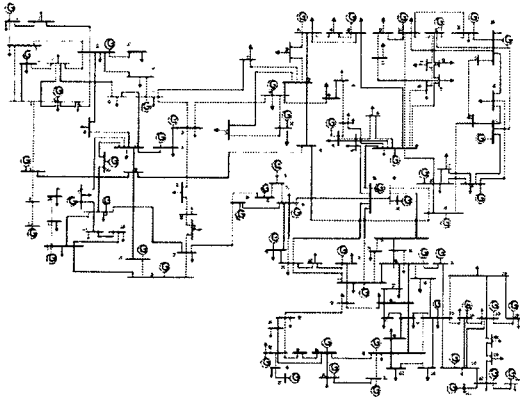


그림 3 IEEE 118 모선 계통

표 1. 시뮬레이션 결과

	$J(X)$
평균값	53.24
최대값	68.54
최소값	46.33

표 2. 결과 비교

bus	load flow results		state estimation results	
	$ V $	phase angle	$ V $	phase angle
1	0.955	-0.109	0.953112	-0.107799
2	0.971	-0.186	0.971471	-0.186636
3	0.967	-0.162	0.968199	-0.161416
4	0.998	-0.218	0.998072	-0.217885
5	1.002	-0.214	1.00198	-0.213909
6	0.990	-0.234	0.98984	-0.233544
7	0.989	-0.233	0.989043	-0.234151
8	1.015	-0.186	1.01505	-0.186142
9	1.042	-0.100	1.04201	-0.100754
10	1.050	0.000	1.04993	0.000000
11	0.985	-0.237	0.985085	-0.236817
12	0.990	-0.224	0.989887	-0.223921
13	0.968	-0.287	0.967974	-0.286943
14	0.983	-0.273	0.982947	-0.273271
15	0.970	-0.381	0.969949	-0.381138
16	0.983	-0.276	0.983064	-0.276019
17	0.995	-0.346	0.994975	-0.345950
18	0.973	-0.385	0.973193	-0.385195
19	0.962	-0.398	0.961793	-0.398072
20	0.956	-0.400	0.955943	-0.400132
21	0.957	-0.386	0.956591	-0.386330
22	0.969	-0.357	0.96855	-0.356832
23	0.999	-0.296	0.999334	-0.295992
24	0.992	-0.343	0.991811	-0.343017
25	1.050	-0.140	1.0501	-0.140073
26	1.015	-0.095	1.01498	-0.095143
27	0.968	-0.348	0.968105	-0.347851
28	0.961	-0.374	0.961202	-0.374286
29	0.963	-0.387	0.962934	-0.386800
30	0.985	-0.278	0.985074	-0.278073

IEEE-118 모선 계통에 대한 상태추정을 PSO 알고리즘으로 한 결과, 표 1에서 상태추정문제의 목적함수인  $J(X)$ 가 53.24로 매우 적었고 그 결과를 전력조류계산 결과와 비교한 표 2에서 전압크기와 위상각이 실제 조류계산 결과값과 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 전력계통 상태추정문제에 PSO 알고리즘을 제안하였고 그 유용성을 입증하기 위해 IEEE-118 모선 상태추정문제에 적용하였다. 전력계통의 상태추정문제에 PSO 알고리즘을 이용하여 목적함수값이 최소가 되는 상태변수값을 구하였고 본 논문에서 제시한 PSO 알고리즘을 사용한 경우 상태변수값이 정확도면에서 우수하다는 것을 보였다. 그러므로 전력계통의 상태추정문제에 heuristic 기법인 PSO 알고리즘의 유용성을 입증하였다.

앞으로는 본 연구의 결과를 기반으로 타 알고리즘을 사용한 경우와 비교·분석하여 실 계통 상태추정문제에 본 논문에서 제시한 알고리즘을 적용하는 연구를 진행할 예정이다.

## [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] 최상봉, "가설검정에 의한 상태추정 불량정보 검출기법", 연세대학교, 1991
- [12] IEEE-118 모선 선로 데이터, "https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf118/iee118cdf.txt"