

PSO기법을 이용한 전력계통의 상태추정해법과 불량정보처리에 관한 연구

유승오*, 정희명*, 박준호*, 이화석**
 부산대학교*, 동의과학대학**

A Study on Power System State Estimation and bad data detection Using PSO

Seung-Oh Ryu*, Hee-Myung Jeong*, June Ho Park*, Hwa-Seok Lee**
 Pusan National University*, Dong-Eui Institute of Technology**

Abstract - In power systems operation, state estimation takes an important role in security control. For the state estimation problem, the weighted least squares(WLS) method and the fast decoupled method have been widely used at present. But these algorithms have disadvantage of converging local optimal solution. In these days, a modern heuristic optimization method such as Particle Swarm Optimization(PSO), are introduced to overcome the problems of classical optimization. In this paper, we proposed particle swarm optimization (PSO) to search an optimal solution of state estimation in power systems. To demonstrate the usefulness of the proposed method, PSO algorithm was tested in the IEEE-57 bus systems. From the simulation results, we can find that the PSO algorithm is applicable for power system state estimation.

1. 서 론

산업의 발달로 인하여 전력수요는 꾸준히 증가하고 있다. 이에 따라 전력계통은 점점 대규모화 및 복잡화가 가속되고 있는 실정이다. 따라서 전력계통의 운전 및 운영에 있어 고도의 기술이 요구되고, 최소 정전으로 소비자에게 양질의 전력을 공급하기위해 에너지관리시스템(energy management system: EMS)를 사용하여 효과적으로 에너지 시스템이 제어되고 있다.

EMS를 활용하여 전력계통의 신뢰도 높은 안전도제어를 행하기 위해서는 양질의 측정데이터를 실시간으로 중앙감시제어 시스템에 입력시켜야 한다. 이를 위해 원방감시제어시스템(SCADA: supervisory control and data acquisition system)으로 현재 전력계통의 운전 상태에 대한 여러 가지 측정데이터 및 전력계통 파라미터 값에 대한 정보를 수집하고 있다. 이때 원거리의 측정 장비에서 수집된 데이터는 통신선로를 거쳐 중앙제어시스템으로 전송되는 과정에 여러 가지 원인으로 인해 잡음 및 불량데이터가 섞이게 된다. 따라서 전력계통의 안전도제어 및 운영을 위하여 불량데이터를 제거하고 측정오차를 최소화하여, 시스템의 실제 운전상태를 정확하게 추정하는 것이 필요하게 되었다. 따라서 전력계통의 상태추정은 계통의 안전운전을 위한 필수조건이 되었다[1, 2].

전력계통 상태추정은 1969년 Schweppe에 의해 전력계통에 응용되기 시작하였으며[1], 현재는 전력계통의 원활한 운영을 위한 EMS의 중요한 기본 기능의 하나이다[3, 4]. 상태추정의 중요한 기능은 오차가 포함된 측정데이터로부터 전력계통의 상태를 실제값에 가깝게 추정하여 현재 전력계통에 대한 최상의 추정치를 구축하는 것으로 여러 연구자들에 의해 다양한 연구와 개발이 이루어져 왔다[5-7]. 현재 전력계통의 상태추정은 가중최소자승법(weighted least square: WLS)에 의한 반복계산을 통하여 해를 구하고 있다. 그러나 이러한 수치해석 방법은

gain matrix의 역행렬의 존재를 보장하지 못하는 문제와 비선형 특성으로 인하여 수렴시 까지 반복 계산해야 되는 문제를 가지고 있다. 최근에 종래의 방법으로는 쉽게 해결되지 않는 비선형 최적화 문제에 경험적 알고리즘인 진화연산, 유전알고리즘 등을 전력계통에 적용해보고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며[5-7], particle swarm optimization(PSO)도 이러한 비선형 최적화 문제에 효과적인 방법으로 알려져 왔다.

본 논문에서는 전력계통의 상태추정 문제에 PSO 알고리즘을 적용하였고 PSO 알고리즘을 이용한 상태추정해법의 유용성을 입증하기 위해 IEEE-57모선 계통에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 검증하였다. 불량정보처리 또한 수행하였다.

2. 전력계통의 상태추정

2.1 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.

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

여기서, Z : $m \times 1$ 측정벡터, X : $n \times 1$ 상태벡터
 e : $m \times 1$ 측정오차벡터, 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포

$f(X)$: 상태벡터에 의해 계산된 추정값
 m : 측정데이터의 개수, n : 상태변수의 개수

가중최소자승법을 이용한 상태추정의 목적함수는 식(2)와 같다.

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

여기서, R 은 측정치의 공분산행렬이며,

$$R = \text{diag}[\sigma_1^2 \ \dots \ \sigma_m^2] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \text{이다.}$$

3. PSO 기법을 이용한 전력계통의 상태추정

3.1 PSO 알고리즘 개요

Particle Swarm Optimization(PSO)는 새로운 진화연산 기법의 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 (3a)에 의해 이동을 하게 된다. 각 개체의 위치벡터 수정은 현재의 위치와 수정된 속도를 이용해서 식 (3b)과 같이 갱신된다.

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 \cdot rand_1(P_{best_i} - s_i^k) + c_2 \cdot rand_2(G_{best} - s_i^k) \quad (3a)$$

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

- 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 수정된 속도 벡터
 s_i^{k+1} : i 번째 수정된 위치 벡터
 N : 개체의 총 수
 w : 관성 가중치(inertia weight)
 c_1, c_2 : 가속 상수(acceleration constant)
 P_{best_i} : i 번째 개체 최적의 위치벡터
 G_{best} : 전체 개체 최적의 위치 벡터
 $k = 1, 2, \dots, N$

PSO 알고리즘의 전체 흐름도는 그림 1과 같다.

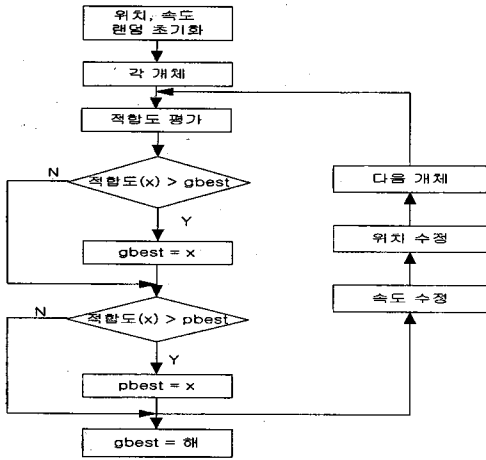


그림.1 PSO 흐름도

3.2 PSO기법을 이용한 전력계통의 상태추정

(1) 상태변수

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

$$[\theta_2 \ \theta_3 \ \dots \ \theta_n \ V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n]$$

θ_i : i 번째 bus의 위상각

V_i : i 번째 bus의 전압크기

그림 2 particle 구조

(2) 제안한 전력계통의 상태추정

단계1) 입력데이터

- 계통구성, 선로데이터
- 측정데이터

단계2)초기화

- 각 모선 전압크기와 위상각을 상태벡터 particle 랜덤 생성

단계3) PSO을 이용한 전력계통의 상태추정

단계4) 수렴조건

- 상태변수의 최대변화량이 기준값인 0.001보다 작거나 최대반복회수에 도달했을 경우 종료

단계5) 불량데이터 검출과 확인

- Chi-square 방법을 이용하여 검출
 - Largest Normalized Residual 방법을 이용하여 확인
- 제안한 PSO를 이용한 전력계통의 상태추정의 전체 흐름도를 그림 3에 나타내었다.

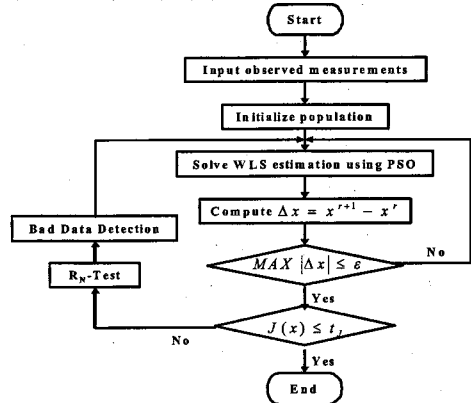


그림 3 제안한 방법의 전체 흐름도

4. 사례 연구

본 논문에서 제안한 PSO 알고리즘을 이용한 전력계통 상태추정해법의 유용성을 입증하기 위하여 IEEE-57 모선 계통에 적용하였다. 모의 계통은 6개의 발전기, 80개의 분기로 구성되어 있으며, 상태변수 113개이고 그 자유도는 199이다. 조류계산으로 각 모선의 전압크기 및 각 모선의 위상각을 계산하였고 그 계산된 상태변수를 이용하여 각 선로의 양끝에서의 유, 무효전력을 계산하고 표준편차가 0.01인 정규랜덤오차를 포함시켜 상태추정을 위한 실측정치로 가정하였다. PSO 알고리즘의 swarm의 크기는 80 particle, 최대반복횟수는 250회, 파라메타 c_1, c_2 는 2.0으로 설정하였다. 프로그램은 Windows 와 Visual C++환경에서 구현하였다. 그리고 불량데이터가 없는 경우와 있는 경우 두 가지를 시뮬레이션 했으며 결과는 10번 반복하여 평균값으로 나타내었다.

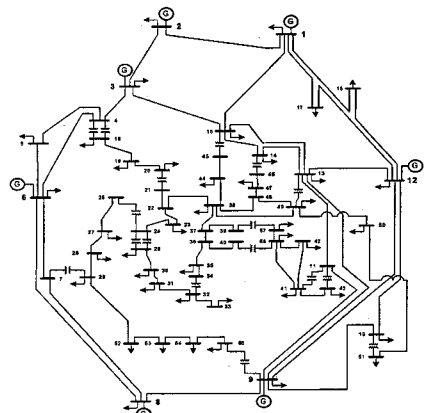


그림 4 IEEE-57 모선 계통

(1) 불량데이터가 없는 경우

측정치는 $\pm 3\sigma$ 이내 표준편차를 가지는 정규랜덤오차를 가정하였다. 표 1은 전력조류계산결과와 PSO기법을 이용한 상태추정결과 비교, 그리고 상태추정의 목적함수 값은 103.41이고 계산시간은 4.343초였다.

표 1 전력조류계산결과와 PSO기법을 이용한 상태추정결과 비교

Bus No.	조류계산 결과		상태추정 결과		Bus No.	조류계산 결과		상태추정 결과	
	V[M]	θ [°]	V[M]	θ [°]		V[M]	θ [°]	V[M]	θ [°]
1	1.040	0.0	1.040	0.0	30	0.962	-18.68	0.961	-18.797
2	1.010	-1.18	1.010	-1.179	31	0.936	-19.34	0.932	-19.328
3	0.985	-5.97	0.984	-6.019	32	0.949	-18.46	0.951	-18.519
4	0.981	-7.32	0.980	-7.361	33	0.947	-18.50	0.948	-18.574
5	0.976	-8.52	0.974	-8.591	34	0.959	-14.10	0.958	-14.153
6	0.980	-8.65	0.978	-8.736	35	0.966	-13.86	0.965	-13.871
7	0.984	-7.58	0.982	-7.681	36	0.976	-13.59	0.974	-13.625
8	1.005	-4.45	1.003	-4.531	37	0.965	-15.41	0.969	-15.442
9	0.980	-9.56	0.978	-9.629	38	1.013	-12.71	1.011	-12.747
10	0.986	-11.43	0.985	-11.398	39	0.983	-13.46	0.982	-13.516
11	0.974	-10.17	0.973	-10.225	40	0.979	-13.62	0.971	-13.653
12	1.015	-10.46	1.015	-10.419	41	0.996	-14.05	0.997	-14.091
13	0.979	-9.79	0.978	-9.787	42	0.965	-15.50	0.968	-15.517
14	0.970	-9.33	0.969	-9.315	43	1.010	-11.33	1.008	-11.370
15	0.988	-7.18	0.986	-7.170	44	1.017	-11.83	1.015	-11.794
16	1.013	-8.85	1.011	-8.769	45	1.036	-9.25	1.035	-9.210
17	1.017	-5.39	1.016	-5.396	46	1.060	-11.09	1.058	-11.101
18	1.001	-11.71	0.998	-11.610	47	1.053	-12.49	1.053	-12.534
19	0.970	-13.20	0.973	-13.305	48	1.027	-12.57	1.027	-12.639
20	0.964	-13.41	0.964	-13.633	49	1.036	-12.52	1.036	-12.988
21	1.008	-12.89	1.010	-13.097	50	1.023	-13.39	1.023	-13.454
22	1.010	-12.84	1.009	-12.826	51	1.052	-12.52	1.051	-12.522
23	1.008	-12.91	1.008	-12.998	52	0.980	-11.47	0.981	-11.624
24	0.999	-13.25	0.999	-13.468	53	0.971	-12.23	0.971	-12.357
25	0.982	-16.13	0.980	-16.246	54	0.996	-11.65	0.995	-11.833
26	0.959	-12.95	0.959	-13.176	55	1.031	-10.78	1.029	-10.923
27	0.982	-11.48	0.980	-11.615	56	0.968	-16.04	0.972	-16.136
28	0.997	-10.45	0.994	-10.596	57	0.965	-16.56	0.968	-16.674
29	1.010	-9.75	1.009	-9.870					

(2) 불량데이터가 있는 경우

불량데이터는 single bad data의 경우 모선 3에서 4의 선로 유효전력을 가정하였고 multiple bad data의 경우 모선 1에서 2의 선로 무효전력과 모선 1에서 17의 선로 무효전력을 가정하였다. 각각 그 오차는 10σ 을 주었다. 표 2는 Largest Normalized Residual 방법을 이용하여 불량데이터를 제거한 single bad data의 결과와 multiple bad data결과이다. 목적함수 값은 각각 113.85, 118.13이고 그 계산시간은 8.671초, 12.984초이다.

5. 결론

본 논문에서는 전력계통 상태추정문제에 PSO 알고리즘을 제안하였고 그 유용성을 입증하기 위해 IEEE-57 모선 상태추정문제에 적용하였다. 전력계통의 상태추정문제에 PSO 알고리즘을 이용하여 목적함수값이 최소가 되는 상태변수값을 구하였고 본 논문에서 제시한 PSO 알고리즘을 사용한 경우 불량데이터가 없는 경우와 있는 경우 둘 다 상태변수값이 정확도면에서 우수하고 계산시간도 충분히 짧음을 보였다. 그러므로 전력계통의 상태추정문제에 heuristic 기법인 PSO 알고리즘이 적용가능함을 확인하였다.

앞으로는 본 연구 결과를 기반으로 더 큰 계통에 적용해보고, 더 나아가 실제통에 적용해보고, 타 알고리즘을 사용한 경우와 비교 분석하여 실 계통 상태추정문제에 본 논문에서 제시한 알고리즘을 적용하는 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

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

표 2 single bad data결과와 multiple bad data결과 비교

Bus No.	single bad data		multiple bad data		Bus No.	single bad data		multiple bad data	
	V[M]	θ [°]	V[M]	θ [°]		V[M]	θ [°]	V[M]	θ [°]
1	1.039	0.0	1.037	0.0	20	0.957	-18.708	0.982	-18.880
2	1.009	-1.208	1.007	-1.190	31	0.930	-19.384	0.935	-19.547
3	0.983	-8.004	0.982	-8.044	32	0.949	-18.444	0.947	-18.522
4	0.978	-7.359	0.977	-7.295	33	0.948	-18.484	0.945	-18.688
5	0.975	-8.550	0.974	-8.455	34	0.959	-14.177	0.958	-14.073
6	0.979	-8.875	0.978	-8.855	35	0.966	-13.937	0.965	-13.857
7	0.983	-7.591	0.984	-7.522	36	0.975	-13.871	0.974	-13.582
8	1.004	-4.478	1.004	-4.377	37	0.984	-13.477	0.983	-13.390
9	0.979	-9.583	0.979	-9.482	38	1.011	-12.744	1.013	-12.835
10	0.988	-11.462	0.984	-11.398	39	0.982	-13.527	0.981	-13.446
11	0.974	-10.180	0.972	-10.121	40	0.972	-13.892	0.971	-13.808
12	1.015	-10.487	1.012	-10.430	41	0.996	-13.986	0.993	-14.286
13	0.977	-9.808	0.975	-9.734	42	0.965	-15.435	0.962	-15.845
14	0.969	-9.352	0.967	-9.275	43	1.008	-11.286	1.007	-11.396
15	0.987	-7.201	0.985	-7.131	44	1.015	-11.859	1.016	-11.741
16	1.012	-8.871	1.010	-8.812	45	1.035	-9.277	1.034	-9.212
17	1.016	-5.413	1.014	-5.429	46	1.059	-11.109	1.058	-11.021
18	0.998	-11.770	0.996	-11.782	47	1.033	-12.505	1.033	-12.401
19	0.968	-13.220	0.966	-13.483	48	1.027	-12.805	1.027	-12.488
20	0.961	-13.448	0.959	-13.638	49	1.036	-12.923	1.036	-12.821
21	1.007	-12.971	1.010	-12.861	50	1.023	-13.406	1.022	-13.353
22	1.008	-12.903	1.011	-12.780	51	1.052	-12.558	1.050	-12.492
23	1.007	-12.962	1.010	-12.841	52	0.978	-11.450	0.982	-11.380
24	0.998	-13.269	1.001	-13.307	53	0.968	-12.225	0.972	-12.108
25	0.977	-18.161	0.981	-18.290	54	0.995	-11.663	0.997	-11.490
26	0.958	-12.959	0.960	-12.937	55	1.030	-10.805	1.029	-10.804
27	0.980	-11.411	0.982	-11.450	56	0.967	-15.986	0.965	-16.508
28	0.995	-10.463	0.997	-10.425	57	0.983	-16.802	0.981	-16.987
29	1.010	-9.752	1.012	-9.712					

[참고 문헌]

- [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. Høitun, 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.