

적응진화 알고리즘을 이용한 전력계통의 상태추정에 관한 연구

정희명*, 김형수*, 박준호*, 이화석**
*부산대학교, **거제대학

A Study on State Estimation in Power Systems Using Adaptive Evolutionary Algorithm

Hee Myung Jeong*, Hyung-Su Kim*, June Ho Park*, Hwa-Seok Lee**
*Pusan National University, **Kojje College

Abstract - In power systems, the state estimation takes an important role in security control. At present, the weighted least squares(WLS) method has been widely used to the state estimation computation. This paper presents an application of Adaptive Evolutionary Algorithm(AEA) to state estimation in power systems. AEA is a optimization method to overcome the problems of classical optimization. AEA is employed to solve state estimation on the 6 bus system.

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

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]. 모든 계통 해석은 상태추정의 결과로부터 출발하므로 단일 계통의 측정데이터 중 결정적인 불량 데이터가 포함된 경우 상태추정을 거치지 않는다면 이로 인하여 계통운전에 결정적인 실수를 범할 수 있다. 따라서 상태추정은 EMS에서 매우 중요한 위치를 차지하며 최근 모든 전력회사의 EMS에는 상태추정 프로그램을 사용하고 있다[8].

적응진화 알고리즘은 해집단을 다음세대로 진화시킬 때, 유전 알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 최적화 기법이다.

본 논문에서는 적응진화 알고리즘을 전력계통의 상태추정 문제에 적용하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 6모선 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 검증하였다.

2. 전력계통의 상태추정

2.1 상태추정의 기본이론

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.

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

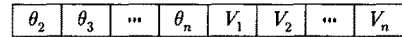
3. 적응진화 알고리즘을 이용한 상태추정

3.1 적응진화 알고리즘

본 논문에서는 한 세대에서 다음 세대로 진화시킬 때 유전 알고리즘과 진화전략을 동시에 적용하고, 세대의 진화과정에서 유리한 진화연산기법이 다음 세대의 해집단을 형성하는데 우위에 있도록 하는 적응진화 알고리즘을 제안하였다.

3.2 적응진화 알고리즘을 이용한 상태추정

(1) 초기화
 전력계통의 상태추정 문제를 풀기 위하여 제약조건을 만족하는 스트링을 랜덤하게 생성한다. 이때 상태변수인 모선 전압 크기와 위상각을 다른 크기의 염색체를 사용하여 스트링을 구성하였고 그림 1에 나타내었다.



θ_i : i번째 bus의 위상각

V_i : i번째 bus의 전압크기

<그림 1> 스트링 구조

(2) 적응진화 알고리즘의 평가

적응진화 알고리즘의 적합도 평가는 식 (2)의 목적함수를 이용하여 구성한 식 (3)의 적합도 함수로부터 각 스트링을 평가한다.

$$\text{Fitness} = \frac{A}{B + J(X)} \tag{3}$$

여기서, $J(X)$: 식 (2)의 목적함수
 A, B : 상수

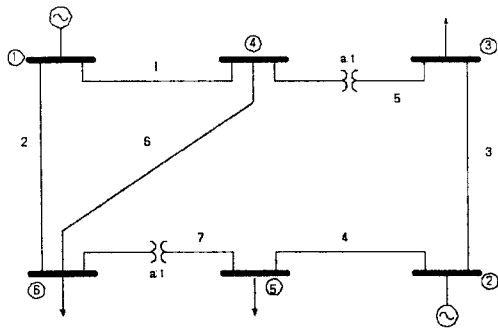
적응진화 알고리즘의 복제 과정에서는 식 (3)에 나타난 적합도에 비례하여 복제하는 룰렛휠 방법을 사용하였고, 교배 및 돌연변이를 적용한 후 적합도가 가장 높은 개체를 다음 세대로 복제하는 엘리트즘을 적용하였다.

(3) 종료

본 논문에서는 미리 설정한 세대 수에서 종료하게 되고, 이 세대 수는 상태변수의 개수와 해집단의 크기에 따라 결정한다.

4. 사례연구

본 논문에서 제안한 적응진화 알고리즘을 이용한 전력계통 상태 추정해법의 유용성을 입증하기 위하여 그림 2와 같은 6모선 7선로 계통에 적용하였다. 표 1, 2에 선로 및 모선데이터를 나타내었고, 이를 이용하여 각 모선의 전압크기 및 1번 모선을 제외한 각 모선의 위상각을 계산하였다. 그 결과를 표 3에 나타내었다. 계산된 상태변수를 이용하여 각 선로의 양끝에서의 유, 무효전력을 계산하고 표준편차가 0.01인 정규랜덤오차를 포함시켜 상태추정을 위한 실측치로 가정하였다. 이를 표 4에 나타내었다.



〈그림 2〉 6모선 모의계통

〈표 1〉 선로데이터(50MVA 기준)

Line No.	Between buses	Line impedance	Half line charging admittance	Off-nominal turns ratio(a)
1	1-4	0.08+j0.37	0.007	-
2	1-6	0.123+j0.518	0.010	-
3	2-3	0.732+j1.05	0	-
4	2-5	0.282+j0.64	0	-
5	4-3	0+j0.133	0	0.909
6	4-6	0.097+j0.407	0.0076	-
7	6-5	0+j0.3	0	0.976

〈표 2〉 모선데이터

Bus No.	Type	Generation		Load		Voltage magnitude V
		P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)	
1	Slack	-	-	-	-	1.05
2	P-V	25.0	-	-	-	1.02
3	P-Q	-	-	27.5	6.5	-
4	P-Q	-	-	-	-	-
5	P-Q	-	-	15	9	-
6	P-Q	-	-	25	2.5	-

〈표 3〉 계산된 결과

Bus No.	Voltage magnitude	Angle	Generation		Load	
			MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.05	0.0	48.2	23.8	0	0
2	1.02	-2.8656	25.0	11.0	0	0
3	0.8307	-13.3805	0	0	27.5	6.5
4	0.9310	-9.9184	0	0	0	0
5	0.8511	-13.0395	0	0	15.0	9.0
6	0.9058	-12.5114	0	0	25.0	2.5

〈표 4〉 측정치

Between buses	유효전력	무효전력
1-4	0.513	0.266
1-6	0.452	0.224
2-3	0.1929	0.0663
2-5	0.3091	0.157
3-2	-0.1641	0.0244
3-4	-0.3518	-0.616
4-1	-0.4876	-0.155
4-3	0.352	0.713
4-6	0.1026	0.0357
5-2	-0.2766	-0.0832
5-6	-0.0241	-0.1545
6-1	-0.4231	-0.1087
6-4	-0.1013	-0.0302
6-5	0.0241	0.1647

모의실험을 위한 측정치 개수, 해집단의 크기와 세대 수, 적합도 함수의 계수값을 표 5에 나타내었다. 각 경우에 대하여 적응진화 알고리즘을 이용하여 구한 상태추정된 각 모선의 전압크기와 위상각을 표 6에 나타내었다.

〈표 5〉 시뮬레이션 데이터

case	측정치 개수	A	B	해집단 크기	세대 수
1	14	1.0	1.0	100	2000
2	22	1.0	1.0	100	2000
3	28	1.0	1.0	100	2000

〈표 6〉 시뮬레이션 결과

Bus No.	case 1		case 2		case 3	
	V	θ	V	θ	V	θ
1	1.035	0.0	1.046	0.0	1.051	0.0
2	1.009	-2.880	1.022	-2.852	1.026	-2.805
3	0.822	-13.443	0.836	-13.102	0.841	-12.97
4	0.914	-10.203	0.926	-9.962	0.931	-9.866
5	0.835	-13.372	0.849	-13.041	0.855	-12.886
6	0.889	-12.842	0.902	-12.528	0.908	-12.389
평균 오차	0.0152	0.0151	0.004	0.0052	0.0044	0.0131

표 5에 나타난 것처럼 측정치 개수가 서로 다른 경우에도 적응진화 알고리즘은 각 모선의 전압크기와 위상각을 구하였고, 실제값과 큰 차이를 보이지 않았다.

3. 결 론

본 논문에서는 전력계통 상태추정문제에 적응진화 알고리즘을 적용하였으며, 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 상태추정문제에 적응진화 알고리즘을 이용하여 목적함수값이 최소가 되는 상태변수값을 구하였다.
 - 2) 본 논문에서 제시한 적응진화 알고리즘을 사용한 경우 측정치 개수에 상관없이 구하고자 하는 상태변수값을 얻을 수 있었다.
- 앞으로는 본 연구의 결과를 기반으로 상태추정의 기능 중 하나인 불량데이터 검출법을 추가하여 더 큰 계통에 적용해보고, 실 계통 상태추정문제에 본 논문에서 제시한 알고리즘을 적용하는 연구를 진행할 예정이다.

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] 문영현 외, "EMS 관련 소프트웨어 개발에 관한 연구 중간 보고서", 기초전력공학 공동 연구소, 1997