

변전소 상태변수 추정에 관한 연구

이흥재* 김용한* 박성민* 강현재**
*광운대학교 전기공학과 **한국전력 중부전력소

A Study on the State Estimation of a Substation

H. J. Lee* Y. H. Kim* S. M. Park* H. J. Kang**
*KwangWoon Univ. **KEPCO

Abstract - As the power system automation, especially the substation automation is currently a major issue, it has been widely studied. Since a measured value usually has an error that results in the communication process and the characteristics of a measurement device mainly depending on the reliability. The accuracy and reliability of measured values at a substation is an important factor for substation automation.

In this paper, a state estimation algorithm is proposed for domestic 154kV/22.9kV distribution substations, and the results showed promising application.

1. 서 론

오늘날의 전력계통은 전력 수요의 증가에 따라서 대규모화 되어가고 있으며, 안정성과 신뢰성을 확보하기 위한 여러 가지 제반 설비들도 증가하고 있다. 전세계적으로 이러한 대규모 전력 시스템과 제반 설비들을 효율적으로 운용하기 위한 다양한 시스템을 도입하여 사용하고 있으며, 이러한 시스템에서는 전압, 전류 및 유효전력, 무효전력 등을 측정하고 있다. 이러한 측정 데이터는 계측설비 자체 오차와 측정값 전송과정에서 발생할 수 있는 오차 등으로 인해 신뢰도가 저하된다. 이러한 오차를 내포한 데이터는 대형화된 전력계통을 효율적으로 운영하기 위한 여러 시스템의 기능을 저하시킬 수 있으므로 측정되는 데이터의 정확성과 신뢰성의 확보는 전력 시스템의 신뢰성 있는 운용을 위해 매우 중요하며, 따라서 이의 중요성을 인식한 세계 각국에서는 측정값의 신뢰성 확보를 위한 많은 노력을 경주하고 있다.

이와 같은 상황에서 측정되는 데이터의 정확성과 신뢰성을 높이기 위하여, 측정값으로부터 오차를 여과하는 동시에 계통의 상태를 추정함으로써 현재 계통에 대한 정확한 데이터베이스를 구축하는 기법인 상태추정에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있으며, 이러한 상태추정에 관한 연구는 송전계통을 필두로 하여, 90년대에 들어서는 배전계통의 전력조류 상태추정[1], 3상 불평형 배전계통의 상태추정기에 대한 연구[2], 3상 불평형 배전계통에서의 상태추정[3] 등 배전계통으로 확산되는 추세이다. 현재 상태추정에 관한 연구는 송전계통에 국한되어 있으며, 변전소에서의 경우는 전무한 상태이다.

향후 전력계통 산업시설의 규제완화가 진행되면, 전력 시설의 설치, 운용, 유지에 소요되는 비용을 줄이고자 하는 요구가 증가될 것이며, 이는 변전소 무인자동화 실현을 위한 정확도가 높은 데이터 획득의 필요성을 더욱 배가시킬 것이다[4].

전술한 바와 같이, 변전소 무인 자동화를 이루기 위해서는 변전소 계측설비의 측정값에 대한 신뢰도와 정확성이 요구되며, 이를 위해서는 변전소를 대상으로 한 측정값의 상태변수 추정에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 이중 모선 구조의 국내 154kV급 배전 변전소를 대상으로 실제 측정값에 대하여 신뢰도를 높이고, 각 계측설비의 정확도에 따라 오차의 편차를 변경하여 각각의 계측기의 신뢰도에 가중치를 줄 수 있는 방식의 상태추정기법을 연구하였다.

2. 변전소 상태변수 추정 모델링

2.1 상태추정의 기본이론

상태추정은 식(1)과 같이 측정값과 오차의 관계에 근거하여 정식화 할 수 있다.

$$z^{meas} = z^{true} + v \tag{1}$$

여기서, z^{meas} : 측정값
 z^{true} : 실제상태변수
 v : 오차

이때, 오차가 unbiased이고, 오차의 PDF(Probability Density Function)가 중심값이 0인 가우스 분포를 갖으면, v 의 PDF는 다음의 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$PDF(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-v^2/2\sigma^2) \tag{2}$$

여기서, σ : 오차의 표준 편차

z^{meas} 의 PDF는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PDF(z^{meas}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z^{meas} - z^{true})^2}{2\sigma^2}\right] \tag{3}$$

상태추정의 대표적인 기법으로는 ML(Maximum Likelihood), WLS(Weighted Least Square), and MV(Minimum Variance)가 있으며, ML의 추정방법에서는 식(4)와 같이 z^{meas} 의 PDF를 최대화하는 상태변수 x 를 구함으로써 상태추정한다.

$$\max_x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z^{meas} - f(x))^2}{2\sigma^2}\right] \tag{4}$$

z^{meas} 의 PDF가 최대치일 때의 x 를 구하는 것은 자 로그를 취한 z^{meas} 의 PDF가 최대치일 때의 x 를 구하는 것과 같으므로 계산의 편의를 위해 식(5)와 같이 표현할 수 있으며, 또한 식(5)의 이차항 계수가 음의 값이므로 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\max_x [-\ln(\sigma\sqrt{2\pi}) - \frac{1}{2} \frac{(z^{meas} - f(x))^2}{\sigma^2}] \tag{5}$$

$$\min_x \left[-\frac{(z^{meas} - f(x))^2}{\sigma^2} \right] \quad (6)$$

식(6)은 WLS 방식의 상태추정을 표현하는 바, 전술한 바와 같이 측정기기의 오차가 편중되지 않고, 오차의 PDF가 중심값이 0인 가우스 분포를 가질 때의 ML 추정의 방법은 WLS 추정과 동일하게 되므로, 이러한 상태추정을 다수의 측정기기에 대하여 나타내면 다음의 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$\min_x J(x) = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{(z_i^{meas} - f_i(x))^2}{\sigma_i^2} \quad (7)$$

여기서, f_i : 해당 측정기기의 측정함수
 σ_i^2 : 해당 측정기기 오차의 분산
 $J(x)$: 측정기기 오차함수
 N_m : independent 측정기기 수
 z_i^{meas} : 해당 측정기기 측정값

여기서 f_i 가 선형함수인 경우에는 식(8), 식(9)와 같이 주어진다.

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_{N_m}(x) \end{bmatrix} = [H]x \quad (8)$$

$$z^{meas} = \begin{bmatrix} z_1^{meas} \\ z_2^{meas} \\ \vdots \\ z_{N_m}^{meas} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{N_m}^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(8), 식(9), 식(10)을 이용하여 식(7)을 정리하면 식(11)과 같다.

$$\min_x J(x) = [z^{meas} - [H]x]^T [R^{-1}] [z^{meas} - [H]x] \quad (11)$$

식(11)에서 측정기기의 오차함수를 최소화하기 위한 최적조건은 다음과 같다.

$$\nabla J(x) = -2[H]^T [R^{-1}]z^{meas} + 2[H]^T [R^{-1}][H]x = 0 \quad (12)$$

$$x^{est} = [[H]^T [R^{-1}][H]]^{-1} [H]^T [R^{-1}]z^{meas} \quad (13)$$

2.2 변전소 시스템의 모델링

변전소에서의 측정값은 P, Q, V, I 등이 있으나, 본 논문에서는 변전소의 CT에서 측정되는 전류값을 상태추정하기로 한다. 그림 1과 같은 154kV급 이중 모선 구조의 배전 변전소 계측기의 측정값과 실제상태변수들의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} z_1^{meas} \\ z_2^{meas} \\ \vdots \\ z_{33}^{meas} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^{true} \\ z_2^{true} \\ \vdots \\ z_{33}^{true} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

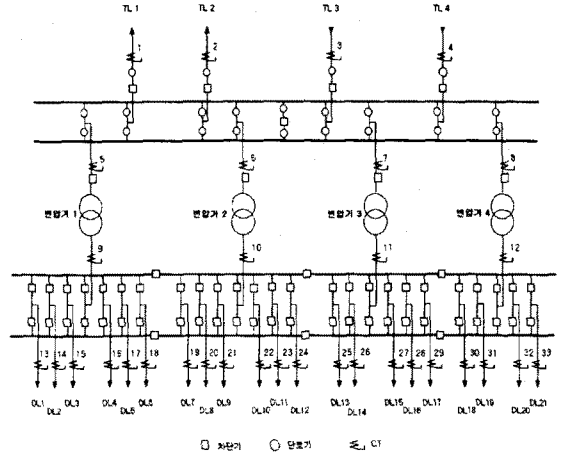


그림 1 은평 변전소의 구조

그리고 상위 송전선에서 대상변전소로의 공급 송전선의 측정전류값을 음의 값으로 표시하고 대상변전소내의 버스에서의 미세손실을 무시하면 실제상태변수들의 관계는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$z_1^{true} + z_2^{true} + z_3^{true} + z_4^{true} + z_5^{true} + z_6^{true} + z_7^{true} + z_8^{true} = 0 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} z_5^{true} \\ z_6^{true} \\ z_7^{true} \\ z_8^{true} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_9^{true} \\ z_{10}^{true} \\ z_{11}^{true} \\ z_{12}^{true} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{M1} \\ v_{M2} \\ v_{M3} \\ v_{M4} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, $M(1, 2, 3, 4)$: 각 MTR의 변전비
 $v_M(1, 2, 3, 4)$: 각 MTR의 변전오차

$$z_9^{true} - (z_{13}^{true} + z_{14}^{true} + z_{15}^{true} + z_{16}^{true} + z_{17}^{true} + z_{18}^{true}) = 0 \quad (17)$$

$$z_{10}^{true} - (z_{19}^{true} + z_{20}^{true} + z_{21}^{true} + z_{22}^{true} + z_{23}^{true} + z_{24}^{true}) = 0 \quad (18)$$

$$z_{11}^{true} - (z_{25}^{true} + z_{26}^{true} + z_{27}^{true} + z_{28}^{true} + z_{29}^{true}) = 0 \quad (19)$$

$$z_{12}^{true} - (z_{30}^{true} + z_{31}^{true} + z_{32}^{true} + z_{33}^{true}) = 0 \quad (20)$$

상기의 식(15)~(20)을 이용하여 측정함수벡터를 구성하고, 각각의 측정기기 정확도를 오차의 분산벡터로 구성함에 따른 식(11), 식(12), 식(13)을 이용하여 상태추정을 수행하였다.

2.3 변전소 상태추정 결과

다음 표 1, 표 2는 그림 1의 은평 변전소에서 10시와 19시에 측정된 실제계의 데이터를 사용하여 상태추정을 수행한 결과로서, 현재 은평 변전소에서는 ±1.5%의 오차허용범위를 갖는 기기를 사용하고 있으므로 표준편차를 0.005로 지정하였다.

계측기기의 신뢰도 차이에 의한 추정값의 변화를 보기 위하여, 신뢰도가 높다고 가정된 계측기들의 표준편차 즉, σ 의 값을 0.001로 변경한 후 상태추정값과 측정값 비교를 표 3에 제시하였다.

표 1 10시 측정값과 추정값의 비교 및 오차 분석

CT No.	측정값	추정값	오차	% 오차
1	316.0	318.793	2.793	0.88
2	310.0	312.793	2.793	0.89
3	-441.0	-438.207	2.793	0.64
4	-451.0	-448.207	2.793	0.62
5	49.0	48.994	-0.006	0.01
6	74.0	74.548	0.548	0.73
7	76.0	77.808	1.808	2.32
8	52.0	52.443	0.443	0.84
9	328.0	328.931	0.931	0.28
10	497.0	499.289	2.289	0.46
11	514.0	521.023	7.023	1.35
12	350.0	351.922	1.922	0.55
13	24.0	23.489	-0.512	2.18
14	76.5	75.989	-0.511	0.67
15	20.8	20.289	-0.512	2.52
16	90.3	89.789	-0.511	0.57
17	35.8	35.289	-0.511	1.45
18	84.6	84.089	-0.511	0.61
19	99.4	97.448	-1.952	2.00
20	78.1	76.148	-1.952	2.56
21	101.2	99.248	-1.952	1.97
22	96.1	94.148	-1.952	2.07
23	62.5	60.548	-1.952	3.22
24	73.7	71.748	-1.952	2.72
25	110.3	103.425	-6.875	6.65
26	117.7	110.825	-6.875	6.20
27	114.8	107.925	-6.875	6.37
28	107.2	100.325	-6.875	6.85
29	105.4	98.525	-6.875	6.98
30	54.3	52.731	-1.570	2.98
31	108.1	106.531	-1.569	1.47
32	82.0	80.431	-1.570	1.95
33	113.8	112.231	-1.569	1.40

표 2 19시 측정값과 추정값의 비교 및 오차 분석

CT No.	측정값	추정값	오차	% 오차
1	306.0	308.260	2.260	0.73
2	302.0	304.260	2.260	0.74
3	-470.0	-467.740	2.260	0.48
4	-477.0	-474.740	2.260	0.48
5	60.0	59.152	-0.848	1.43
6	97.0	97.580	0.580	0.59
7	99.0	100.739	1.739	1.73
8	67.0	67.790	0.790	1.17
9	401.0	404.785	3.785	0.94
10	650.0	660.973	10.973	1.66
11	666.0	682.032	16.032	2.35
12	454.0	462.376	8.376	1.81
13	16.7	13.381	-3.319	24.80
14	97.1	93.781	-3.319	3.54
15	27.3	23.981	-3.319	13.84
16	129.1	125.781	-3.319	2.64
17	33.8	30.481	-3.319	10.98
18	120.7	117.381	-3.319	2.83
19	128.0	117.279	-10.721	9.14
20	115.0	104.279	-10.721	10.28
21	129.4	118.679	-10.721	9.03
22	115.9	105.179	-10.721	10.19
23	126.8	116.079	-10.721	9.24
24	110.2	99.479	-10.721	10.78
25	170.2	154.246	-15.954	10.34
26	132.4	116.446	-15.954	13.70
27	154.8	138.846	-15.954	11.49
28	166.5	150.546	-15.954	10.60
29	137.9	121.946	-15.954	13.08
30	76.8	68.644	-8.156	11.88
31	145.6	137.444	-8.156	5.93
32	128.3	120.144	-8.156	6.79
33	144.3	136.144	-8.156	5.99

3. 결 론

본 논문에서는 국내의 154kV급 배전 변전소에 대하여 WLS를 이용한 상태추정기법을 제안하였으며, 실제 통에서 취득한 데이터를 기반으로 상태추정을 수행하였다. 사례연구결과 약 3.85% 정도의 오차가 존재함을 확인하였으며 본 연구는 급후 예상되는 변전소 자동화 시스템 및 SCADA 시스템 등에 유용하게 적용될 수 있으리라 본다.

표 3 표준편차 변경에 따른 비교

계측기 NO.	10시 측정값	동일한 편차의 추정값	$\sigma_1 = 0.001$	$\sigma_3 = 0.001$
1	316.0	318.793	316.687	318.791
2	310.0	312.793	313.432	312.791
3	-441.0	-438.207	-437.568	-438.209
4	-451.0	-448.207	-447.568	-448.209
5	49.0	48.994	49.154	49.001
6	74.0	74.548	74.708	74.545
7	76.0	77.808	77.968	77.805
8	52.0	52.443	52.602	52.440
9	328.0	328.931	328.993	328.996
10	497.0	499.289	499.350	499.289
11	514.0	521.023	521.083	521.023
12	350.0	351.922	351.980	351.922
13	24.0	23.489	23.499	23.885
14	76.5	75.989	76.999	75.922
15	20.8	20.289	20.299	20.222
16	90.3	89.789	89.799	89.722
17	35.8	35.289	35.299	35.222
18	84.6	84.089	84.099	84.022
19	99.4	97.448	97.458	97.448
20	78.1	76.148	76.158	76.148
21	101.2	99.248	99.258	99.248
22	96.1	94.148	94.158	94.148
23	62.5	60.548	60.558	60.548
24	73.7	71.748	71.758	71.748
25	110.3	103.425	103.437	103.425
26	117.7	110.825	110.837	110.825
27	114.8	107.925	107.937	107.925
28	107.2	100.325	100.337	100.325
29	105.4	98.525	98.537	98.525
30	54.3	52.731	52.745	52.731
31	108.1	106.531	106.545	106.531
32	82.0	80.431	80.445	80.431
33	113.8	112.231	112.245	112.231

(참 고 문 헌)

- [1] A. P. Sakis, Fan Zhang, "Multiphase Power Flow and State Estimation for Power Distribution Systems" IEEE Trans. on PWRs, Vol. 11, No. 2, pp. 939-946, May 1996.
- [2] Ke Li, "State Estimation for Power Distribution System and Measurement Impact", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 11, No. 2, pp. 911-916, May 1996.
- [3] C. N. Lu, J. H. Teng, et al., "Distribution System State Estimation", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 10, No. 1, pp. 229-240, Feb. 1995.
- [4] William J. Ackerman, "Substation Automation and the EMS," IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol. 1, pp. 274-279, 1999.