

전철 및 지하철 전력시스템의 신뢰도 향상을 위한 상태추정에 관한 연구

하연관\* 이종기\* 류현수\* 박정도\* 문영현\* 송경빈\*\*  
 \*연세대학교 전기공학과 \*\*계명대학교 전자공학과

A Study on the State Estimation of Subway Power System for reliance improvement

Y.K.Ha\* J.G.Lee\* H.S.Ryu\* J.D.Park\* Y.H.Moon\* K.B.Song\*\*

\*Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ. \*\*Dept. of Electronic Eng., Keimyung Univ.

**Abstract** - We must precisely understand the current state of system for efficiently and safely operating the power system of subway and it is the important problem to secure the high-quality data for state estimation. The current state of subway system is calculated by data to be transmitted to central control office from every place to install the measuring instruments so the high accuracy and trust can be maintained if the measured data have a high quality. But it is difficult to estimate the accurate state of system because of the noises in transit data and the inaccuracy due to errors of measuring instruments. So the object is to reduce the difference from the real value in terms of improving considerably the inaccuracy due to instrumental errors and noises using the state estimation method.

In this paper we estimate the accurate state of the subway power system in the arbitrary measured values of a Sangin station in Deagu subway, and consider the possibility to apply to the real subway power system on the basis of that. This test shows to make sure of the possibility to apply to the real system usefully.

1. 서 론

지하철 및 전철의 전력계통을 효율적으로 안전운전하기 위하여 계통의 현재상태를 정확하게 파악해야 하며 상태추정을 위하여 양질의 데이터 확보는 중요한 문제이다. 현재의 지하철 계통의 상태를 측정계가 설치되어 있는 각 측정지점으로부터 중앙제어소로 전송되어온 정보로서 계산되어지고 측정되어온 정보가 양질일 때 높은 정확도와 신뢰도를 유지할 수 있다. 그러나 측정계기의 오차로 인한 부정확성 또는 정보전송과정에서의 잡음으로 인하여 계통의 정확한 상태를 추정하는 것은 어려운 일이다. 하지만 측정되는 데이터의 정확성과 신뢰성의 확보는 전력 시스템의 신뢰성 있는 운용을 위해 매우 중요하다. 따라서 이의 중요성을 인식하여 대규모 시스템의 측정값의 신뢰성 확보를 위한 많은 노력을 경주하고 있다.

이러한 상태추정에 관한 연구는 송전계통을 필두로 하여 90년대에 들어서는 배전계통으로 확산되는 추세이다. 향후 지하철 및 전철의 전력시스템의 설치, 운용, 유지에 소요되는 비용을 줄이고자 하는 요구가 증가될 것이며 이에 따라 무인 전력 시스템을 지하철 및 전철의 시스템에 실현하기 위해서는 정확도가 높은 데이터의 획득이 매우 필요하다. 따라서 계기오차와 잡음 등으로 인한 부정확성을 크게 개선하여 실제값과 오차를 줄이기

위해서는 상태변수 추정에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 대구 지하철의 한 역사를 모델로 하여 임의의 측정값을 가지고 지하철 전력계통의 정확한 상태를 추정해 보고, 이를 토대로 상태추정에 대한 실제 지하철 전력 시스템에의 적용 가능성을 타진해 보았다.

2. 지하철 전력 시스템 상태추정 모델링

2.1 상태추정의 기본이론

상태추정은 다음과 같이 식(1)에 의하여 구해질 수 있다.

$$Z = h(x) + e \tag{1}$$

여기서, m : 측정점의 수

n : 모선의 수

Z : m × 1 측정벡터

x : n × 1 상태벡터

h(x) : 상태벡터에 의한 측정값의 관계식

e : m×1 측정값의 오차벡터

$$E[e] = 0$$

$$E[e e^T] = R: \text{측정오차 공분산행렬(대각행렬)}$$

모든 측정 N(0, R)과 같은 정규 분포를 따른다고 가정하면 다음의 식(2)와 같이 구해진다. 오차는 상호 독립이며 Gaussian 분포를 갖는 것으로 가정하여

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

측정치와 고장 발생 확률을 적용한 평균 상태추정오차인 평가함수 J(x)는 다음의 식(3)과 같이 유도된다.

$$J(x) = [Z - h(x)]^T R^{-1} [Z - h(x)] \\ = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} [Z_i - h_i(x)]^2 \tag{3}$$

상태추정오차인 평가함수 J(x)를 최소화 하기 위한 최적 조건은 다음의 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 2 H^T(x) R^{-1} [Z - h(x)] = 0 \tag{4}$$

여기서,  $H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$  :

고장 발생시 측정 가능 세트에 해당하는 Jacobi 행렬

식 (4)의 최소화 해를  $x^* = x + \Delta x$ 라 하면  $x^*$ 는 다음의 식 (5)를 만족시켜야 한다.

$$\frac{\partial K(x)}{\partial x} \Big|_{x=x^*} = H^T(x)R^{-1}[Z - h(x + \Delta x)] = 0 \quad (5)$$

식 (5)를 Taylor급수에 의해 1차 근사화를 시키면 다음과 같이 나타나고

$$\begin{aligned} H^T(x)R^{-1} \left[ Z - h(x) - \frac{\partial h(x)}{\partial x} \Delta x \right] \\ = H^T(x)R^{-1} [Z - h(x) - H(x)\Delta x] \cong 0 \end{aligned}$$

이는 다음의 식 (6)과 같이 정리될 수 있다.

$$H^T(x)R^{-1}[Z - h(x)] = H^T(x)R^{-1}H(x)\Delta x \quad (6)$$

따라서,

$$\begin{aligned} \Delta x = x^* - x \\ = [H^T(x)R^{-1}H(x)]^{-1}H^T(x)R^{-1}\Delta z \\ = G^{-1}H^T(x)R^{-1}\Delta z \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $\Delta z = Z - h(x)$  : 측정값의 오차벡터

$$G = H^T(x)R^{-1}H(x)$$

식 (7)의  $\Delta x$ 는 선형 근사화에 의하여 구해졌기 때문에 식 (5)를 정확히 만족시킨다고 할 수 없다. 상태벡터를 구하기 위한 반복 과정을 통해 비선형 문제가 선형화 되고 따라서 상태추정 값은 다음의 식 (8)의 선형화된 방정식으로부터 최종 추정값에 도달할 때까지 반복적으로 계산된다.

따라서  $\Delta x$ 는 반복적으로 계산하여 추정 상태  $x^*$ 를 수정하여야 하며 반복 계산 과정은 식 (8)과 같다.

$$\Delta x = G^{-1}H^T(x^k)R^{-1}\Delta z \quad (8)$$

여기서,  $\Delta x = x^{k+1} - x^k$

$$\Delta z = Z - h(x^k)$$

$$G = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)$$

$k$  : 반복 회수

## 2.2 지하철 전력 시스템의 모델링

그림 1의 계통은 대구 지하철 상인역의 계통도를 나타내며 이 경우를 예로하여 Jacobi 행렬을 구하고자 한다.

측정지점 1의 경우에는 역률  $\cos \theta_1$ 을 적용하고 측정지점 2, 3, 4, 7, 8, 9의 경우에는  $\cos \theta_2$ 를 적용하고, 측정지점 5, 6, 10, 11의 경우에는  $\cos \theta_3$ 를 적용한다. 측정지점 12, 13, 14, 15의 경우에는 정류기를 거친 직류이므로 역률의 적용대상에서 제외된다.

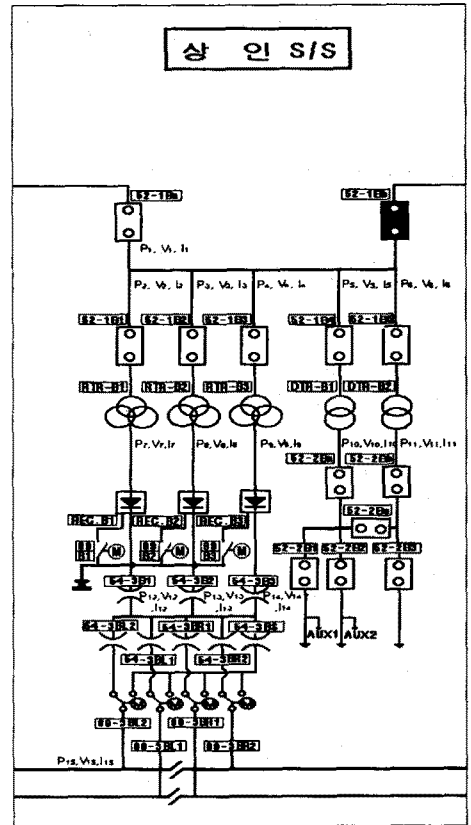


그림 1 대구 지하철 상인역의 전력 계통도

각 측정지점의 측정값을 가지고 측정벡터와 상태벡터, 그리고 그에 따른 관계식을 구해보면 다음과 같다.

$$x = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_{15} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{15} \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{15} \\ I_1 \\ \vdots \\ I_{15} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{15} \\ I_1 \\ \vdots \\ I_{15} \end{bmatrix}$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{15} \\ I_1 \\ \vdots \\ I_{15} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{15} \\ I_1 \\ \vdots \\ I_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 I_1 \cos \theta_1 \\ \vdots \\ V_{15} I_{15} \\ I_1 \\ \vdots \\ I_{15} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{15} \\ I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\ \vdots \\ I_{12} + I_{13} + I_{14} \end{bmatrix}$$

위의  $h(x)$ 를 기초로 하여 Jacobi 행렬

$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$  를 구하면 다음의 식 (9)와 같이 계산된다.

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \begin{pmatrix} V_1 \cos \theta_1 & 0 & \Lambda & 0 & 0 & I_1 \cos \theta_1 & 0 & \Lambda & 0 & 0 \\ 0 & V_2 \cos \theta_2 & \Lambda & 0 & 0 & 0 & I_2 \cos \theta_2 & \Lambda & 0 & 0 \\ M & M & O & M & M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & \Lambda & V_3 & 0 & 0 & 0 & \Lambda & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda & 0 & V_4 & 0 & 0 & \Lambda & 0 & I_4 \\ 1 & 0 & \Lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \Lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 \\ M & M & O & M & M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & \Lambda & 1 & 0 & 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda & 0 & 1 & 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 & 1 & 0 & \Lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 & 0 & 1 & \Lambda & 0 & 0 \\ M & M & O & M & M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \Lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda & 1 & 0 & 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

### 2.3 최적화 알고리즘

- (1) 측정계기는 모든 모선에 설치되어 있다고 가정하고 측정기로부터 data를 입력받는다.
- (2) 상태벡터를 초기화시킨다.
- (3) 알고리즘의 수렴성 판정을 위하여  $\epsilon$  (stopping criterion)을 설정한다.
- (4)  $k=0$ 으로 설정한다.
- (5) Jacobi 행렬, 즉  $H(x^k)$ 를 계산한다.
- (6)  $\Delta z = Z - h(x^k)$ 를 계산한다.
- (7)  $G = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)$ 를 계산한다.
- (8) 모든 측정값을 고려하여 새로운 상태벡터  $x^{k+1} = x^k + G^{-1}H^T(x^k)R^{-1}\Delta z^k$ 를 구한다.
- (9) 만일  $\|x^{k+1} - x^k\| > \epsilon$ 이면  $k = k + 1$ 을 하고 단계 (5)로 돌아간다.
- (10) 만일  $\|x^{k+1} - x^k\| < \epsilon$ 이면 새로 구한 상태벡터  $x^{k+1}$ 이 실제 정확한 계통의 값이라 할 수 있다.

### 2.4 불량정보 검출 알고리즘

불량정보 유무는  $\chi^2$ 분포를 사용하여 판단할 수 있으며, 정규화된 측정오차를 사용하여 다음의 평가함수를 계산한다.

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{(Z_i - h(x))^2}{\sigma_i^2} \quad (8)$$

상기 평가함수의 분포가  $\chi^2$ 분포를 취하므로 유의수준  $\alpha$ 에 따른  $J_{\max}(\alpha)$ 가 결정된다. 식 (8)에 의하여 계산된  $J$ 의 값이  $J_{\max}(\alpha)$ 보다 크면 불량정보가 존재한다고 판정한다. 그렇지 않다면 불량정보가 존재하지 않는다고 간주한다.  $J_{\max}(\alpha)$ 의 값은  $N \geq 30$ 일 경우는  $J$ 의 분포가 정규분포를 따른다고 가정하고 값을 결정할 수 있으며  $N < 30$ 인 경우는  $\chi^2$ 분포 표에서 쉽게 값을 결정할 수가 있다.

## 3. 지하철 전력 시스템 상태추정의 결과

측정점 No.	측정값	추정값	오차	% 오차
전류 1	115	115	0	0
2	51	50.854324	0.145676	0.2864575
3	50.5	50.645047	0.145047	0.2863992
5	13.5	13.499978	2.2E-05	0.000163
7	1928	1929.1487	1.148746	0.0595468
8	1920	1921.1586	1.158615	0.0603081
10	43.3	43.237765	0.062235	0.1439367
12	609.7	610.55402	0.854018	0.1398759
13	607.8	608.66185	0.861846	0.1415968
15	1226	1225.9684	0.031605	0.002578
전압 1	22900	22900	0	0
2	22900	22900.142	0.1418	0.0006192
3	22900	22900.142	0.141859	0.0006195
5	22900	22900.038	0.037729	0.0001648
7	600	603.67104	3.671042	0.6081196
8	600	603.68715	3.687146	0.610771
10	6600	6599.9996	0.000408	6.182E-06
12	1591	1588.721	2.278977	0.1434473
13	1591	1588.7311	2.2689	0.1428121
15	1580	1579.9755	0.024523	0.0015521

표 1 측정값과 추정값의 비교 및 오차분석

대구 지하철 상인역의 전력 시스템의 각 측정위치에 설치된 측정계기로 부터의 유효전력값, 전압값, 전류값, 계통의 상태를 나타내는 차단기 정보를 입력값으로 하고, 계통의 유효전력값, 계통의 전압값, 계통의 전류값을 출력으로 하여 결과를 나타내면 위의 표 1과 같다.

위의 표 1은 그림 1의 상인역의 측정데이터를 사용하여 상태추정을 수행한 결과로서 표준편차  $\sigma = 0.05$ 로 지정하였다. 그림 1에서 측정점 4와 9, 5와 11의 경우에는 차단기 52-1B3, 52-1B5가 작동되어 전류값이 0 이므로 측정치와 추정치에서 제외하고 나머지 측정점의 데이터를 사용하였다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 대구 지하철의 임의의 측정값을 가지고 지하철 전력계통의 정확한 상태를 추정해 보고, 이를 토대로 실제 지하철 전력 시스템에의 적용 가능성을 타진해 보았다. 임의의 데이터를 기반으로 상태추정을 수행한 결과 최대 0.61%, 평균 0.088% 정도의 오차가 발생됨을 확인하였다. 본 논문을 통하여 상태추정 이론이 지하철 전력 시스템의 실제 측정값에 대한 정확한 상태를 추정하는데 유용하게 적용될 수 있을 것이라는 것을 확인하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 박인권, "유연 데이터 처리를 위한 전력계통 상태추정 알고리즘의 개선에 관한 연구", 연세대학교 대학원 석사학위 논문, 1996년 12월
- [2] 송경빈, "랜드 행렬을 이용한 전력계통의 최적 측정 시스템 설계", 연세대학교 대학원 석사학위 논문, 1987년 12월
- [3] 이홍재 외, "변전소 상태변수 추정에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp270~272, 1999년 11월
- [4] William J. Ackerman, "Substation Automation and the EMS", IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol 1, pp.274~279, 1999년