

State Estimation in Subway Power Systems

柳 憲 秀* · 河 連 寬** · 文 永 鉉***

(Heon-Su Ryu · Yeon-Kwan Ha · Young-Hyun Moon)

Abstract - It is required that the current state of system should be precisely monitored for efficient and safe operation of the subway power system and it is an important problem to secure the high quality data for state estimation. The current state of subway power system is estimated by using data transmitted to control center from every measuring instrument. 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 transmitted data and the inaccuracy of measuring instruments. So the object is to reduce the difference between the real values and the measured values in order to improve considerably the inaccuracy due to instrumental errors and transmission noises using the state estimation method.

In this paper, we proposes a new state estimation to estimate the accurate state of the subway power system from the measured values of a Sang-In station in Daegu subway and consider the possibility of application to the real subway power system, on the basis of that. The simulation results show to make sure of the possibility to apply to the real system usefully.

Key Words : subway power system, state estimation, noises in transmitted data, accuracy

1. 서 론

산업의 발달로 공급전력의 고급화가 요망되고 있고 전력 감시 설비들의 무인화 감시 제어와 최소 정전시간으로 소비자에게 양질의 전력을 공급하는 것 등을 보장하기 위하여 EMS(Energy Management System)를 사용함으로써 효과적으로 에너지 시스템이 제어되고 있다. 이러한 에너지 관리 시스템이 계통의 경제운영에 미치는 영향은 매우 크므로 계통의 제어능력을 향상시키기 위해서는 에너지 시스템의 실제 운전상태를 정확하게 추정하는 것이 필수적이다. 따라서 시스템의 상태추정은 안전 운전을 위한 필수적인 요건이 되었다.[1][2][6] 전력계통은 많은 수의 측정기기와 다양한 통신계통으로 구성되어 있기 때문에 측정 과정이나 통신 과정에 있어서 각종 잡음의 혼입이 발생하며 이로 인해 양질의 데이터를 확보하기 곤란하게 되므로 수렴성이 보장되는 양질의 데이터 선택에 의해 정확도와 신뢰도를 만족시키는 것을 필요로 하게 되었다. 전력 계통의 상태추정은 이러한 데이터를 기반으로 하여 현재 운전에서 필요한 전력 계통의 정확한 상태를 여러 가지 수학적 조작을 통하여 구해내는 일을 말한다.[1][2][3]

이러한 상태추정에 관한 연구는 송전계통을 필두로 하여, 90년대에 들어서는 배전계통의 전력조류 상태추정[5], 3상 불평형 배전계통의 상태추정기에 대한 연구[7], 3상 불평형 배전계통에서의 상태추정[8] 등 배전계통으로 확산되는 추세이다.

모든 계통 해석은 상태추정의 결과로부터 출발하므로 단일 계통의 측정 데이터 중 결정적인 불량 데이터가 포함된 경우 상태추정을 거치지 않는다면 이로 인하여 계통운전에 결정적인 실수를 범할 수 있다. 따라서 상태추정은 EMS 시스템에서 매우 중요한 위치를 차지하며 최근 모든 전력회사의 EMS에는 상태추정 프로그램을 사용하고 있다.[9]

전력 계통에서 상태추정은 측정계기에서의 측정치들과 선로의 차단기의 연결상태들로 이루어진 redundant 데이터 군에서 추출한 정보를 가지고 실제 상태와의 오차를 최소가 되도록 계통의 상태변수를 추정한다.[1] 전력 계통의 특성상 데이터의 발생원, 즉 여러 측정 장비들은 지리적으로 광대한 범위에 분포되어 있고 대부분의 계기들이 야외에 설치되어 있는 경우가 많다. 이는 긴 통신 거리로 인한 잡음의 혼입을 필연적으로 수반하게 하며 또한 제어 부분에 입력될 데이터의 신뢰도를 떨어뜨리게 된다. 즉, 상태추정을 위하여 입수된 모든 측정치에는 측정기기의 부정확성 또는 정보 전송 과정에서 잡음이 개입되어 있다. 측정 데이터 중에는 불량 정보가 섞여 있을 확률이 존재하므로 불량정보 유무판정은 전력 계통 상태추정에 필수적인 요소이다.[4]

본 연구에서는 지하철 노선에 존재하는 전력계통에 대해 현재 추세에 따라 상태추정을 적용하고자 한다. 대구 지하철

* 正 會 員 : 延世大學校 電氣·電子工學科 博士課程

** 準 會 員 : (株)曉星 重工業PG 電力PU 勤務

*** 正 會 員 : 延世大學校 電氣·電子工學科 教授·工博

接受日字 : 2001年 8月 31日

最終完了 : 2001年 12月 22日

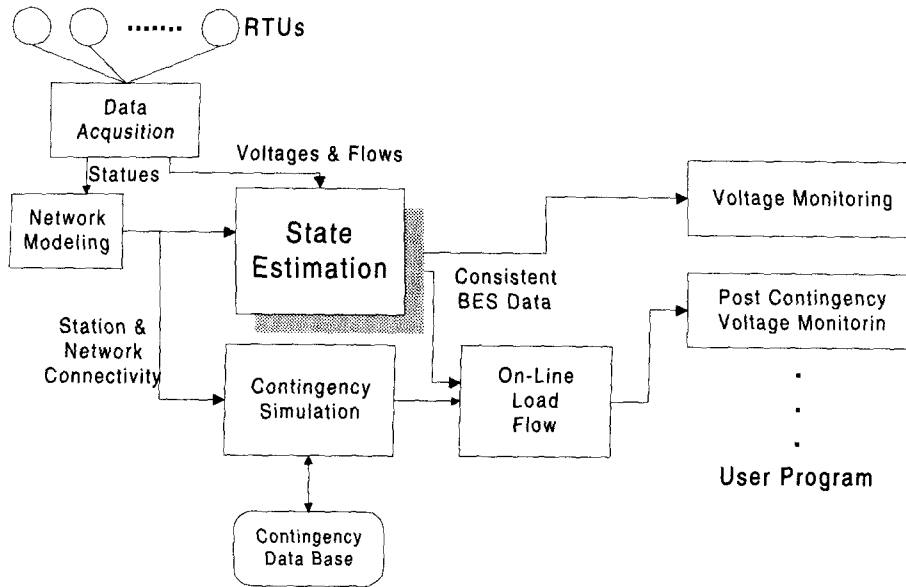


그림 2.1 전력계통 EMS 에서의 상태 추정 모듈의 기능
 Fig. 2.1 The Function of State-Estimation in the EMS

노선 중 상인역 전력 공급 시스템을 모델로 하여 차단기 (Circuit Breaker) 상태에 따른 측정점을 선정하고, 상태추정 알고리즘을 적용시켜 계통의 정확한 상태를 추정해 보고, 이를 토대로 실제 지하철 전력 시스템에 대한 상태추정 적용 가능성을 검증해 보았다.

2. 전력계통의 상태추정

전력계통 상태추정은 상태변수에 의한 최상의 추정치를 계산하는 수학적 절차로서 일반적으로 잡음이 섞여있는 주어진 측정 군으로부터 계통의 상태변수를 실제 상태에 가깝도록 계산하기 위하여 실제 상태와의 오차를 최소로 하는 상태변수 값을 추정하는 일을 말한다.

전력계통의 상태추정은 광범위한 지역에 분포된 측정기기로부터 전송된 측정량에 의존하는데 이에는 모선전압, 모선 주입 유,무효 전력, 모선 전류 등이 포함된다. 이들의 계통 정보, 즉 측정량은 원거리 측정 장비로부터 수집된 데이터가 통신설비를 거쳐 중앙 제어 부분으로 전송되는 것이므로 이 과정에서 여러 가지 원인으로 인해 오염되게 된다.[4] 전력계통의 효율적인 운용을 위해서는 계통의 현재 운전 상태를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하며 계통의 운전 상태는 계통의 각 요소에서 측정되어 온 측정치에 의해 계산될 수 있다. 그러나 모든 측정치에는 측정장치의 부정확성, 전송 과정에서의 잡음이 개입되기 때문에 측정치로부터 정확한 상태를 추정하는 것은 불가능하다. 따라서 계통의 원활한 운용을 위하여 불량정보를 억제하고 추정오차를 최소화하는 상태추정법이 널리 이용되고 있으며 이 상태추정의 결과는 사용

한 정보의 질과 양에 따라 좌우된다. 본 장에서는 전력계통의 일반적인 상태추정 이론에 대하여 기술하였다.

2.1 상태추정의 기본이론

수학적으로 전력계통의 상태추정은 상태변수, 즉 전압의 크기와 위상각에 대하여 잔류편차의 합을 최소화하는 최적화 문제로 수식화 할 수 있다. 여기서 측정치의 잔류편차 e 는 측정치와 추정치와의 오차, 즉 $z - h(x)$ 로 정의한다. 이와 같이 최적화 문제로 수식화 된 상태추정의 평가함수는 일반적으로 가중 최소 자승 오차법(Weighted Least Square)을 적용하여 구성하며 계통 측정 모델에서 측정 데이터 z 는 계통 상태 추정을 위한 측정량으로서 모선전압 크기, 선로 유효 및 무효전력 조류, 그리고 모선주입 유효, 무효전력으로 구성한다. 이를 식으로 나타내면 식(2.1)과 같은 비선형 함수로 나타낼 수 있다.

$$z = h(x) + e \tag{2.1}$$

여기서, m : 측정점의 수

n : 상태변수의 수

z : $m \times 1$ 측정벡터

x : $n \times 1$ 상태벡터

$h(x)$: 상태벡터에 의해 계산된 추정값

e : $m \times 1$ 측정값의 오차벡터

위 식 (2.1)에서 측정치에 포함된 오차 e 는 알 수 없으며 다만 오차의 통계적인 성질을 알 수 있을 뿐이다. 측정

오차 e 는 일반적으로 가우시안(Gaussian) 통계분포를 가지며 평균치와 공분산(Covariance)에 의하여 통계적 성질을 나타낼 수 있다. 오차의 평균은 0이므로 $E[e] = 0$ 이며 오차의 공분산은 실험적으로 구해 질 수 있으며 각 측정장치에 포함된 오차가 독립적이면 대각행렬(Diagonal Matrix)로 주어진다. 이 때, 오차를 최소로 하는 상태값을 찾아내는 것이 상태추정의 목적이다.

가중 최소 자승 오차법을 이용한 상태추정의 목적함수는 식 (2.2)와 같다.

$$J(x) = \frac{1}{2} [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (2.2)$$

$$\text{여기서, } R = \text{diag}[\sigma_1^2 \dots \sigma_m^2] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

: 측정오차 공분산 행렬

상태 추정의 최적해는 식 (2.2)의 목적 함수를 최소화하는 비선형 문제로 볼 수 있다. 목적 함수를 최소화 하기 위하여 식 (2.2)의 목적 함수의 기울기가 0으로 되는 상태해 \hat{x} 를 얻는다. 그러므로 \hat{x} 는 다음 식 (2.4)의 해가 된다.

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H(x)^T R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (2.4)$$

$$\text{단, } H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$$

식 (2.2)의 최소화 해를 $\hat{x} = x + \Delta x$ 라 하면 \hat{x} 는 다음 조건을 만족시켜야 한다.

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = -H(x)^T R^{-1} [z - h(x + \Delta x)] = 0 \quad (2.5)$$

위 식 (2.5)을 1차 근사화 시키면

$$-H(x)^T R^{-1} \left[z - h(x) - \frac{\partial h(x)}{\partial x} \Delta x \right] \cong 0 \quad (2.6)$$

$$-H(x)^T R^{-1} [z - h(x)] - H(x)^T R^{-1} H(x)^T \Delta x = 0 \quad (2.7)$$

따라서

$$\Delta x = [H(x)^T R^{-1} H(x)]^{-1} H(x)^T R^{-1} \Delta z \quad (2.8)$$

$$\text{단, } \Delta z = z - h(x)$$

식 (2.8)의 Δx 는 선형 근사화에 의해 구해졌기 때문에 식 (2.5)을 정확히 만족시킨다고 할 수 없다. 상태해를 구하기 위한 반복과정을 통해 비선형 문제가 선형화 되고, 따라서 상태추정해는 식 (2.9)의 선형화된 방정식으로부터 최종 추정해에 도달할 때까지 반복적으로 계산된다.

따라서 Δx 는 반복적으로 계산하여 추정 상태 \hat{x} 를 수정하여야 하며 반복 계산 과정은 다음과 같다.

$$[H(x)^T R^{-1} H(x)] \Delta x = H(x)^T R^{-1} \Delta z \quad (2.9)$$

$$\Delta x = [H(x)^T R^{-1} H(x)]^{-1} H(x)^T R^{-1} \Delta z \quad (2.10)$$

$$\text{여기서, } \Delta x = x^{k+1} - x^k$$

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

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

k : 반복 회수

최종 상태추정해의 수렴은 반복계산 중 상태변수의 증, 감이 규정된 오차범위를 만족할 때에 얻을 수 있다.

상태추정의 반복계산 과정 후에 얻은 추정해를 \hat{x} 이라 하면, 이 추정해에 대한 잔류 편차는 다음 식으로 주어진다.

$$\hat{e} = z - \hat{z} = e - HG^{-1}H^T R^{-1} e = [I - HG^{-1}H^T R^{-1}] e \quad (2.11)$$

$$\text{단, } G = H(x)^T R^{-1} H(x)$$

e : (measured value - true value)

따라서 목적함수는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$J(x) = \frac{1}{2} [z - h(\hat{x})]^T R^{-1} [z - h(\hat{x})] \quad (2.12)$$

$$= \sum_{i=1}^m \frac{e_i^2}{\sigma_i^2}$$

여기서 z_i : 측정치의 값

$h_i(x)$: 측정치의 측정값

$z_i - h_i(x)$: 측정치의 잔류 편차

이 때, 식 (2.12)의 잔류 편차의 합의 자승의 크기로부터 측정치에 대한 신뢰도 검증과 불량정보 유무를 판정할 수 있다.

2.2 상태 추정치의 신뢰도 검증 및 불량정보 유무판정

계산된 상태 추정치의 신뢰도 검증 및 불량정보 존재 유무를 판별하기 위한 방법은 일반적으로 가설 검정이론에 따른 3가지 방법이 이용되고 있는데 불량정보 검출을 위해 다음과 같은 두 가지 상반된 가설을 세울 수 있다.

귀무 가설 H_0 : 불량정보가 존재하지 않는다.

대립 가설 H_1 : 불량정보가 존재한다.

불량정보 유무 판정을 위해서는 먼저 측정 시스템으로부터 입수된 모든 측정 데이터를 사용하여 상태추정을 행해야 하며 이로부터 추정된 상태치 \hat{x} 를 얻을 수 있다. 그 결과 얻어진 잔류편차는 측정오차의 선형 조합으로 이루어지는데 이 오차들이 $N(0, 1)$ 의 정규분포를 갖는 것으로 가정하면 다음과 같이 정의되는 상태추정 평가함수 $J(x)$ 는 다음 식과

같다.

$$J(\hat{\mathbf{x}}) = \sum_{i=1}^m \frac{[z_i - h_i(\hat{\mathbf{x}})]^2}{\sigma_i^2} \quad (2.13)$$

위의 성질에 근거하여 불량정보의 존재 유무를 판별하게 된다. 만약 측정치 중에 불량정보가 존재하면 추정된 상태치 $\hat{\mathbf{x}}$ 는 정확한 상태추정이 될 수 없으므로 $J(\hat{\mathbf{x}})$ 는 큰 값을 갖게 된다. 따라서 $J(\hat{\mathbf{x}})$ 가 불량정보 존재 유무를 판정하는 척도가 될 수 있으며 이 값을 항상 감시함으로써 불량정보 유무를 판단할 수 있다. 즉 $J(\hat{\mathbf{x}})$ 의 값이 정상적인 데이터에 의하여 생기는 측정오차 한계를 훨씬 벗어난다면 불량정보가 존재한다는 것을 의미하므로 $J(\hat{\mathbf{x}})$ 값이 임계치보다 크면 불량정보가 존재한다고 판정할 수 있다. $J(\hat{\mathbf{x}})$ 의 임계치 결정은 주어진 자유도와 제 1종 오류확률(α)에 따라 표준편차로부터 결정된다. 여기서 제 1종 오류확률(α)이란 설정한 가설이 실제로는 옳은 것인데도 불구하고 내려진 결론에서 가설이 그릇된 것이라고 판정하는 경우를 말한다.

표 2.1 제 1종 오류와 제 2종 오류
Table 2.1 1st kind fallacy and 2nd kind fallacy

	귀무가설 H_0 가 사실	대립가설 H_1 이 사실
H_0 를	옳은 결정	제 2종 오류
H_0 를	제 1종 오류	옳은 결정

자승추정오차 $J(\hat{\mathbf{x}})$ 가 갑자기 증가하는 것은 그 순간에 불량정보가 발생하였다는 것을 의미하며 이러한 불량정보를 제거하지 않는다면 상태추정 오차가 큰 값으로 남게 되어 상태추정 정확도가 크게 떨어지게 되어 상태추정 신뢰도가 큰 문제점으로 대두될 수 있으나 다음에 기술되는 불량정보 판정법에 의하여 불량정보를 제거하면 정상적인 추정오차를 유지할 수 있다..

따라서 제 1종 오류확률(α)의 선택 결과에 따라 불량정보 판정 임계치(t_1)는 확률분포표로부터 결정되며 판정 결과는 다음과 같다.

- (a) $J(\mathbf{x}) < t_1$ 이면 H_0 을 채택
- (b) $J(\mathbf{x}) \geq t_1$ 이면 H_1 을 채택

2.3 불량정보 검출 알고리즘

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

$$J(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{[z_i - h_i(\hat{\mathbf{x}})]^2}{\sigma_i^2} \quad (2.14)$$

상기 평가함수의 분포가 χ^2 분포를 취하므로 유의수준 α 에 따른 $J_{\max}(\alpha)$ 가 결정된다. 식 (2.14)에 의하여 계산된 J 의 값이 $J_{\max}(\alpha)$ 보다 크면 불량정보가 존재한다고 판정한다. 그렇지 않다면 불량정보가 존재하지 않는다고 판단할 수 있다. $J_{\max}(\alpha)$ 의 값은 $N \geq 30$ 일 경우에는 J 의 분포가 정규분포를 따른다고 가정하고 값을 결정할 수 있으며, $N < 30$ 인 경우에는 χ^2 분포 표에서 쉽게 값을 결정할 수가 있다.

2.4 측정 세트내 불량정보 위치 확인

상태 추정에 이용된 계통 모델이 정확하며, 또한 이용된 모든 측정치들에 오차가 존재하지 않는다고 하면, 이를 이용하여 계산된 상태추정치를 위의 검증 절차를 거치지 않고도 이용할 수 있을 것이다. 그러나 측정기기로 부터 수집된 데이터 중 불량 데이터가 혼입되었을 경우에는 이를 통하여 계산된 상태 추정치를 검증하여 불량 정보를 제거하는 절차가 필요하다. 만일, 위 절의 검증법을 통하여 대립가설 H_1 이 채택되었을 때, 즉 측정세트 내에 불량정보가 혼입된 것으로 확인되었을 때에는 측정 세트 내에서 해당 불량정보의 위치를 확인하여 측정 세트 내에서 제거하여 정상적인 추정 오차를 유지하여야 한다. 이는 상태추정 오차 공분산 행렬을 계산한 후, 이를 이용하여 각 측정치와 계산된 상태 추정치를 통해 구해진 잔류편차를 정규화 하여 정규화 된 잔류편차의 크기를 비교함으로써 이루어 질 수 있다.

계산된 상태 추정치로부터 얻어지는 잔류편차는 평균 0인 가우시안(Gaussian) 분포를 가지는 확률변수로 가정할 수 있다. 따라서, 상태추정 편차 $\hat{\mathbf{e}}_j$ 의 분산은 식 (2.11)로부터 다음의 두 과정을 통하여 구해질 수 있다.

먼저, 편차 행렬 $\hat{\mathbf{e}}$ 에 자신의 전치 행렬 $\hat{\mathbf{e}}^T$ 를 곱하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{e}} \hat{\mathbf{e}}^T &= (\mathbf{z} - \hat{\mathbf{z}})(\mathbf{z} - \hat{\mathbf{z}})^T \\ &= [\mathbf{I} - \mathbf{H}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}] \mathbf{e}\mathbf{e}^T [\mathbf{I} - \mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{H}^T] \end{aligned} \quad (2.15)$$

위 식의 양변의 기대값을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[\hat{\mathbf{e}} \hat{\mathbf{e}}^T] &= \\ &= [\mathbf{I} - \mathbf{H}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}] \mathbf{E}[\mathbf{e}\mathbf{e}^T] [\mathbf{I} - \mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{H}^T] \end{aligned} \quad (2.16)$$

위 식 중 $\mathbf{E}[\mathbf{e}\mathbf{e}^T]$ 는 대각행렬 \mathbf{R} 이므로, 위 식을 다시 정리하면

$$E[\hat{e} \hat{e}^T] = [I - HG^{-1}H^TR^{-1}][R - HG^{-1}H^T] \\ = [I - HG^{-1}H^TR^{-1}][I - HG^{-1}H^TR^{-1}]R \quad (2.17)$$

위 식 중 $[I - HG^{-1}H^TR^{-1}][I - HG^{-1}H^TR^{-1}]$ 을 계산하면 $[I - HG^{-1}H^TR^{-1}]$ 이 되므로 다시 위 식을 정리하면,

$$E[\hat{e} \hat{e}^T] = [I - HG^{-1}H^TR^{-1}]R = R - HG^{-1}H^T \quad (2.18)$$

$\hat{e} \hat{e}^T$ 는 다음과 같은 형태를 가지므로,

$$\hat{e} \hat{e}^T = \begin{bmatrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \vdots \\ \hat{e}_{n-1} \\ \hat{e}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}_1 & \hat{e}_2 & \cdots & \hat{e}_{n-1} & \hat{e}_n \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \hat{e}_1^2 & \hat{e}_1 \hat{e}_2 & \cdots & \hat{e}_1 \hat{e}_n \\ \hat{e}_2 \hat{e}_1 & \hat{e}_2^2 & \cdots & \hat{e}_2 \hat{e}_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{e}_n \hat{e}_1 & \hat{e}_n \hat{e}_2 & \cdots & \hat{e}_n^2 \end{bmatrix}$$

대각원소에 $\hat{e}_j = (z_j - \hat{z}_j)$ 를 대입하면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$E[\hat{e}_j^2] = E[(z_j - \hat{z}_j)] = R_{jj}' \quad (2.19)$$

단, $R_{jj}' : E[\hat{e} \hat{e}^T]$ 의 대각원소

\hat{e}_j 는 평균이 0이므로 분산은 식 (2.3)으로 나타낼 수 있다. 각 미터 별로 위에서 계산된 분산과 편차를 이용하면 정규화된 오차 ϵ 을 다음식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{(z_j - \hat{z}_j)}{\sqrt{R_{jj}'}} \quad (2.20)$$

위 식을 이용하여 계산된 오차를 비교하여 가장 큰 값을 가지는 미터가 불량 정보로서 정상적인 추정오차를 유지하기 위하여 제거하여야 하는 대상이다.

다음은 일반적인 상태추정의 알고리즘을 나타낸 순서도이다.

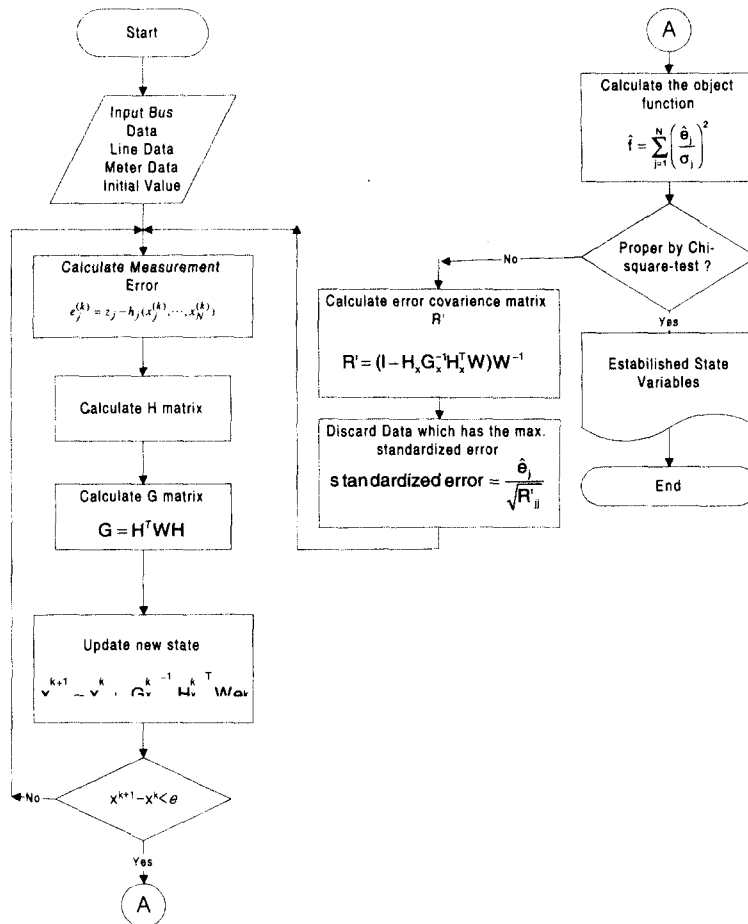


그림 2.2 상태추정 알고리즘의 흐름도
Fig. 2.2 The Flowchart of the state estimation algorithm

3. 지하철 전력 시스템 상태추정 모델링

3.1 측정지점 선정

상태추정을 수행하는 데에 있어서 측정점을 선정하는 것은 매우 중요하다. 쓸모없는 측정점이 배제되었다면 Jacobian 행렬 구성 시 메모리의 절감을 위하여 스파시티(Sparsity) 기법을 이용한 상태추정이 이루어 질 수 있다. 필요한 측정점만을 선정하기 위하여 계통에 설치된 차단기의 상태를 파악하여 계통의 측정지점을 설정한다. 측정기에서 올라오는 데이터로부터 차단기가 차단되어 있는지 여부를 검토한 후 이를 근거로 차단되어 있는 차단기에 연결되어 있는 모선은 측정점에서 제거해 나간다. 기존의 알고리즘은 각 선로의 연결상태가 바뀔 때마다 상태변수를 다시 추정하여 \hat{x} 를 각각 계산해야 했으므로 그 계산 과정에서 시간이 매우 많이 소요되는 한계를 가지고 있었으나, 이번에 제안된 알고리즘은 연결상태를 파악하여 측정점을 선정하기 때문에 이러한 한계를 극복하였다.

3.2 지하철 전력시스템의 모델링

그림 3.1은 대구 지하철 중 상인역의 전력공급 계통도이다. 현재 설치된 측정점(Measure Point)은 MP1, MP10, MP15 세 지점이지만 본 논문에서는 그림 3.1과 같이 상태추정을 위한

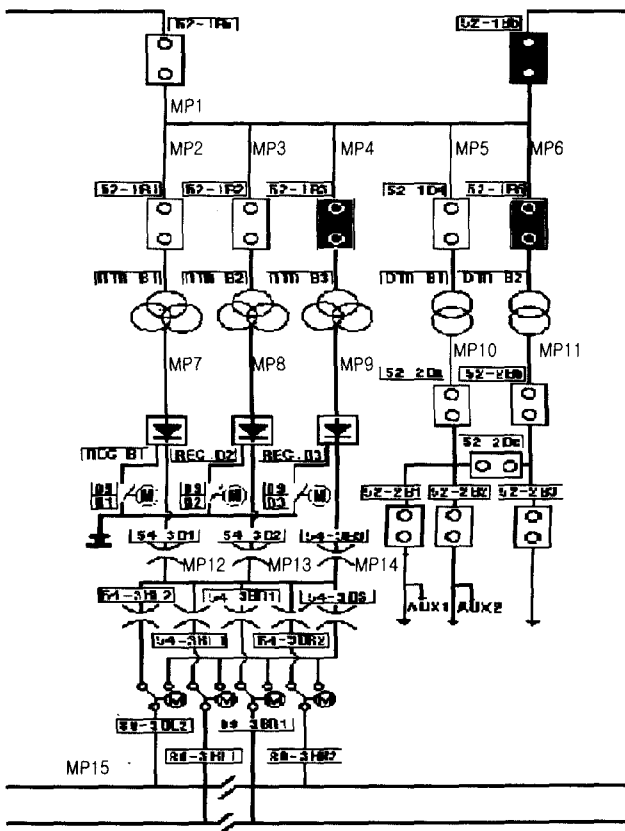


그림 3.1 대구 지하철 상인역의 전력 공급 계통도
Fig 3.1 The power supply diagram of Sang-in Station

측정지점을 추가로 선정하였다. 정류기용 변압기의 경우 날마다 서로 다른 두 개의 쌍이 교대로 운전되므로 3개 모두 측정점을 선정하였다.

이 시스템에서 교류 모선의 공칭 전압은 22900[V], 공칭 전력은 3,000[kw], 직류 모선의 공칭 전압은 1500[V]로 설정하였고, 3상, 단상 변압기 이후의 역률을 0.9라 가정하였다. 각 측정점에서는 P, I, V의 값을 모두 측정한다. 여기서 계통에 입력되는 전압은 V_s , 위상각은 0° 로 설정하였다.

여기에서 θ_1, θ_2 는 각각 3상 변압기와 단상 변압기를 통과한 후의 전압의 위상각이고, X 는 3상 변압기의 임피던스를, 단상 변압기의 임피던스는 $3X$ 로 나타내었다. 정류기를 통과한 이후의 측정점인 12번 이후는 직류값이다.

측정벡터와 상태벡터, 그리고 그에 따른 관계식을 구해보면 다음과 같다.

$$x = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_{11} \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_{11} \\ V_{12} \\ \vdots \\ V_{15} \\ I_{12} \\ \vdots \\ I_{15} \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{11} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{11} \\ P_{12} \\ \vdots \\ P_{15} \\ V_{12} \\ \vdots \\ V_{15} \\ I_{12} \\ \vdots \\ I_{15} \end{bmatrix}$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{11} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{11} \\ P_{12} \\ \vdots \\ P_{15} \\ V_{12} \\ \vdots \\ V_{15} \\ I_{12} \\ \vdots \\ I_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_s V_7 \sin(-\theta_{11})}{X} + \dots + \frac{V_s V_{11} \sin(-\theta_{11})}{3X} \\ \vdots \\ \frac{V_s V_{11} \sin(-\theta_{11})}{3X} \\ V_s \\ \vdots \\ V_{11} \\ V_{12} I_{12} \\ \vdots \\ V_{15} I_{15} \\ V_{12} \\ \vdots \\ V_{15} \\ I_{12} \\ \vdots \\ I_{12} + \dots + I_{14} \end{bmatrix}$$

관계식은 전력의 경우 변압기를 중심으로 송수전 전력으로, 전압의 경우 입력전력은 V_s 로, 변압기 이후의 전압은 각각의 전압으로 나타내었으며, 피드백(feed back) 전류인 마지막 전류에는 KCL(Kirchhof's current law)을 적용하였다.

위에 주어진 $h(x)$ 를 기초로 하여 Jacobian $H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$ 를 구할 수 있다.

4. 지하철 전력 시스템 상태추정의 결과

대구 지하철 상인역 전력 시스템의 상태추정을 수행한 결과를 아래의 표 4.1에 나타내었다. 표준편차 $\sigma = 0.01$ 로 설정하였으며, 추정결과 반복회수 7회로 수렴하였다.

표 4.1 상태추정의 결과 및 오차 분석 (단위:pu)

Table 4.1 Results and Error in StateEstimation

측정지점	측정값(Z)	계산값(h(x))	ΔZ	$\frac{\Delta Z}{\sigma}$
P_1	0.750000	0.71975	0.03025	3.025
P_2	0.350367	0.36156	-0.01119	-1.119
P_3	0.347000	0.35819	-0.01119	-1.119
P_5	0.086667	0.09782	-0.01115	-1.115
P_7	0.350367	0.36156	-0.01119	-1.119
P_8	0.347000	0.35819	-0.01119	-1.119
P_{10}	0.086667	0.09782	-0.01115	-1.115
V_1	1.000000	1.00050	-0.00050	-0.050
V_2	1.000000	1.00050	-0.00050	-0.050
V_3	1.000000	1.00050	-0.00050	-0.050
V_5	1.000000	1.00050	-0.00050	-0.050
V_7	1.000000	1.00092	-0.00092	-0.092
V_8	1.000000	1.00090	-0.00090	-0.090
V_{10}	1.000000	1.00020	-0.00020	-0.020
P_{12}	0.323333	0.32438	-0.00105	-0.105
P_{13}	0.322333	0.32337	-0.00104	-0.104
P_{15}	0.645667	0.64576	-0.00010	-0.010
V_{12}	1.060667	1.06036	0.00030	0.030
V_{13}	1.060667	1.06036	0.00030	0.030
V_{15}	1.053333	1.05333	-0.00000	-0.000
I_{12}	0.304850	0.30592	-0.00107	-0.107
I_{13}	0.303900	0.30497	-0.00107	-0.107
I_{15}	0.613000	0.61088	0.00212	0.212

앞 절의 그림 3.1에서 측정점 4와 9, 5와 11의 경우에는 차단기 52-1B3, 52-1B5가 차단되어 측정값에서 제외되었다.

이 경우에는 측정점의 개수가 한정되어 있고 충분히 크지 않으므로 정규분포가 아닌 χ^2 분포를 따른다고 볼 수 있다. 따라서, χ^2 분포에 따라 불량정보 유무를 판단하기 위해 χ^2 을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\chi^2 = \sum \left(\frac{\Delta Z}{\sigma} \right)^2 \quad (4.1)$$

위 식에 의해 χ^2 을 구해보면, $\chi^2 = 18.0086$ 이고 이는 95% 유의수준의 χ^2 값인 18.31보다 작으므로 95% 유의수준 하에서 이 시스템에 불량정보가 없다고 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 현재 추세에 따라 대구 지하철 노선중 상인역의 전력 공급 시스템을 모델로 하여 차단기(Circuit Breaker) 상태에 따른 측정점을 선정하고, 상태추정 알고리즘을 적용시켜 계통의 정확한 상태를 추정해 보고, 이를 토대로 실제 지하철 전력 시스템에 대한 상태추정 적용 가능성을 검증해 보았다.

상인역사 전력 시스템의 측정값을 가지고 정확한 상태를 추정하여 95% 유의수준하에서 검증해 본 결과 불량정보가 없음을 확인하였다. 이는 대구 지하철 상인역사의 배전 계통과 각종 측정기기들에 이상이 없다고 판단할 수 있음을 나타낸 것이다. 이번 상태추정을 통하여 실제 지하철 전력 시스템에의 적용 가능성을 타진해 본 결과, 지하철 전력 시스템에 대한 정확한 상태를 추정하는데 상태추정 이론이 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

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 Tran. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, pp. 120-135, January 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 Tran. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, pp. 1698-1708, November 1970
- [3] R. E. Larson, W. F. Tinney, L. P. Hajdu, and D. S. Piercy, "State estimation in power systems. Part II : Implementations and Application". IEEE Tran. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, pp. 353-363, November 1970
- [4] L. Mill, Th. Van Cutsem, M. Ribbons Pavella, "Hypothesis testing identification : A new methods for bad data analysis in power system state estimation", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, pp. 3239-3252, Nov. 1984
- [5] 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
- [6] R. F. Bishke, "Power system state estimation : Practical consideration", IEEE Tran. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 12, pp. 5044-5047, December 1984
- [7] Ke Li, "State Estimation for Power Distribution System and Measurement Impact", IEEE Tran. On PWRS, Vol. 11, No. 2, pp. 911-916, May 1996
- [8] C. N. Lu, J. H. Teng, et al., "Distribution System State Estimation", IEEE Tran. On PWRS, Vol. 10, No. 1, pp. 229-240, February 1995
- [9] 문영현 외, "EMS 관련 소프트웨어 개발에 관한 연구 중간 보고서", 기초전력공학 공동 연구소, 1997

저 자 소 개



류 헌 수(柳憲秀)

1969년 06월 03일 생. 1992년 연세대학교
전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기
공학과 석사 졸업 1996년~현재 동대학원
전기공학과 박사과정

Tel : 02) 2123-2771

E-mail : maxima@yonsei.ac.kr



문 영 현(文永玄)

1952년 3월 11일 생. 1975년 서울대학교
전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기
공학과 석사 졸업 1983년 오레곤 주립대
졸업(공학) 현재 연세대학교 전기·전자
공학과 교수

Tel : 02) 2123-2771

E-mail : moon@yonsei.ac.kr



하 연 관(河連寬)

1973년 02월 11일 생. 1999년 연세대학교
전기공학과 졸업. 2001년 8월 동대학원
전기공학과 석사 졸업, (주)효성 중공업
PG 전력 PU

Tel : 02) 707-6375

E-mail : mic15@hyosung.com