

## 등식제약조건을 이용한 전철변전소 상태추정

### State Estimation of Electric Railway Substation using Equality Constraints

김 백<sup>†</sup> · 홍호식<sup>1</sup> · 유광균<sup>1</sup>

Baik Kim · Hyo Sik Hong · Kwang Kiun Yoo

**Abstract** Through the process of state estimation in the electric railway substation, this paper presents a new method for improving the reliability of the measurements corrupted by gauge error. Unlike the case of commercial power systems, it has been difficult to perform the state estimation by using the usual methods in the electric railway substation. At some of the monitoring points in the substation, most often, it is hard to define the measurement functions by use of the states or as we set up a new states set with the change of system topology, some of the measurement functions become part of the states themselves, which leads to poor results. To resolve the problems in the existing method caused by the relations between the states and the measurement functions at the monitoring points, the proposed method in this paper exploits the equality constraints. They can be derived numerously and concisely from the current and the voltage attributes of the Scott transformer and the buses connecting conditions, etc. We have proofed the effectiveness of the proposed method by the test on a standard sample substation.

**Keywords** : Railway substation, Equality constraints, State estimation, Error, Scott transformer

**초 록** 본 논문은 전철변전소를 대상으로 상태추정을 통하여 계측기 오차 등에 의해 손상된 측정값의 신뢰도를 높이는 새로운 방법에 대하여 기술하였다. 일반적인 전력계통의 상태추정과는 달리 전철변전소에서는 종종 관제점에서 측정값의 함수를 계통 상태변수로 정의하기가 곤란한 경우가 있으며, 계통의 토폴로지 변경에 따라 상태변수를 재설정하는 경우에 측정값 함수의 일부가 상태변수 그 자체를 나타내게 되어 상태추정이 곤란하였다. 본 논문에서 제시하는 방법은 기존의 방법에서 문제가 되는 관제점의 측정값 함수와 상태변수와의 관계를 등식제약조건을 이용하여 해결하는 것으로서, 이들 제약조건은 스코트 변압기의 전압 및 전류 특성과 모선 연결 조건 등으로부터 간결하면서도 다양하게 유도될 수 있다. 제시된 방법은 표준 샘플변전소를 대상으로 하여 그 유효성을 입증하였다.

**주요어** : 전철변전소, 등식제약조건, 상태추정, 오차, 스코트 변압기

## 1. 서 론

상태추정은 오차가 섞여있는 측정값으로부터 실제값에 가까운 계통 상태변수의 값을 알아내기 위하여, 측정값의 오차를 최소화하는 상태변수의 값을 계산하는 수학적 과정을 의미한다. 일반적으로 계측기의 측정값에는 계기의 오차와 함께 데이터 전송 및 변환 과정에서의 잡음도 포함하고 있다. 따라서 보정되지 않은 이러한 원시데이터를 SCADA 등의 중앙관제시스템에 이용하면 시스템 자체의 신뢰도 하락과 급전계통의 안정성을 손상시키는 원인이 될 수 있다. 일반 상업용 전력계통에서 상태추정에 관한 연구는 송전계통으로부터 시작되어 배전계통까지 확대되어[1,2] 이제는 거의 모든 전력회사의 EMS에 상태추정 프로그램이 포함되어 있으며 수치해석적 측면에서의 안정도, 계산의 효율성 및 구현방법의 타당성에 관한 다양한 연구결과가 있다[3]. 전력회

사에서의 상태추정 목적은 모선으로 연결된 대규모 네트워크에서 측정된 모선 주입전력 및 전력조류로부터 모선전압의 크기 및 위상을 추정하는 것으로서[4], 네트워크가 복잡해 질수록 전력 측정값의 잉여데이터가 많이 발생하며 이는 상태추정 측면에서는 추정의 정확도를 향상시키는데 기여하게 된다. 또한 측정값인 전력은 상태변수인 전압으로 간결하게 정의되어 상태추정 과정이 정형적이라 할 수 있다.

이와는 달리 전력계통이라면 수학적 의미는 동일하더라도 상태추정을 통하여 얻고자 하는 목적은 전철변전소 내 주요 관제점의 전압, 전류 상태 및 측정된 전력 등의 신뢰성 향상이라고 할 수 있는데 추후 전력계통이 지능형 전력망(Smart grid)에 연계되는 경우를 고려한다면 특히 중요한 사항이라고 할 수 있다. 한편 전력계통의 특징은 상부구조인 전철변전소로부터 AT 또는 BT 급전계통을 통하여 전철 부하로 이어지는 수직상 방식의 서열구조를 가지고 있으므로 상업용 전력망과 같은 전력조류의 개념은 없으며 전력 측정은 전철변전소에서 부하전력의 개념으로 측정 포인트가 한정되어 있다. 그 외의 측정값은 대부분 모선의 전압 및 전류로서 일부분은 상태변수 그 자체에 해당 되므로 상태추정

<sup>†</sup>교신저자 : 한국철도대학 전기제어과  
E-mail : whitek@krc.ac.kr

<sup>1</sup>한국철도대학 전기제어과

을 통하여 측정값의 신뢰도를 향상시키는 데에는 제약이 따른다. 신설 변전소라면 단로기 등의 조작에 의한 계통의 토폴로지(Topology) 변경에 대비하여 상태변수를 설정하고 이에 따라 관제점을 유연하게 설계하여 상태추정의 신뢰도를 증가시킬 수 있겠으나, 기설 변전소와 같이 이미 관제점이 설정되어 있는 경우라면 관제점의 측정데이터 유형에 따라서는 상태변수의 함수로 표현하기 어려운 경우도 존재하며 더욱이 여기에 30/20 상변환 특성을 갖는 스코트(Scott) 변압기의 복잡성이 더해져 관제점의 측정값 함수를 정의하는 것 자체가 어려운 문제가 된다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 전철변전소 내 변수간의 등식제약조건을 사용하여 해결하였다. 등식제약조건을 사용하는 경우 상태변수의 선정 또는 측정값의 함수관계 정의 등에 구애 받지 않으며, 등식제약조건은 스코트 변압기의 1, 2차 관계 및 모선의 연결조건에 따른 전압 및 전류관계를 이용하여 다양하면서도 함수관계의 정의보다 훨씬 간결한 식으로 구해낼 수 있다. 이들 등식제약조건에 라그랑제 승수자(Lagrange multiplier)를 사용하여 확장된 목적함수(Objective function)를 도출하고 이를 최소화하는 상태변수의 값을 구하는 상태추정과정을 제시하고자 한다. 현재 철도공사에서 운용중인 표준적인 154kV 전철변전소에 대해 제시된 방법으로 시뮬레이션을 하였으며 방법의 유효성을 검증할 만한 만족한 결과를 얻을 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 상태추정 알고리즘

일반적으로 관찰대상이 되는 계통에서 계측기를 통하여 측정되는 측정데이터 집합은 오차를 고려하지 않는다면 계통 상태변수의 함수로 표현되어야 한다. 즉, 가관측(Observable) 계통이라면 측정데이터 집합내의 모든 데이터는 상태변수를 사용하여 정의할 수 있다. 이제 계통의 모든 측정데이터가 이 조건을 만족한다고 보고, 우리가 실제로 취득하는 계측기의 측정값을  $Z_M$ 이라 하면  $Z_M$ 에는 오차  $\zeta$ 가 포함되어 있으며 이 오차  $\zeta$ 와 상태변수  $X$ 의 함수로 정의된 실제값 즉, 관제점의 측정값 함수  $h(X)$ 간에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Z_M = h(X) + \zeta \quad (1)$$

여기서 상태변수의 수를  $n$ , 측정데이터의 수를  $k$ 라 할 때,

$X$ :  $n \times 1$  상태벡터

$Z_M$ :  $k \times 1$  측정벡터

$h(X)$ :  $k \times 1$  상태변수에 의해 정의된 관제점의 측정값 함수벡터

$\zeta$ :  $k \times 1$  오차벡터

계통이 정상상태에 있고 측정을 여러 번에 걸쳐 충분히 시행하였다면 오차의 평균은 0이 되고 측정값의 평균은 실제값에 접근할 것이다. 다시 말하면 측정오차  $\zeta$ 는 일반적으로

평균값이 0인 가우시안(Gaussian) 통계분포를 가지며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P(\zeta_i) = \frac{e^{-\zeta_i^2 / (2\sigma_i^2)}}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \quad (2)$$

여기서 오차의 분산  $\sigma_i^2$ 이 클수록 오차  $\zeta_i$ 가 큰 값으로 나타날 확률이 커짐을 알 수 있다. 한편 모든 측정오차가 상호독립적이라면 측정오차 공분산 행렬  $R$ 은 다음과 같은 대각행렬로 표시된다.

$$R = E[\zeta \zeta^T] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_k^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이제 상태추정은 다음과 같은 목적함수를 최소화하는 상태변수  $X$ 를 구하는 과정으로서 WLS(Weighted Least Square) 문제로 귀결된다.

$$\min PI(X) = \frac{1}{2} [Z_M - h(X)]^T W [Z_M - h(X)] \quad (4)$$

여기서  $W$ 는 측정데이터의 가중치(측정계기의 정확도)를 나타내는 대각행렬로서 식(2)를 통하여 알 수 있는 바와 같이 분산이 큰 측정계기일수록 가중치를 작게 설정하여야 하므로  $W = R^{-1}$ 로 대치할 수 있다. 측정오차의 분산은 실험적으로 구해질 수 있다

### 2.2 등식제약조건에 의한 상태추정 알고리즘

앞에서 언급한 바와 같이 상업용 전력계통에서는  $Z_M$ 이 모선에서의 유효전력 및 무효전력 측정값이 되고  $h(X)$ 는 상태변수인 모선전압의 크기( $V_{bus}$ ) 및 위상각( $\delta_{bus}$ )으로 정의되는 유효전력 및 무효전력의 함수이며, 네트워크 내에서 이들 상태변수로 정의되는 충분한 잉여 측정값을 확보할 수 있어 상태추정에 별다른 문제가 없다. 그러나 전철변전소의 경우에는 측정데이터 자체가 절대적으로 부족하고 또한 빈번한 단로기 조작에 의해 계통의 토폴로지가 수시로 바뀌게 된다. 이 경우 가관측 계통이라면 계통의 상태변수를 다시 선정하여 기존 관제점의 측정값 함수를 새로운 상태변수로 재정의하여야 하며 이 과정에서 기존 관제점의 일부는 상태변수 그 자체를 측정하게 된다. 즉, 식(4)의 해를 구하는 과정에서 측정데이터가 상태변수 그 자체라면 자코비안(Jacobian)은 상수로 구성된 행렬이 되어 해를 구하는 반복과정에서 다음 단계의 개선된 해를 도출해 낼 수 없게 된다. 또한 측정데이터에 따라서는 특정 상태변수의 함수로 표현하기 어려운 경우도 존재한다. 예를 들어 어떤 관제점에서 측정값 함수가 위상각을 나타낸다면 이들은 상태변수의 역삼각 함수로 정의되어 그 자체가 복잡할 뿐만 아니라 이로부터 자코비안을 구하고 해를 구하는 일련의 과정도 역시 복잡하게 되며 전산처리 과정에서의 소요시간도 증가하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 상태변

수  $X$ 를 확장한 개념의  $\hat{X}$ 를 도입하고자 한다.  $\hat{X}$ 는 계통 독립변수 개념의 상태변수와 종속변수를 포함한 변수 집합으로, 계통 토폴로지의 변경에 따라  $X$ 는 변경될 수 있으나  $\hat{X}$  집합은 바뀌지 않는다. 기존에 계통 상태변수  $X$ 와 이들의 함수로 정의될 수 있는 종속변수와의 관계는 이제  $\hat{X}$ 간의 등식제약조건으로 정의되게 되어 토폴로지 변경에 따라 새로운 상태변수를 선정하는 경우에 관계점의 측정값 함수를 재정의할 필요가 없게 된다. 식(1)의  $h(X)$ 는  $h(\hat{X})$ 로 되며  $\hat{X}$ 간의 등식제약조건은 전철변전소 내 스코트 변압기의 1,2차 관계 및 모선연결에 따른 전압 및 전류 조건으로부터 다양하게 유도해 낼 수 있다.

$\hat{X}$ 간의 등식제약조건을 다음과 같이,

$$g(\hat{X}) = 0 : m \times 1 \text{ 등식조건 벡터}$$

라 하면, 식(4)는 다음과 같은 조건부 WLS로 바뀐다.

$$PI(\hat{X}) = \frac{1}{2} [Z_M - h(\hat{X})]^T R^{-1} [Z_M - h(\hat{X})] \quad (5)$$

$$\text{subject to } g(\hat{X}) = 0$$

위 식은 라그랑제 승수  $\lambda$ 를 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\min PI_a(\hat{X}, \lambda) = \frac{1}{2} [Z_M - h(\hat{X})]^T R^{-1} [Z_M - h(\hat{X})] + \lambda^T g(\hat{X}) \quad (6)$$

이제  $\hat{X}$ 는 위와 같이 '확장된 목적함수'를 정의하는 '확장된 상태변수'로 볼 수 있다. 이 목적함수의 최적해는,

$$dPI_a(\hat{X}, \lambda) = \left\{ - \left[ \frac{\partial h(\hat{X})}{\partial \hat{X}} \right]^T R^{-1} [Z_M - h(\hat{X})] + \left[ \frac{\partial g(\hat{X})}{\partial \hat{X}} \right]^T \lambda \right\} d\hat{X} \quad (7)$$

$$+ g(\hat{X}) d\lambda = 0$$

로부터 다음과 같은  $n + m$  개의 비선형연립방정식의 해가 된다.

$$f(\hat{X}, \lambda) = - \left[ \frac{\partial h(\hat{X})}{\partial \hat{X}} \right]^T R^{-1} [Z_M - h(\hat{X})] + \left[ \frac{\partial g(\hat{X})}{\partial \hat{X}} \right]^T \lambda = 0 \quad (8)$$

$$g(\hat{X}) = 0$$

이 식의 해는 다음과 같이 Newton-Raphson 반복법을 사용하여 구할 수 있으며

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \dots \\ \lambda_{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X} \\ \dots \\ \lambda_j \end{bmatrix} - J(\hat{X}, \lambda)_j^{-1} \begin{bmatrix} f(\hat{X}, \lambda) \\ \dots \\ g(\hat{X}) \end{bmatrix}_j \quad (9)$$

여기서 자코비안은 다음과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$J(\hat{X}, \lambda) = \frac{\partial}{\partial \hat{X}, \lambda} \begin{bmatrix} f(\hat{X}, \lambda) \\ \dots \\ g(\hat{X}) \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \left( \frac{\partial h}{\partial \hat{X}} \right)^T R^{-1} \left( \frac{\partial h}{\partial \hat{X}} \right) & \left( \frac{\partial g}{\partial \hat{X}} \right)^T \\ \left( \frac{\partial g}{\partial \hat{X}} \right) & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

한편, 주 변압기인 스코트 변압기에서 1,2차 전압 및 전류간에는 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있으며, 이 식으로부터  $g(\hat{X}) = 0$ 를 구성하는 간결한 등식조건을 얻을 수 있다.

$$[i_{abc}] = \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}a} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}a} & -\frac{1}{a} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}a} & \frac{1}{a} \end{bmatrix} [i_{TM}]_{(A)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{0} \end{bmatrix} [i_{TM}]_{(P,U)} \quad (11)$$

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}a}{2} & \frac{a}{2} \\ 0 & -a \\ -\frac{\sqrt{3}a}{2} & \frac{a}{2} \end{bmatrix} [e_{TM}]_{(V)} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & -1 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} [e_{TM}]_{(P,U)} \quad (12)$$

위 식(11), 식(12)에서  $a$ 는 M와 변압기의 권수비를 나타내며 또한 측정 전력은

$$S = [e_{abc}]^T [i_{abc}]^* = [e_{TM}]^T [i_{TM}]_{(V,A)}^*$$

$$S = \frac{1}{3} [e_{abc}]^T [i_{abc}]^* = 2 [e_{TM}]^T [i_{TM}]_{(P,U)}^* \quad (13)$$

과 같은 등식이 성립하고, 모선연결 상태로부터도 전압 및 전류에 관계된 등식을 얻을 수 있다. 다만, 식(10)으로부터도 알 수 있는 바와 같이  $g(\hat{X})$ 는 이를 구성하는 과정에서 자코비안이 특이행렬이 되지 않도록 서로 독립적인 등식제약조건만으로 취해야 한다.

### 3. 표본계통 적용

제시된 방법을 철도공사에서 현재 운용중인 Fig. 1과 같은 표준적인 154kV 전철변전소에 대해 적용하기로 한다. 관계범위는 스코트 변압기 2차측 모선까지이며 그림에서 원문자로 표시된 부분은 측정포인트를 나타내고 있다. 모의는 다음과 같이 통상적으로 받아들여지는 가정을 전제하였다.

- 한전계통은 3상 평형된 무한모선으로 간주한다.
- 스코트 변압기의 여자 임피던스는 무시한다.

관계점으로부터 얻어지는 측정값은 실제값에  $\pm 6\%$ 의 오차를 더하여 인위적으로 작성한 값이며 계측기의 가중치는 전압 및 전류의 경우는 2.0 그리고 전력의 경우는 전압계와 전류계의 오차가 결합되어 나타나므로 1.0으로 설정하였다. Bay A에는 평형부하를 그리고 Bay B에는 불평형 부하를 인가하였으며 전력 측정은 수전점에서 3상분 유효전력( $P_{30}$ )과 3상분 무효전력( $Q_{30}$ )만을 측정한다고 보고 나머지는 모두  $\hat{X}$  자체를 측정된 값이 된다. Table 1은 그림에서 실선부분의 원으로 표현된 관계점(일반적인 전철변전소의 경우에 해당)에서 얻은 측정값에 대하여 본 논문에서 제시한 알고리

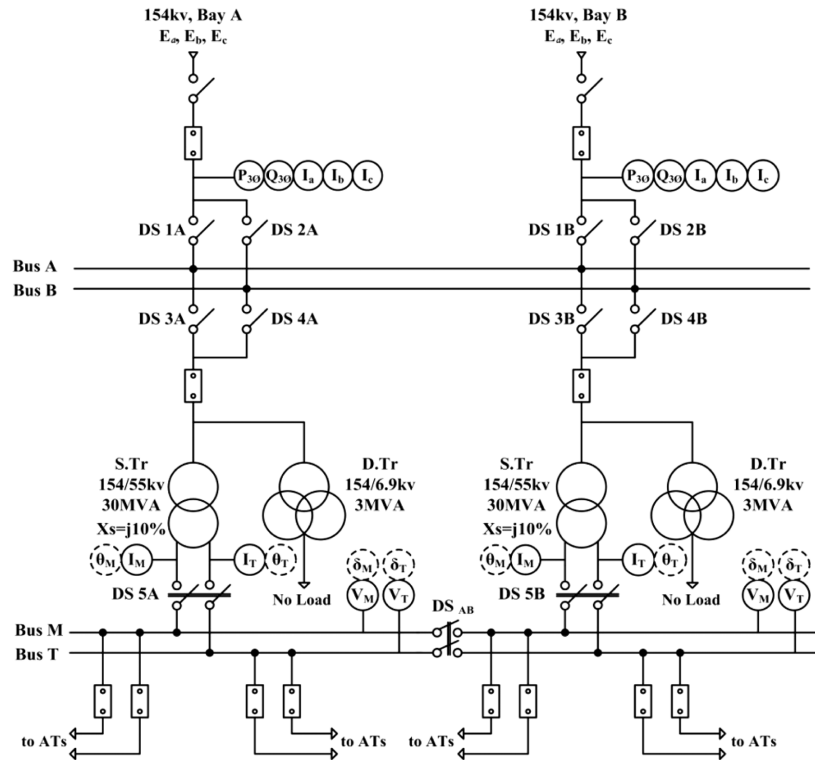


Fig. 1 A line diagram of 154kV railway substation

즘으로 상태추정을 실행한 결과를 나타내고 있다.

Table 1의 결과를 살펴보면 상태추정을 시행하기 전 실제 값과 측정값간의 2-norm은  $\|Z_M - \hat{X}_r\| = 0.1849$  임에 반해, 상

Table 1 Estimation results : Measured vs. Estimated(30MVA base)

	Bay A			Bay B		
	Measured ( $Z_M$ )	Real ( $\hat{X}_r$ )	Estimated ( $\hat{X}_e$ )	Measured ( $Z_M$ )	Real ( $\hat{X}_r$ )	Estimated ( $\hat{X}_e$ )
$P_{30}$	0.7632	0.7200	0.7318	0.4664	0.4400	0.4443
$Q_{30}$	0.3696	0.3487	0.3543	0.3498	0.3300	0.3389
$I_a$	0.7520	0.8000	0.8143	0.6580	0.7000	0.7124
$\theta_a$		-0.4510	-0.4591		-0.6435	-0.6584
$I_b$	0.8480	0.8000	0.8067	0.5219	0.4924	0.4954
$\theta_b$		-2.5454	-2.5424		-3.0049	-3.0129
$I_c$	0.8480	0.8000	0.8183	0.5219	0.4924	0.5046
$\theta_c$		1.6434	1.6489		1.7178	1.7143
$I_T$	0.8480	0.8000	0.8143	0.7420	0.7000	0.7124
$\theta_T$		-0.4510	-0.4591		-0.6435	-0.6584
$I_M$	0.7520	0.8000	0.8119	0.3760	0.4000	0.4053
$\theta_M$		1.1198	1.1282		0.9273	0.9309
$V_T$	0.9097	0.9678	0.9667	0.9020	0.9596	0.9581
$\delta_T$		-0.0745	-0.0756		-0.0584	-0.0588
$V_M$	1.0253	0.9678	0.9680	1.0351	0.9765	0.9763
$\delta_M$		1.4963	1.4949		1.5380	1.5375

태추정 후에는 실제값과 추정값간의 2-norm이  $\|\hat{X}_e - \hat{X}_r\| = 0.0411$  로 대폭 감소하였다. 상태추정 시행 전 오차평균은  $\pm 6\%$ 였으나, 추정 후에는 오차평균이  $\pm 1.3\%$ 로 감소하여 측정값에 포함되어 있는 오차가 상당히 보정되었음을 알 수 있다. 또한 부하의 평형, 불평형 상태에 상관없이 유도된 등식 제약조건이 상태추정 알고리즘에 효과적으로 반영되고 있음을 알 수 있다.

한편, Table 2는 위상각 관제점을 추가하여 등식 제약 조건을 적용하는 경우와 적용하지 않는 경우의 상태추정 결과를 보여주고 있다. 앞에서 기술한 바와 같이 위상각 관제점에서는 측정값 함수를 상태변수로 정의하기 곤란한 문제를 가지고 있다. 상태추정 시행 전 실제값과 측정값간의 2-norm은  $\|Z_M - \hat{X}_r\| = 0.2462$ , 오차평균은 모의에서 설정한 값인  $\pm 6\%$ 이며 이제 등식 제약조건을 적용하여 제시된 알고리즘으로 상태추정을 한 결과는 Table 1의 결과와 유사하게 실제값과 추정값간의 2-norm이  $\|\hat{X}_e - \hat{X}_r\| = 0.0900$ , 오차평균은  $\pm 2.0\%$ 으로 효과적으로 상태추정이 되었음을 알 수 있으나, 이를 적용치 않은 경우는 실제값과 추정값간의 2-norm이  $\|\hat{X}_e - \hat{X}_r\| = 0.2421$ , 오차평균은  $\pm 5.6\%$ 로 측정값의 보정이 거의 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다. 특히 Table 2에서  $I_T$  이후의 측정값은 등식 제약조건을 적용하지 않는 경우 측정값 함수가 상태변수 그 자체를 나타내게 되므로 상태추정을 통하여 개선된 해가 도출되지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 제시된 방법을 적용하더라도 Table 1과 Table 2의 결과를 비교하면 등식 제약조건이 추가 없이 단순히 측정점만을 추가하는 경우에는 오히려 누적오차가 증가하므로 측정점의

Table 2 Estimation results : Existing vs. Proposed(30MVA base)

	Bay A				Bay B			
	Measured ( $Z_M$ )	Real ( $\hat{X}_r$ )	Estimated ( $\hat{X}_e$ )		Measured ( $Z_M$ )	Real ( $\hat{X}_r$ )	Estimated ( $\hat{X}_e$ )	
			Existing	Proposed			Existing	Proposed
$P_{30}$	0.7632	0.7200	0.7385	0.7233	0.4664	0.4400	0.4556	0.4451
$Q_{30}$	0.3696	0.3487	0.3577	0.3668	0.3498	0.3300	0.3417	0.3341
$I_a$	0.7520	0.8000	0.7566	0.8147	0.6580	0.7000	0.6602	0.7132
$\theta_a$		-0.4510	-0.4510	-0.4406		-0.6435	-0.6435	-0.6181
$I_b$	0.8480	0.8000	0.8526	0.8297	0.5219	0.4924	0.5241	0.5151
$\theta_b$		-2.5454	-2.5454	-2.5815		-3.0049	-2.7379	-3.0231
$I_c$	0.8480	0.8000	0.8526	0.7890	0.5219	0.4924	0.5241	0.4793
$\theta_c$		1.6434	1.6434	1.6140		1.7178	1.4509	1.7170
$I_T$	0.8480	0.8000	0.8480	0.8147	0.7420	0.7000	0.7420	0.7132
$\theta_T$	-0.4239	-0.4510	-0.4239	-0.4406	-0.6049	-0.6435	-0.6049	-0.6181
$I_M$	0.7520	0.8000	0.7520	0.8078	0.3760	0.4000	0.3760	0.4005
$\theta_M$	1.0526	1.1198	1.0526	1.0724	0.8717	0.9273	0.8717	0.8808
$V_T$	0.9097	0.9678	0.9097	0.9681	0.9020	0.9596	0.9020	0.9604
$\delta_T$	-0.0700	-0.0745	-0.0700	-0.0762	-0.0549	-0.0584	-0.0549	-0.0606
$V_M$	1.0253	0.9678	1.0253	0.9640	1.0351	0.9765	1.0351	0.9750
$\delta_M$	1.5861	1.4963	1.5861	1.4971	1.6303	1.5380	1.6303	1.5391

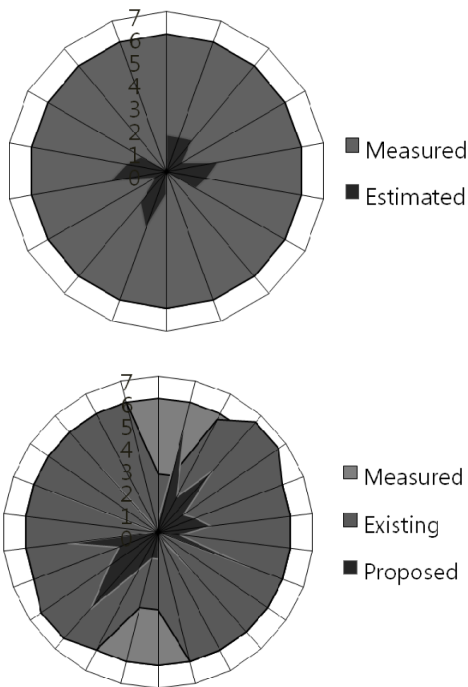


Fig. 2 Error distribution comparison(Measured vs. Existing vs. Proposed)

증설보다는 정확한 등식제약조건을 적용이나 이들 조건의 추가가 상태추정 측면에서는 실효성이나 경제성에서 유리함을 알 수 있다.

Fig. 2는 Table 1 및 Table 2의 결과에 의한 오차 분포를

거미줄 형식의 그래프로 나타낸 것으로 상태추정 시행 전, 기존방식에 의한 상태추정 결과 그리고 제시된 방법에 의한 상태추정 결과를 명확하게 비교해 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

전철변전소는 관제점의 숫자는 적은 반면 관제점에서 측정하는 데이터의 유형은 전력, 전압, 전류 및 위상각 등으로 다양하고 단로기 등의 스위치 조작이 빈번히 발생하며 이때마다 계통의 토폴로지가 변경되는 특징을 갖고 있다. 상태추정 측면에서는 계통의 토폴로지 변경은 상태변수의 재설정을 요구하며 이 경우 기존의 상태추정 방법으로는 관제점에서 측정값 함수를 새로운 상태변수를 사용하여 재정의 하는 번거로운 문제가 발생하며 관제점의 유형에 따라서는 측정값 함수를 정의하기 곤란하거나 또는 일부 관제점이 상태변수 그 자체를 나타내게 되어 상태추정의 실효성이 떨어지는 문제점이 있었다.

본 논문에서 제시한 방법은 상태변수와 측정값 함수간의 이러한 문제를 등식제약조건을 이용하여 해결하였다. '확장된 상태변수'와 라그랑제 승수자를 사용하여 목적함수를 재구성하여 최소화 해를 구하며 계통의 토폴로지 변경이나 관제점의 유형에 따른 문제에 유연하게 대처할 수 있는 특징을 갖고 있으며 이를 표본계통에 대한 모의를 통하여 확인할 수 있었다. 표본계통에 대한 모의결과, 제시된 알고리즘에 의해 추정값의 오차는 평균적으로 1/3이하로 감소하는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었으며 기존방식에 의한 문제점을 해결할 수 있음을 확인하였다. 또한 측정점의 단순한

증설 보다는 정확한 등식제약조건을 추가하는 것이 상태추정의 실효성이나 경제성 측면에서도 유리함을 알 수 있었다.

한편, 전철급전계통에서 상태추정기법을 실제적으로 적용하기 위해서는 현재 전철변전소에 한정되어있는 SCADA의 관제범위는 AT를 포함한 급전계통 하단부까지 확장되어야 하며 또한 계통에서 가장 중요한 부하인 차량과 관련한 상태변수가 적절한 수단으로 취득되어야 한다고 판단된다[5]. 기존의 방식과 비교하였을 때 제시된 방법의 단점이라면 변수와 제약조건이 증가에 따라 자코비안 등의 행렬이 커지는 문제가 있으나 최근의 하드웨어 수준에서는 이 방식을 적용하는데 제약조건이 되지는 않는다고 판단된다.

### 참고문헌

- [1] A.P. Sakis, Fan Zhang (1996) Multiphase power flow and state estimation for power distribution systems, *IEEE Transactions on PWRs*, 11(2), pp. 939-946.
- [2] Ke Li (1996) State estimation for power distribution system, *IEEE Transactions on PWRs*, 11(2), pp. 911-916.
- [3] M. Shahidehpour, Y. Wang(2003) *Communication and Control in Electric Power Systems*, John Wiley & Sons Inc., NJ, pp. 239-244
- [4] D.P. Kothari, I.J. Nagrath (2004) *Modern Power Systems Analysis (3<sup>rd</sup> Edition)*, McGraw-Hill, NY, pp. 538-544.
- [5] B. Kim, Y.H. Moon (2006) Analysis of AT feeding systems considering the voltage constraint conditions of the pantograph, *Journal of the Korean Society for Railway*, 9(6), pp. 652-656.
- 접수일(2010년 6월 28일), 게재확정일(2010년 8월 5일)