

DUMMY모선을 고려한 상태추정 측정점선정 알고리즘에 관한 연구

A Study on Measurement Selection Algorithm for Power System State Estimation Under the Consideration of Dummy Buses

文 永 鉉* · 李 台 植**
(Young-Hyun Moon · Tae-Shik Lee)

Abstract - This paper presents an improved algorithm of optimal measurement system design with a reliability evaluation method for a large power system. The proposed algorithm is developed to consider the dummy bus and to achieve highest accuracy of the state estimator as well with the limited investment cost. The dummy bus in the power system is impossible to install measurement meter, while real and reactive power measurement values are exactly zero. Thus, the effect on these dummy bus measurements is considered in the proposed algorithm. On the other hand, P/C model is developed by taking advantage of the matrix sparsity. The improved program is successfully tested for KEPCO system with PSS/E lineflow calculated data package.

Key Words : · Dummy Bus(더미모선) · RTU(원격제어기기)
· State Estimation(상태추정) · Sparsity Technique(스파스티기법)
· Measurement Set(측정세트)

1. 서 론

본 연구는 전력계통 상태추정을 위한 측정점 선

*正 會 員 : 延世大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

**正 會 員 : 延世大 大學院 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 1991年 8月 29日

1次修正 : 1991年 11月 27日

정 알고리즘의 개선에 관한 연구로서, 전력계통송전선의 T-브랜치와 같은 더미모선(dummy bus)에서는 측정계기의 설치가 불가능하므로 이러한 더미모선의 영향을 정확히 반영할 수 있는 측정점선정 알고리즘을 제시하였다.

전력계통에서는 송전선의 T-브랜치 및 발전소의

STEP-UP 선로가 연결된 모선등이 더미모선에 해당되며 상당수의 더미모선이 존재하고 있으나 종래의 측정점 선정 알고리즘에서는 이러한 더미모선의 영향을 무시하고 측정점을 선정하였다. 그러나, Wu[3]등이 상태추정에서 더미모선의 영향을 고려함으로써 더욱 정확한 상태추정을 기할 수 있음을 발표한 후에 상태추정에서도 더미모선을 고려하는 것이 일반화되었으며 이에 따라 측정점 선정에서도 이러한 영향을 고려하는 것이 보다 효과적인 측정점 선정이 될 수 있다.

계통의 더미모선에서는 측정계기설치가 불가능하지만 더미모선에 유입하는 모선유효·무효전력은 항상 정확히 영이 되므로 오차공분산이 영인 매우 정확한 측정치로 간주될 수 있으며 이러한 측정치의 영향을 측정점 선정 알고리즘에 반영시켜야만 한다.

본 연구에서는 이러한 더미모선 영향을 고려하기 위하여 더미모선에는 RTU설치와 상관없이 항상 유효·무효모선주입전력은 정확히 측정될 수 있는 것으로 간주하였으며 상태변수 공분산 수정 공식에서 공분산이 영인 측정치를 정확히 반영시킬 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 한편, 개발된 전산프로그램에서는 행렬의 스파시티(sparsity)를 고려함으로써 1차원 배열을 통한 메모리 절감과 계산시간 단축을 기할 수 있으며 MUST-RTU 개념을 도입하여 알고리즘에 반영시킴으로써 계산시간을 대폭 절감시켰다. 한편 제시된 전산프로그램에 대하여 P/C 모듈로 개발하므로써 프로그램의 활용성과 편의성을 크게 향상시켰으며, PSS/E 조류 계산 데이터 팩키지와 간접적으로 연계가 가능하도록 하였고, 이에 따라 별도의 데이터 작업없이 프로그램 수행이 가능하게 함으로써 작업 능률을 향상시켰다.

2. 측정점 선정이론

측정점 선정을 위한 상태추정을 위하여 계통의 각 요소로부터 측정되어 들어온 측정치는 실제상태에 의한 함수값에 잡음등에 의한 오차가 포함되어 있는 것으로 볼 수있으므로 다음과 같이 표기될 수 있다.

$$z = h(x) + v$$

$$\text{with } E[v] = 0, E[v v^T] = R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 \\ & \cdot \\ 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

단, $h(x)$: m 차원 측정 함수

- x : n 차원 측정벡터
- v : m 차원 잡음벡터
- R : $(m \times m)$ 잡음 공분산 행렬

상기 식에서 측정치에 포함된 오차는 알 수 없으며, 다만 오차의 통계적 성질을 알 수 있을 뿐이다. 측정오차는 일반적으로 가우시안(Gaussian) 통계분포를 갖으며 평균치와 공분산(covariance)에 의하여 통계적성질을 나타낼 수 있다. 오차의 평균은 영(zero)이므로 $E[v] = 0$ 이며 오차의 공분산은 실험적으로 구해질 수 있으며 각 측정장치에 포함된 오차가 독립적(independent)이면 대각선행렬(diagonal matrix)로 주어진다.

기존의 측정점 선정이론에 의하여 정리하면 다음과 같다. [1, 2] 상태추정오차(SEE) 공분산 행렬에 관한식을 쓰면,

$$P = E\{(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T\} = \{H^T R^{-1} H\}^{-1} \quad (2)$$

with $H = \frac{\partial h(x_0)}{\partial x}$

단, $\hat{x} = x_0 + (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} [z - h(x_0)]$

- x_0 : 운전상태
- \hat{x} : 추정된 상태

이 된다. 그리고 측정치의 제거시에 상태추정 오차공분산 행렬인 P 를 변형 시키기 위한 반복적인 공식을 적용하려 하면, P 는

$$P' = P - PH[H_a P^T H_a - R_a]^{-1} H_a P \quad (3)$$

단, 측정치의 제거시

이 되며, 상태추정오차는

$$\epsilon = E\{(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T\} = \text{Trace} P \quad (4)$$

가 된다. 이로부터 측정 계통의 평가함수를 표현하면,

$$J = E(y - \hat{y})^T W (y - \hat{y})$$

$$= E[\text{trace}(GPG^T)]$$

$$= \sum_{E_k \in \Omega} \text{Prob}[E_k] \text{Trace}(GP_{E_k}G^T) \quad (5)$$

이며, 이때 W 는 하중행렬을 나타낸다. 여기서 사용된 용어를 설명하면,

$$G \text{는 } W^{1/2} \frac{\partial h(x_0)}{\partial x}$$

E_k 는 측정계기/측정계기계통의 결손, Ω 는 모든 결손의 집합,

P_{E_k} 는 $[(H_{E_k}^{-1})^T P_{E_k}^{-1} H_{E_k}]$: E_k 결손시 SEE공분산 행렬,

$\text{Prob}(E_k)$ 는 E_k 결손시 확률, H_{E_k}, P_{E_k} 는 결손 E_k 발생시 이용가능 측정치에 대한 측정치 방정식

의 자코비안 행렬 및 측정 오차 공분산 행렬이다.

상태추정 오차감도에 의한 측정점 선정시, RTU가 모든 모선에 설치되어 있다고 가정함으로써 최적측정후보를 선정하는 알고리즘이 개발되어져있다. 본 연구에서는 네가지 알고리즘인 연속적인 RTU 제거 알고리즘, 연속적인 Meter 제거 알고리즘, 결합알고리즘, 그리고 지역별 데이터 선정 알고리즘이 개선 또는 개발되었다.

3. 더미모선(Dummy bus)을 고려한 측정점 선정 알고리즘

본 연구는 상태추정을 위한 측정점 선정에 있어서 더미모선(dummy bus)의 영향을 고려함으로써 보다 정확한 측정점을 선정할 수 있는 알고리즘을 연구하였다. 더미모선이란, 전력계통 송전선의 T-브랜치와 같은 모선으로서, 측정계기의 설치가 불가능하지만 더미모선에 유입하는 유효·무효 전력은 항상 영이며, 오차 공분산이 영인 매우 정확한 측정치로 간주될 수 있다.

상태추정을 위한 측정점 선정에 있어서 더미모선을 고려하지 않을 경우 상태추정오차 공분산 행렬 계산시 더미모선의 유효·무효 주입전력에 해당하는 의사측정치(pseudo measurement)를 반영시켜야 하나 의사측정치의 측정 공분산이 영이기 때문에 종래의 측정점 추가 또는 제거를 위한 순환공식이 적용될 수 없다. 따라서 본 연구에서는 공분산이 영인 더미모선에서의 의사 측정치를 정확히 반영시킬 수 있는 알고리즘을 다음과 같이 개발하였다.

주어진 측정시스템에 있어서 측정점이 다음과 같이 주어진다 하고 하자.

$$z = h(x) + v \tag{6}$$

단, $E[v v^T] = R$: 대각행렬

위의 측정점에는 더미모선의 의사측정치도 포함되어 있으며 모든 의사측정치를 하나의 그룹으로 묶어서 측정그룹 h_{ap}, h_{aq} 로 표시된다고하면 새로운 측정세트는 다음과 같이 표현된다.

$$H_P = \begin{bmatrix} h_{1P} \\ \vdots \\ h_{aP} \\ \vdots \\ h_{mP} \end{bmatrix} \quad H_Q = \begin{bmatrix} h_{1Q} \\ \vdots \\ h_{aQ} \\ \vdots \\ h_{nQ} \end{bmatrix} \tag{7}$$

Z_P 는,

$$Z_P = \begin{bmatrix} h_{1P}(x) \\ \vdots \\ h_{aP}(x) \\ \vdots \\ h_{mP}(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_d \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} \tag{8}$$

단, $V_d=0$
(V_d 는 더미모선 Error)

이다. Z_Q 는,

$$Z_Q = \begin{bmatrix} h_{1Q}(x) \\ \vdots \\ h_{aQ}(x) \\ \vdots \\ h_{nQ}(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_d \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \tag{9}$$

단, $V_d=0$
(V_d 는 더미모선 Error)

이다.

$$R_P = E[v v^T] = \begin{bmatrix} R_{1P} & & 0 \\ & \ddots & \\ & & R_{aP} \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & R_{mP} \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$R_Q = E[v v^T] = \begin{bmatrix} R_{1Q} & & 0 \\ & \ddots & \\ & & R_{aQ} \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & R_{nQ} \end{bmatrix} \tag{11}$$

위 식에서 더미모선에 해당하는 공분산 행렬은 $R_{aP}=0, R_{aQ}=0$ 인 영행렬이 된다. 그러나 R_{aP}, R_{aQ} 가 완전히 영이면 이론전개가 불가능하므로 R_{aP} 및 R_{aQ} 는 영이 아닌 매우 작은 값을 갖는다고 가정하고 수식을 전개시키려고 한다. 그러면 새로운 상태추정오차 공분산행렬 P_n 은 새로이 구성된 측정점 벡타에 의해 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} P_n &= (H^T R^{-1} H)^{-1} \\ &= \left(\sum_{i=1}^m H_{iP}^T R_{iP}^{-1} H_{iP} + H_{aP}^T R_{aP}^{-1} H_{aP} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^n H_{iQ}^T R_{iQ}^{-1} H_{iQ} + H_{aQ}^T R_{aQ}^{-1} H_{aQ} \right)^{-1} \\ &= \left[\left(\sum_{i=1}^m H_{iP}^T R_{iP}^{-1} H_{iP} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{i=1}^n H_{iQ}^T R_{iQ}^{-1} H_{iQ} \right) \right. \\ &\quad \left. + [H_{aP}^T \quad H_{aQ}^T] \right. \\ &\quad \left. \begin{bmatrix} R_{aP}^{-1} & 0 \\ 0 & R_{aQ}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{aP} \\ H_{aQ} \end{bmatrix} \right]^{-1} \end{aligned} \tag{12}$$

단,

H : 더미모션을 고려한 측정세트에 대한 측정행렬

R : 대각행렬

$$H_{iP} = \partial h_{iP} / \partial X$$

$$H_{iQ} = \partial h_{iQ} / \partial X$$

이를 정리하면,

$$P_n = \left[P^{-1} + \begin{bmatrix} H_{dP}^T & H_{dQ}^T \\ R_{dP}^{-1} & 0 \\ 0 & R_{dQ}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{dP} \\ H_{dQ} \end{bmatrix} \right]^{-1} \quad (13)$$

단,

$$P^{-1} = \left(\sum_{i=1}^m H_{iP}^T R_{iP}^{-1} H_{iP} + \sum_{i=1}^n H_{iQ}^T R_{iQ}^{-1} H_{iQ} \right) \text{이다.}$$

상기한 P_n 관계수식에 역행렬정리(matrix inversion lemma)를 적용하여 아래 상태추정오차 공분산행렬에 대한 순환공식이 유도된다.

$$P_n = P - P \begin{bmatrix} H_{dP}^T & H_{dQ}^T \\ H_{dP} & H_{dQ} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{dP} \\ H_{dQ} \end{bmatrix} P + \begin{bmatrix} R_{dP} & 0 \\ 0 & R_{dQ} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{dP} \\ H_{dQ} \end{bmatrix} P \quad (14)$$

위의 식을 더 간략하면, $R_{dP} = R_{dQ} = 0$ 가 되므로 이에 해당하는 항을 생략하면, 다음과 같다.

$$P_n = P - P \begin{bmatrix} H_{dP}^T & H_{dQ}^T \\ H_{dP} & H_{dQ} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{dP} \\ H_{dQ} \end{bmatrix} P \quad (15)$$

위의 공식에 따라 더미모션을 고려한 측정점 세트를 위하여 상태추정 공분산 행렬을 수정할 수 있다.

실계통 적용시 더미모션은 초기에 결정되며 더미모션의 의사측정치는 절대적으로 정확한 측정치이므로 이러한 의사측정치는 제거할 수 없는 must-meter로 설정한다. 그리고 이러한 의사측정치는 RTU나 미터 제거 또는 추가시 매 단계마다 고려할 필요는 없으며 초기의 계통 측정세트에 대한 상태추정 공분산 행렬 계산시에 한번만 고려하면 된다. 이상의 이론에 따라 본 연구에서는 더미모션을 고려할 수 있도록 측정점선정 알고리즘을 계산하였으며 이것을 흐름도로 표시하면 다음과 같다.

본 흐름도에서 RTU 및 측정미터에 대한 감도계산 및 추가·제거 순서결정은 기존의 연구결과 [5]를 사용하였으며 종래의 알고리즘을 개선한

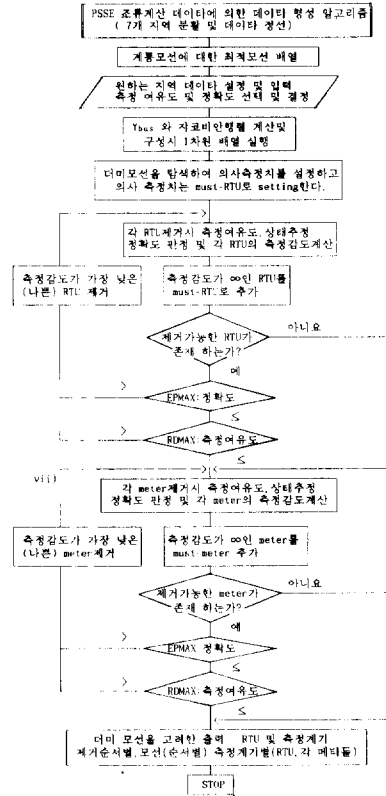


그림 1 상태추정을 위한 측정점 알고리즘 흐름도
Fig. 1 Flowchart of the Measurement System Design for State Estimation

부분은 더미모션을 고려한것 외에도 감도계산시 감도가 ∞인 경우는 필수적인 RTU 또는 meter가 된다는 사실을 이용하여 must-RTU 또는 must-meter로 지정하는 방법을 도입한 점이다. 이 방법을 사용하면 must-RTU 또는 must-meter로 지정된 것에 대해서는 감도계산을 생각할 수 있으므로 상당한 계산시간 절감이 가능하며 특히 RTU 제거시에는 대폭적으로 계산시간이 단축되었다.

4. 측정점 선정프로그램 개선

기존의 측정점 선정프로그램은 대형전산 시스템에서 개발되었으며 이에 따라 실계통 적용시 많은 소요 기억용량을 필요로하는 단점이 있고 실제 한 전계통에 적용하는 경우 중형 이상의 컴퓨터를 사용하여야만 프로그램 수행이 가능하였다. 본 연구에서는 측정점 선정 프로그램을 P/C에 적용할 수 있도록 하기 위하여 Sparsity 프로그래밍 기법을

표 1 Y_{BUS} 행렬 구성시 1차원과 2차원 배열 비교

Table 1 The comparison of one-dimension and two-dimension with composing Y_{BUS} Matrix

	6모선 7선로	80모선 100선로	300모선 356선로(원계통)
1차원	39	540	1,968
2차원	42	8,000	106,800
기억용량 사용율	92.8%	6.75%	1.84%

표 2 자코비안 행렬 구성시 1차원과 2차원 배열 비교

Table 2 The comparison of one-dimension and two-dimension with composing Jacobian Matrix

	6모선 7선로	80모선 100선로	300모선 356선로(전계통)
1차원	$48+162=210$	$680+2,280=2,960$	$2,436+8,208=10,644$
2차원	$120+156=276$	$22,400+28,800=51,200$	$303,600+393,600=697,200$
기억용량 사용율대비	76.1%	5.8%	1.5%

도입함으로써 대폭적인 메모리 절감을 시도하였다. 즉 많은 메모리를 필요로 하는 측정 자코비안 행렬과 Y_{BUS} 행렬을 1차원배열 하였고 전산프로그램을 작업모듈별로 분리함으로써 전체 소요기억용량을 대폭 줄일 수 있었으며 이에따라 한전계통을 7개 지역으로 분할하였을 경우 소형 P/C 386(메모리 4M)에서 개발된 프로그램이 수행될 수 있음을 확인하였다.

단일 프로그램을 4개의 프로그램(입력 데이터 형성, 자코비안 행렬구성, RTU 및 메타제거와 후보메타 결정, 실용화된 출력)으로 분리함으로써 메모리를 보다 효율적으로 사용할 수 있게 되었다. 이는 다시금 배치(BATCH)화일로 묶어 놓음으로서 단일 프로그램과 같은 느낌이 들도록 하였다.

PSS/E 조류계산 데이터 패키지와 간접적으로 연계하여, 데이터를 한전의 분류기준인 7개 지역과 동일하게 입력할 수 있도록 하였고, 또한 필요시에는 2~7개 지역을 연계하여 사용할 수 있도록 되어 있다.

본 프로그램에서는 PSS/E 조류계산 데이터를 자동으로 지역별 분할하여 저장하며, 필요시에 연계하여 수행할 수 있게끔 하였고 모선번호와 선로번호를 최적의 번호로 배열하기 위하여 서브루틴 OPTBUS(OPTimal BUS ordering)과 FUNCTION IBUS)를 개발하여 사용하였다. 기억용량의 감소를 위하여 다음 규칙을 적용하였다.

자코비안 행렬은 2개부분인 H_P (유효측정치),

H_{QV} (무효 및 전압측정치)로 구성되며 2차원 배열은

$$H_P : (\text{모선수} + \text{선로수} \times 2) \times (\text{모선수})$$

$$H_{QV} : (\text{모선수} \times 2 + \text{선로선수} \times 2) \times (\text{모선수})$$

의 메모리가 필요하며 1차원 배열은 다음과 같은 메모리가 필요하다.

$$H_P : \text{모선수} + \text{선로수} \times 6$$

$$H_{QV} : \text{모선수} \times 2 + \text{선로수} \times 6$$

이에따라 1차원 배열시의 소요기억 용량은 계통크기에 따라 비교해보면 표1과 표2와 같다.

따라서, Y_{BUS} 행렬과 자코비안 행렬의 저장에 있어서 1차원 배열방법을 사용하면 대폭적인 메모리 절감이 가능하다.

5. 사례연구 및 연구고찰

본 연구에서는 제시된 더미모선을 고려한 측정점 선정 이론을 IEEE 6모선과 7개지역으로 분할된 한전계통에 적용하여 그 타당성을 결과고찰에서 입증하였다.

사례연구에서는 이미 효율성이 입증된 바 있는 측정점 선정 알고리즘 [1, 2]에 대하여 더미모선을 고려하여 결과를 향상시켰으며, 정하여 놓은 7개 지역으로 한전계통을 분할하여 각 지역에서의 결과를 고찰하였다. 각 지역은 제1지역인 서서울지역, 제2지역인 동서울지역, 제3 지역인 영동지역, 제4지역인 중부지역, 제5지역인 호남지역, 제6지

표 3 가격별 표준편차 오차 공분산 계산시 RTU 및 미터기의 특별조건표

Table 3 Specification of RTUs and Meters Instruments Cost/each Standard Deviation Error Covariance

Instruments	Cost/each [units]	Measurement Error	Standard Deviation
RTU	20
Real Power Meter	1(154Kv) 2(345Kv)	±0.5%	$(0.0025 \times PMW)^2$
Reactive Power Meter	1(154Kv) 2(345Kv)	±0.5%	$(0.0025 \times PMV)^2$
Volt Meter	1	±0.5%	0.625E-05
Line Flow Meter	2	±1%	$(0.005 \times PLN)^2$ or $(0.005 \times QLN)^2$

PMW = 유효전력측정치, PMV = 무효전력측정치
 $PLN = G \times V_i^2 - V_i V_j (G \cos \theta_{ij} + B \sin \theta_{ij})$
 $QLN = -B \times V_i^2 - V_i V_j (G \cos \theta_{ij} - B \sin \theta_{ij})$

역인 북영남지역, 제7지역인 남영남지역이다. 이 결과는 실제통에서 345Kv에 있어서의 필수적인 RTU설치와 전력의 사용이 없이 통과하는 브랜치 모선인 더미모선을 고려하여 줌으로써 실제통 적용이 가능하도록 하였다. 여기에서는 제3지역 32 모선 (영동지역)과 제 5지역 30모선에 대하여 다루고 있으며, 각 샘플 계통에 대한 측정기기의 표준편차(σ)는 각 측정기기 신뢰도의 98.45%로 하고 측정기기의 정확도를 고려하였다. 각 샘플 계통에 대한 프로그램 수행은 IBM-PC 386DX와 IBM-PC AT-Coprocessor에서 포트란 4.1을 사용하여 수행시켰다. IBM-PC 386DX를 사용한 경우 제5 지역 30모선 55선로인 경우 6분 30초가 소요된다.

표 4 더미모선을 고려하지 않은 측정점 선정 결과 비교표(IEEE 6모선)

Table 4 Resulting comparison table of Measurement Set without considering Dummy Buses (IEEE 6 Bus)

	2번째 최종 RTU제거시	1번째 최종 METER제거시
Error Covariance	.1684E-06/.9384E-07	.8383E-06/.9384E-07
Redundance	2.818/4.182	2.636/4.182
Total Cost	154.00/186.00	152.00/186.00

4는 RTU가 제거된 모선, 6는 RTU를 제거할 수 없는 모선,
 2*는 더미모선이므로 RTU를 제거할 수 없으나 제거되었음.

한편 일반계기의 측정오차에 대한 표준편차 σ 계산을 위해서는 통상적으로 사용하고 있는 신뢰도 98.45%를 신뢰도 기준으로 하여 측정기기의 정확도(accuracy)로 부터 표준편차를 계산하여 사용하였다.

RTU와 측정메타들에 관한 사항을 살펴보면 표 3과 같다.

5.1 IEEE 6 모선

여기에서는 6모선 계통에 대하여 상세한 결과를 수록하고 더미모선 고려시 결과를 비교하여 보았다.

- ㄱ) 더미모선을 고려하지 않은 측정점 선정 이론에서의 결과는 표4와 그림 2에 있다.
 - ㄴ) 더미모선을 고려한 측정점 선정 이론에서의 결과는 표5와 그림3에 있다.
- 이에 대한 데이터는 표6과 표7에 있다.

5.2 제 3구역인 영동지역

그림4는 한전계통 영동지역 32모선계통에 대한 계통구성도이며 32모선과 55선로로 구성되어 있

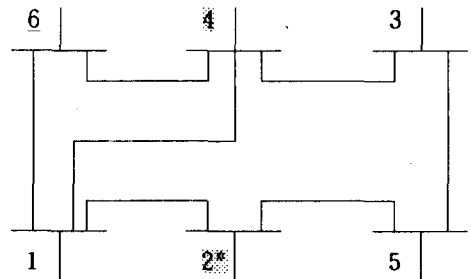


그림 2 더미모선을 고려하지 않은 측정점 선정결과(IEEE 6모선)

Fig. 2 The Measurement Set result without considering Dummy Buses(IEEE 6Bus)

표 5 더미모선을 고려한 측정점 선정 결과 비교표(IEEE 6모선)

Table 5 Resulting comparison table of Measurement Set considering Dummy Buses(IEEE 6Bus)

	2번째 최종 RTU제거시	1번째 최종 METER제거시
Error Covariance	.1684E-06/.9384E-07	.1684E-06/.9384E-07
Redundance	2.636/4.182	2.455/4.182
Total Cost	153.00/186.00	151.00/186.00

4는 RTU가 제거된 모선, 6는 RTU를 제거할 수 없는 모선,
2*는 더미모선이므로 RTU가 제거되지 않음.

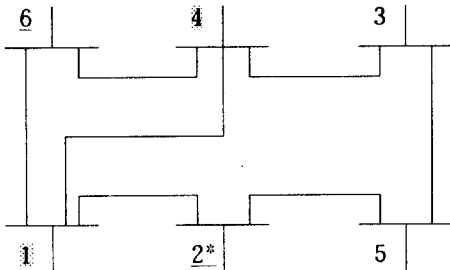


그림 3 더미모선을 고려한 측정점 선정결과 (IEEE 6모선)

Fig. 3 The Measurement Set result considering Dummy Buses(IEEE 6Bus)

표 6 선로데이터(IEEE 6모선)

Table 6 Line Data(IEEE 6Bus)

선로번호	선로 p q 간	선로임피던스 (k+jL; pu)	선로충전 어드 미턴스(y/2; pu)	변압기 탭 비
1	6 4	0.08 0.37	0.007	
2	6 1	0.123 0.518	0.01	
3	5 3	0.723 1.05	0.0	
4	5 2	0.282 0.64	0.0	
5	4 3	0.0 0.133	0.0	0.909
6	4 1	0.097 0.407	0.076	
7	1 2	0.0 0.3	0.0	0.976

다. 이전의 연구에서는 모선간의 선로가 2개 이상의 호선으로 이루어져 있는 경우, 1개 선로로 보아서 수행시키었으나, 본 연구에서는 각각을 1선로로 간주하여 수행한다. 왜냐하면 선로에 측정기기를 설치할 경우 각 호선마다 설치하기 때문에 이를 개선하였다. 또한 345Kv인 경우에는 지역내에서 비중이 높은 모선이기 때문에 RTU를 설치하는 것으로 간주하였고, 더미모선 또한 각 지역

표 7 더미모선을 고려한 모선데이터 (IEEE 6 모선)

Table 7 Buses Data considering Dummy Bus (IEEE 6Bus)

모선번호	전압(V)	상각차(δ)	P(MW)	Q(MVA)
1	0.9058	-12.5114	25.0	2.5
2*	0.8511	-13.0395	0.0*	0.0*
3	0.8307	-13.3805	27.5	6.5
4	0.9310	-9.9184	25.0	11.0
5	1.02	-2.8656	48.2	23.8
6	1.00	0.0	0.0	0.0

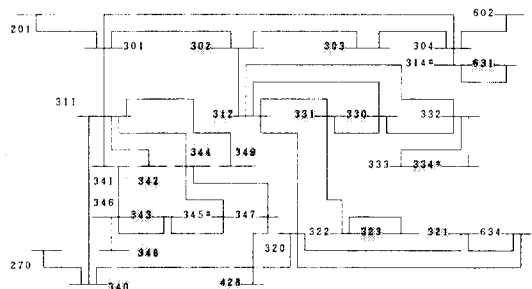


그림 4 제3지역 영동지역(32모선 63선로) 계통도 : 더미모선을 고려하지 않은 경우

Fig. 4 The Third Area of Yeung-Dong Area (32 Bus 63Line) System Diagram : In case of no considering Dummy Bus

마다 고려하였다. 한 모선에는 모든 기기 (RTU, 모선유효, 무효 유입 전력미터, 선로유효·무효 조류미터, 모선 전압 미터)가 설치되어있는 것으로 간주하였고, 우선적으로 RTU제거 단계시에 대한 Error Covariance와 각 지역에 대한 여유도 그리고 기준단위인 [p.u.]에 의한 가격 비교 고찰을 하였다. 제 3지역과 연계된 타지역 모선과 선로에 대하여도 검토하였으며, 이로부터 모선과 선로의

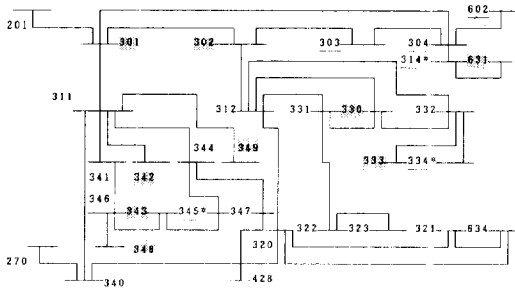


그림 5 제3지역 영동지역(32모선 63선로) 계통도
 Fig. 5 The Third Area of Yeung-Dong Area (32 Bus 63Line) System Diagram : In case of considering Dummy Bus

표 8 더미모선을 고려하지 않은 경우
 (영동지역)

Table 8 In case no considering Dummy Buses
 (Yeung-Dong Area)

	16번째 최종 RTU제거시	실행시간
Error Covariance	.8765E-07/.1966E-07	
Redundance	2.8/5.46	4분 11초
Total Cost	670.00/1104.00	

348는 RTU가 제거된 모선, 303는 RTU를 제거할 수 없는 모선.

334* 더미모선에서 RTU가 제거되었음.

334모선에서 여유도 2.8제한에 걸림.

표 9 더미모선을 고려한 경우(영동지역)

Table 9 In case of considering Dummy Bus(Yeung-Dong Area)

	10번째 최종 RTU 제거시	24번째 최종 meter 제거시
Error Covariance	.2811E-07/.2798E-07	.9382E-07/.2798E-07
Redundance	4.159/5.524	3.397/5.524
Total Cost	894.00/1110.00	845.00/1110.00
실행 시간		합계 : 7분 11초

348는 RTU가 제거된 모선, 303는 RTU를 제거할 수 없는 모선,

345*는 10번째 최종 제거 RTU모선, 346모선 제거시 관측불능

표 10 더미모선을 고려한 경우(호남지역)

Table 10 In case of considering Dummy Bus(Ho-Nam Area)

	12번째 최종 RTU 제거시	20번째 최종 meter 제거시
Error Covariance	.2620E-07/.2553E-07	.3678E-07/.2553E-07
Redundance	3.712/5.254	2.814/5.254
Total Cost	733.00/1016.00	689.00/1016.00
실행 시간		합계 : 6분 31초

523 : 제거된 RTU메타, 501 : RTU를 제거할 수 없는 모선의 경우

543* : 더미모선의 경우, 531모선(계림)에서 관측불능

중요도에 따라서 RTU 또는 각 계기들의 제거를 고려하여 수행하였다. 그림 4와 5의 계통도는 91년 1월을 기준으로 하여 실제 데이터를 기반으로 그려본 계통도이다.

5.3 제 5구역인 호남지역

그림6은 한전계통 제 5지역 30모선계통에 대한 계통에 대한 계통구성도이며 30모선과 50모선으로 구성되어 있다. 한 모선에는 모든 기기(RTU, 모선유효·무효 유입전력미터, 선로유효·무효 조류미터, 모선 전압 미터)가 설치되어 있는 것으로 간주였고, 우선적으로 RTU제거 단계시에

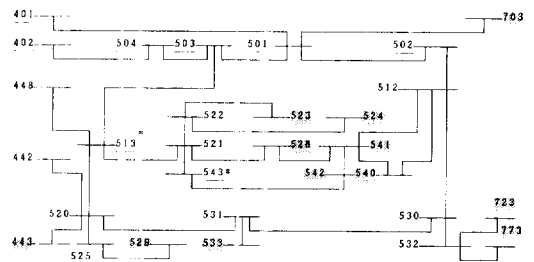


그림 6 제5지역 호남지역(30모선 55선로) 계통도 : 더미모선을 고려한 경우

Fig. 6 The Third Area of Yeung-Dong Area (30 Bus 55Line) System Diagram : In case of considering Dummy Bus

표 11 RTU 제거과정표(호남지역)

Table 11 The processing table of RTU Elimination(Ho-Nam Area)

순서	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
모선번호	443	703	533	542	540	773	541	529	523	524	528	723
명칭	남원	신마산3	충진	여수	호남TP	남해	여천	영광	목포	강진	화순	진주

표 12 메타 제거과정표(호남지역)

Table 12 The processing table of Meter Elimination(Ho-Nam Area)

순서	제거된 메타	명칭	순서	제거된 메타	명칭
1	1 502- >501(1)	여수P3 신남원	11	p 521	남광주
2	1 502- >501(2)	여수P3 신남원	12	1 520- >513(1)	북광주 신광주1
3	1 503- >501(1)	신광주3 신남원	13	1 520- >513(2)	북광주 신광주1
4	1 503- >501(2)	신광주3 신남원	14	1 521- >513(1)	남광주 신광주1
5	p 502	여수P3	15	1 521- >513(2)	남광주 신광주1
6	1 504- >503(1)	영광NP 신광주3	16	p 532	광양
7	1 504- >503(2)	영광NP 신광주3	17	p 531	계림
8	1 503- >513(1)	신광주3 신광주1	18	p 530	선천
9	1 503- >513(2)	신광주3 신광주1	19	p 512	여수TP1
10	1 502- >512(1)	여수P3 여수TP1	20	p 525	하남

(1: 선로메타인 경우 앞의 계기제거, (번호)는 호선을 나타냄, p: 모선유입전력메타)

표 13 최종 측정점 RTU 및 메타후보들(호남지역)

Table 13 The resulting measurements with RTU & meter candidates(Ho-Nam Area)

모선번호	명칭	유효전력메타	선로측정계기가 연결된 곳	전압메타
501	SNNAMWN3	501	502 (1), 502 (2), 503 (1), 503 (2) 703 (1), 703 (2), 401 (1), 401 (2)	501
502	YEOSUTP3	*	* , * , *	502
503	SNKNGJU3	503	504 (1), 504 (2) * , * * , *	503
504	YNGKNGNP	504	541 (1), 541 (2) * , * 402 (1), 402 (2)	504
512	YEOSUTP1	*	502 (1), 530 (1), 530 (2)	512
513	SNKNGJU1	513	503 (1), 503 (2), 520 (1), 520 (2)	*
(더미모선)			521 (1), 521 (2), 448 (1), 448 (2)	
520	BUKKWGJU	520	525 (1), * , * 531(1), 531 (2), 442 (1), 443 (1)	520
521	NAMKWGJU	*	522 (1), 522 (2) * , * 528 (1), 543 (1),	521
522	NA JU	522	521 (1), 521 (2), 523 (1), 523 (2) 524 (1), 524 (2),	522
525	HA NAM	*	520 (1), 529 (1), 529 (2),	525
530	SUNCHEON	*	512 (1), 512 (2), 531 (1), 531 (2) 532 (1), 532(2)	530
531	KYE RIM	*	520 (1), 520 (2), 530 (1), 530 (2)	531

532	KWANGYNG	*	533 (1), 533 (2)	
543	JU AM HP	543	530 (1), 530 (2), 723 (1), 773 (1)	532
(더미모션)			521 (1), 542 (1),	*
401	SNOKCHN3	401	501 (1), 501 (2)	401
402	CHNGYNG3	402	504 (1), 504 (2)	402
442	JEONGJU	442	520 (1)	442
448	NAM WON	448	513 (1), 513 (2)	448

* : 측정메타가 제거된 곳, ()는 호선을 나타냄.

적용결과 2개의 더미모션 (DUMMY BUS)을 확인하고 전압메타 설치대상에서 제외하였다.

대한 Error covariance와 각 지역에 대한 여유도 그리고 기준단위인 [p.u.]에 의한 가격 비교 고찰을 하였다. 제 5지역과 연계된 타지역 모션과 선로에 대하여도 검토하였으며, 이로부터 모션과 선로의 중요도에 따라서 RTU 또는 각 계기들의 제거를 고려하여 수행하였다. 이 결과는 표11~표13에 수록하였다.

분산오차에 의하여 제어할 수 있도록 하였으며 계기측정 정확도, 설치비등이 실제값으로 정확히 반영될 수 있도록 하였다.

(5) 개발된 전산 프로그램은 개인용 컴퓨터에 의한 실계통 해석이 가능하며 기억용량 절감을 실현하였고 사용자의 편의성을 크게 향상시켰다.

6. 결 론

참 고 문 헌

본 연구에서는 전력계통 송전선의 T-브랜치와 같은 더미모션(dummy bus)에는 측정계기의 설치가 불가능하므로 이러한 더미모션의 영향을 정확히 반영할 수 있는 측정점 선정 알고리즘을 제시하였다. 그 내용은 다음과 같다.

- (1) 더미모션(Dummy Bus)을 고려하여 측정점 선정 알고리즘을 개선함으로써, 실계통에서 향상된 결과를 얻었다.
- (2) Sparsity 기법과 변수처리등으로 통하여 메모리를 줄임으로써 프로그램을 P/C 모듈화 하고 P/C에 의한 실계통 해석이 가능하도록 하였다.
- (3) PSS/E 조류계산 데이터로 부터 얻은 데이터를 연계 방식에 의하여 측정점선정 프로그램 수행에 직접 사용이 가능하도록 하였다.
- (4) 측정점 선정 프로그램은 측정여유도 및 공

- [1] Y.H. Moon and Y.M. Park et. al., "Design of Reliable Measurement Systme for State Estimation," IEEE Trans. on PS, Vol. 3, No. 3, pp. 830~836, August 1988.
- [2] Y.H. Moon and Y.M. Park et. al., "Optimal Measurement System Design for State Estimation", IFAC Symposium PS, M&CA, Brussels, pp. 17.5.1~17.5.6, September 1988.
- [3] F.F. Wu et. al., "Detection of Topology Errors by State Estimation," IEEE-Trans. on PS, Vol. 4, No. 1, pp. 176~183, February 1989.
- [4] 한전기술연구원, "90계통운용분석보고서," pp. 171~193, 1990.6.
- [5] 한전기술연구원, "전력계통 상태추정을 위한 측정점 선정에 관한 연구," 1987.3.