

DUMMY 모선을 고려한 상태추정 측정점선정 알고리즘에 관한 연구

이 태식*
연세대학교

문 영현*
연세대 교수

함완균**
한전기술연구원

권 태원***
한전기술연구원

A Study on Measurement Selection Algorithm for Power System State Estimation under the consideration of Dummy Buses

Tae-Shik Lee*
Yonsei University

Young-Hyun Moon*
Yonsei Univ.Prof.

W.K. Ham**
KEPCO Research Center

T.W.Kwon***
KEPCO R.C.

Abstract

This paper presents an improved algorithm of optimal measurement system design with a reliability evaluation method for 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.

본 연구에서는 이러한 더미모선 영향을 고려하기 위하여 더미모선에는 RTU를 설치할 수 없으나 유효·무효모선주입전력은 정확히 측정될 수 있는 것으로 간주하였으며 공분산이 영인 경우는 상태변수 공분산 수정공식에서 수치계산이 수행되지 못하므로 10⁻²⁰정도 적은 값으로 처리하여 기존의 공분산 수정공식을 적용할 수 있도록 하였다. 개발된 전산프로그램에서는 행렬의 스파시티(Sparsity)를 고려함으로써 1차원 배열을 통한 메모리 절감과 계산시간 단축을 기할 수 있으며 MUST-RTU개념을 도입하여 알고리즘에 반영시킴으로써 반복계산횟수를 대폭 절감시켰다. 한편 제시된 전산프로그램에 대하여 P/C 모듈로 개발함으로써 프로그램의 활용성과 편의성을 크게 향상시켰으며, PSS/E 조류 계산 데이터 패키지와 간접적으로 연계가 가능하도록 하였고, 이에 따라 별도의 데이터 작업없이 프로그램 수행이 가능하게 함으로써 작업 능력을 향상시켰다.

1. 서론

본 연구는 전력계통 상태추정을 위한 측정점 선정 알고리즘의 개선에 관한 연구로서, 전력계통송전선의 T-브랜치와 같은 더미모선(Dummy Bus)에서는 측정계의 설치가 불가능하므로 이러한 더미모선의 영향을 정확히 반영할 수 있는 측정점 선정 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[5]등이 상태추정에서 더미모선의 영향을 고려함으로써 더욱 정확한 상태추정을 기할 수 있음을 발표한 후에 상태추정에서도 더미모선을 고려하는 것이 일반화 되었으며 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 매우정확한 측정치로 간주될 수 있으며 이러한 측정치의 영향을 측정점 선정 알고리즘에 반영시켜야만 한다.

2. 측정점 선정이론

측정점 이론에 대한 이전의 연구[1,2]를 요약하면 다음과 같다.

측정계통 :

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

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

z : m차원 측정벡터

x : n차원 측정벡터

v : m차원 잡음벡터

$h(x)$: m차원 측정 함수

R : (m x m) 잡음 공분산 행렬

m : 측정치의 수

n : 상태변수의 수

상태추정오차(SEE) 공분산 행렬 :

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

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

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

단, x_0 : 운전상태

\hat{x} : 추정된 상태

SEE 공분산 행렬[P]의 변형을 위한 반복적인 공식 :

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

단, 측정치의 제거시

상태추정오차 :

$$e = E[(x-\hat{x})(x-\hat{x})^T] = \text{trace } P \quad (4)$$

측정 계통의 평가함수

$$\begin{aligned} J &= E[(y-\hat{y})^T W (y-\hat{y})] \\ &= E[\text{trace}(GPC^T)] \\ &= \sum_{E_k \in O} \text{Prob}[E_k] \text{Trace}(GP_{E_k}^T G^T) \end{aligned} \quad (5)$$

where W : 하중행렬

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

E_k : 측정계기/측정계기계통의 결손

O : 모든 결손의 집합

$P_{E_k} = [(H_{E_k})^T P_{E_k}^{-1} H_{E_k}]^{-1}$: E_k 결손시 SEE 공분산 행렬

Prob(E_k) : E_k 결손시 확률

H_{E_k}, R_{E_k} : 결손 E_k 발생시 이용가능 측정치에 대한

측정치 방정식의 자코비안 행렬 및 측정 오차 공분산 행렬

측정값도 사용시, RTU가 모든 모선에 설치되어 있다고 가정함으로써 최적추정우보를 선정하는 알고리즘이 개발되어져 있다.

- a) 연속적인 RTU 제거 알고리즘
- b) 연속적인 Meter 제거 알고리즘
- c) 결합 알고리즘

또한, 지역별 데이터 선정 알고리즘이 개발되었다.

3. 측정점 선정 알고리즘 개선

(1) 개요

본 연구는 측정점 선정 알고리즘상에서 미비하였던 부분인, 더미모선(Dummy Bus)의 판별을 가능하게 하여 보다 정확한 측정점 선정우보들을 가려내기 위함이다. 더미모선이란, 전력계통 송전선의 T-브랜치와 같은 모선으로서, 측정계기의 설치가 불가능하며; 계통의 더미모선에 유일하여진 모선-유효전력의 합은 이 모선에서 전송한 모선 유효-무효전력의 합과 같으므로, 오차 공분산이 0인 매우 정확한 측정치로 간주될 수 있으므로, 이러한 측정치의 영향을 줄이

도록 개선하여 알고리즘을 구성하였다. 한편 일반계기의 측정오차에 대한 표준편차 σ 계산을 위해서는 통상적으로 사용하고 있는 신뢰도 95.45%를 신뢰도 기준으로 하여 측정계기의 정확도(accuracy)로부터 표준편차를 계산하여 사용하였다.

RTU와 측정메타들에 관한 사항을 살펴보면 표1 과 같다.

표1. Specification of RTUs and Meters
Instruments Cost/each Standard Deviation Error Covariance
[Units] of Measurement Error[σ] [k]

Instruments	Cost/each [units]	Standard deviation of measurement error [k]	Fault Probability
RTU	20	-	-
Real Power Meter	1(154Kv) 2(345Kv)	± 2	$(0.0025 \times PMW)^2$
Reactive Power Meter	1(154Kv) 2(345Kv)	± 2	$(0.0025 \times PMV)^2$
Volt Meter	1	± 2	0.625E-05
Line Flow Meter	2	± 2	$(0.005 \times PLN)^2$ 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 = $-B \times V_i^2 - V_i V_j (G \cos \theta_{ij} - B \sin \theta_{ij})$

계통의 더미모선에서는 측정계기설비가 불가능하지만, 모선 주입 유효-무효 전력은 항상 정확히 영이 되며, 더미모선 판정에 있어서 계통의 345kV급 모선은 RTU의 설치가 필수적이기 때문에, 154kV급인 경우의 모선에 대하여 모선주입 유효-무효전력의 측정치가 0인 경우 이를 더미모선으로 간주한다.

이와 같은 경우에는 RTU를 설치할 수 없으나 모선 주입 유효-무효전력은 항상 정확히 측정될 수 있는 것으로 간주하고, 고장가능성을 반영한 오차공분산 계산시 상태변수 공분산 수정공식에서 수치계산을 할 수 없으므로 모선주입 유효-무효 측정치 결손확률 Prob[E_k']의 값을 0.1 E-20이하로 하여 공분산 수정공식에 적용하게 하였다.

측정계기의 평가함수는 식(5)로부터

$$\begin{aligned} J &= \sum_{E_k \in O} \text{Prob}[E_k] \text{Trace}(GP_{E_k}^T G^T) \\ &= \sum_{E_k \in O} \text{Prob}[E_k'] \text{Trace}(GP_{E_k}^T G^T) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, E_k' 계산시, 모선주입 유효-무효 전력 측정치의 결손 가능성은,

$$\text{Prob}[E_k'] = (0.0025 \times PMW)^2 \text{ 또는 } (0.0025 \times PMV)^2$$

이다. 여기서 만일 더미모선인 경우에는 PMW = PMV = 0 이므로, E_k' 는 영이 되며, 따라서 평가함수 (J)는 영이되어 정확한 측정치로 간주된다. 이 경우에, E_k' 의 값을 0.1 E-20으로

함으로써 평가합수(J)를 계산할 때 더미모선을 고려하였다.

기존의 알고리즘은 구성에 있어서 개발된 이론을 증명하고 대형모듈에서 실용화 할 수 있도록 만들어져서, 2차원 프로그램을 대형(IBM등) 또는 중형 컴퓨터(PDP11등)에서 한건(KEPCO)의 계통을 3개의 지역으로 분할하여 측정하는데 사용되었다. 알고리즘의 P/C 모듈화를 위한 기억용량의 문제에 대하여, 행렬의 스파시티(Sparsity)를 고려하여 1차원 배열로 프로그램을 재배열함으로써 메모리를 절감할 수 있었다. 단일 프로그램을 4개의 프로그램(입력 데이터 형성, 자코비안 행렬 구성, RTU 및 메타제거와 후모데타 결정, 실용화된 출력)으로 분리함으로써 메모리를 보다 효율적으로 사용할 수 있게 되었다. 이는 다시급 배치(BATCH)화일로 묶어 놓음으로서 단일 프로그램과 같은 느낌이 들도록 하였다.

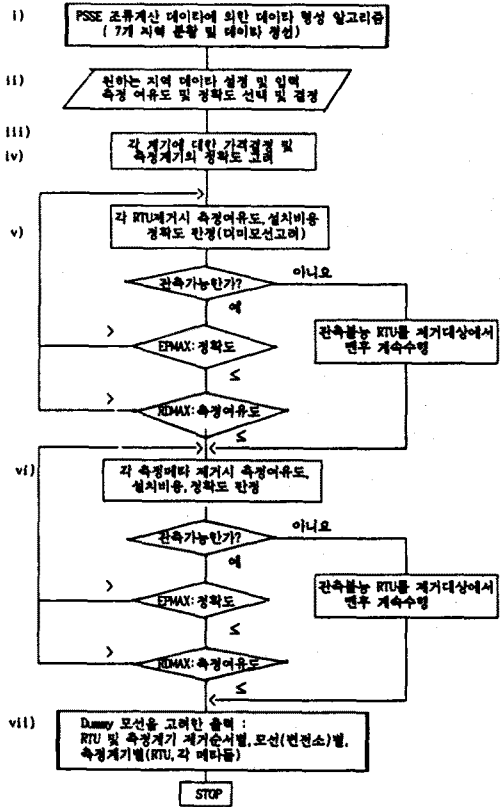
PSS/E 조류계산 데이터 락키지와 간접적으로 연계하여, 데이터를 한건의 분류기준인 7개지역과 동일하게 입력할 수 있도록 하였고, 또한 필요시에는 2 - 7 지역을 연계하여 사용할 수 있도록 되어 있다.

2) 알고리즘

- i) 입력을 PSS/E 조류계산 데이터로부터 받아들이는 지역별도 구분하여 데이터를 분류하고 입력데이터를 자동적으로 생성한다.
- ii) 측정 여유도 및 정확도를 입력한다.
- iii) 각 계기에 대한 가격 결정 및 측정계기의 정확도에 의거 오차공분산을 계산한다.
- iv) 행렬의 스파시티(Sparsity)를 고려하여 1차원으로 Ybus와 자코비안 행렬을 구성함으로써 메모리를 절감한다.
- v) RTU 제거단계로서, COST를 고려한 RTU 감도계산을 하여, 최저감도 RTU를 제거하고, 감도가 ∞인 경우 MUST-RTU로 고정한다.
- vi) METER 제거단계로서, COST를 고려한 METER 감도계산을 하여, 최저감도 METER를 제거한다.
- vii) RTU 및 측정계기 제거순서별, 모선(변전소)별, 측정계기별(RTU, 각 메타들)도 출력하여 설계용에 적용 가능도가 판단한다.

3) P/C 모듈 개발

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 IBUS를 개발하여 사용하였다. 기억용량의 감소를 위하여 다음 규칙을 적용하였다.



흐름도1. 측정점 선정 순서도

경리1) Ybus행렬 구성시 2차원 배열은 (모선수 X 모선수)의 수만큼 메모리가 필요하다. 1차원 배열은 (모선수 X 모선수)의 메모리가 사용되고, 행과 열을 기억하기 위하여 2 X (모선수 + 선로수)가 필요하다.

증명) 1차원 및 2차원 배열을 비교하면 다음과 같다.

	6모선7선로	80모선100선로	300모선356선로(원계통)
1차원	39	540	1,968
2차원	42	8,000	106,800
기억용량 사용율	92.8 %	6.75 %	1.84 %

표 2. Ybus 행렬 구성시 1차원과 2차원 배열 비교

정리2) 자료비안 행렬은 2개부분인 Hp(유효측정치), Hqv(무효 및 전압축정치)로 구성되며 2차원 배열은,

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

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

의 메모리가 필요하며 1차원 배열은 다음과 같은 메모리가 필요하다.

$$H_p : A+B+C = (\text{모선수}+\text{선로수} \times 2) + (\text{선로수} \times 2) + (\text{선로수} \times 2) \\ = \text{모선수} + \text{선로수} \times 6$$

$$H_{qv} : A+B+C+D = (\text{모선수} + \text{선로수} \times 2) + (\text{선로수} \times 2) + (\text{선로수} \times 2) + (\text{모선수}) \\ = \text{모선수} \times 2 + \text{선로수} \times 6$$

단, 행과 열을 기억하기 위하여 Hqv X 2 의 메모리가 필요하고,

$$H_p = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad H_{qv} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} \quad (\text{총 메모리는 } H_p + 3 \times H_{qv})$$

이다.

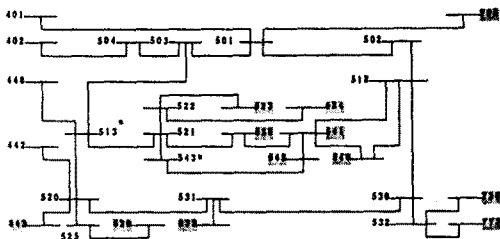
	6모선7선로	80모선100선로	300모선 356선로(전계통)
1차원	48+162=210	680+2280=2960	2436+8208=10,644
2차원	120+156 = 276	22400+28800 = 51200	303,600+393,600 = 697,200
기억용량사용률대비	76.1 %	5.8 %	1.5 %

표3. 자료비안 행렬 구성시 1차원과 2차원 배열 비교

Ybus행렬과 자료비안 행렬의 내부구조를 파악하여 Rule Base를 정함으로써 메모리를 절감할 수 있게 되었다.

4. 적용사례

30모선 55선로(한전시스템: 계 5 지역인 호남지역)에 적용하여 보았다.



※ : 계가된 RTU 배리, * : 더미모선(DUMMY BUS) 그림 1. 30모선 55선로도(한전계통: 계 5 지역인 호남지역)

측정여유도 : 2.8136/5.254 (제한치 2.8, 풍모치/서리치)
J_{av} : .36781E-07, 2553E-07
설치비용 : 689 / 1016

표 4. RTU 계가과정

순서	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
모선번호	443	703	533	542	540	773	541	529	523	528	528	723	531
명칭	남선	신미선3	송진	여수	모양77	남미	여진	명랑	목포	장진	회산	권주	계림(전축용량)

표 5. 배리 계가과정(1: 선로배리인 경우 배리 계가계기, (번호)는 모선을 나타냄 p: 모선유입전력배리,)

순서	1	2	3	4	5	6	
계가된 배리	1 502->501(1)	1 502->501(2)	1 503->501(1)	1 503->501(2)	p 502	1 504->503(1)	
명칭	여수P3 신남선	여수P3 신남선	신장부3신남선	신장부3신남선	여수P3	명랑P 신장부3	
7	8	9	10	11	12		
1 504->503(2)	1 503->513(1)	1 503->513(2)	1 502->512(1)	p 521	1 520->513(1)		
명랑P 신장부3	신장부3 신장부1	신장부3 신장부1	여수P3 여수P1	남장부	목장부 신장부1		
13	14	15	16	17	18	19	20
1 520->513(2)	1 521->513(1)	1 521->513(2)	p 532	p 531	p 530	p 512	p535
목장부 신장부1	남장부 신장부1	남장부 신장부1	정남	계림	신선	여수P1	여남

표 6. 최종 측정점 RTU 및 배리주소

모선번호	명칭	유효전력배리	선로측정계기가 연결된 곳	전압배리
501	SANAMPH3	501	502 (1), 502 (2), 503 (1), 503 (2) 703 (1), 703 (2), 401 (1), 401 (2)	501
502	YEOSUTP3	*	*	502
503	SNKNGJUS	503	504 (1), 504 (2)	503
504	YNGKNGHP	504	541 (1), 541 (2) * 402 (1), 402 (2)	504
512	YEOSUTP1	*	502 (1), 530 (1), 530 (2), 503 (1), 503 (2), 520 (1), 520 (2)	512
513 (더미모선)	SNKNGJUS	513	521 (1), 521 (2), 448 (1), 448 (2)	*
520	BUKKNGJU	520	525 (1) * 531 (1), 531 (2), 442 (1), 443 (1)	520
521	NAMKNGJU	*	522 (1), 522 (2) * 528 (1), 543 (1)	521
522	NA JU	522	521 (1), 521 (2), 823 (1), 823 (2) 524 (1), 524 (2)	522
525	HA NHA	*	520 (1), 529 (1), 529 (2), 512 (1), 512 (2), 531 (1), 531 (2)	525
530	SUNCHEDM	*	532 (1), 532 (2) 529 (1), 529 (2), 530 (1), 530 (2)	530
531	KYE RIM	*	533 (1), 533 (2) 530 (1), 530 (2), 723 (1), 773 (1)	531
532	KRANGYNG	*	530 (1), 530 (2), 723 (1), 773 (1)	532
543 (더미모선)	JU AM HP	543	521 (1), 542 (1),	*
401	SNKCHNG	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

* : 측정배리가 계가된 곳, ()는 모선을 나타냄.

적용결과 2개의 더미모선 (DUMMY BUS)을 확인하고 전압배리 설치대상에서 제외하였다.

5. 결론

본 연구에서는 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 더미모선(Dummy Bus)을 고려하여 측정점 선정 알고리즘을 개선함으로써, 실제계통에서 향상된 결과를 얻었다.
- (2) Sparsity기법과 변수처리등을 통하여 메모리를 줄임으로써 프로그램을 P/C 모듈화 하고 실제계통에 적용하였다.
- (3) PSS/E 조류계산 데이터로 부터 얻은 데이터를 그대로 프로그램에 연계하여 줌으로써 입-출력에 대하여 간단을 하고 연구에 반영할 수 있도록 하였다.
- (4) 측정여유도 및 풍문산오차에 의하여 제한을 둘 수 있도록 하였고 설치비용을 제시하였다.

개발된 전산 프로그램은 개인용 컴퓨터에서의 실용성 및 실계통 적용에 의한 계속적인 연구수행의 편리성에 역점을 두었다.

6. 참고문헌

- [1] Y.H.Moon and Y.M.Park et. al., "Design of Reliable Measurement System for State Estimation", IEEE Trans. on PS, Vol. 3, No. 3, pp830-836, 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, pp17. 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, pp176-183, February 1989
- [4] 한전기술연구원, "90계통운용분석보고서", pp171 - 193, 1990. 6
- [5] 한전기술연구원, "전력계통 상태추정을 위한 측정점 선정에 관한 연구", 1987. 3