

Optimal Placement of the Phasor Measurement Units in Power System

金載勳* · 曁基善** · 金會喆** · 愼重麟***

(Jae-Hoon Kim · Ki-Seon Cho · Hoi-Chul Kim · Joong-Rin Shin)

Abstract - This paper presents optimal placement of minimal set of Phasor Measurement Units (PMU's) and observability analysis of the network with PMU's. In order to find a observable system, a symbolic method which directly assigns an appropriate symbol for measurement or pseudo-measurement to every entry of node-branch incidence matrix is proposed. It is much simpler and easier to analyze the observability of the network with PMU's than the conventional ones. For the optimal PMU placement problem, two approaches which are based on a modified Simulated-Annealing (SA) method and a Direct Combination method are proposed. Some case studies with IEEE sample system are made to show the performance of the proposed methods are almost alike and more effective than the conventional simulated-annealing method. It is also shown that the Direct Combination method is more effective than the modified simulated-annealing one in the sense of computation burden. The results of this study showed also that the accuracy of power system estimation and system observability can be improved the proposed PMU placements.

Key Words : Phasor Measurement Unit (PMU), optimal meter placement, Simulated-Annealing method, Direct Combination method, observability analysis

1. 서 론

전력계통 운전 및 제어의 정밀성을 향상시키기 위하여는 전력계통의 제반 상태값(state vector)에 대한 감시·측정의 정밀성 향상이 우선되어야 한다. 최근 전력계통의 정밀한 상태값을 확보하려는 노력의 하나로 GPS(Global Positioning System)의 동기화기능을 이용하여 전력 모선의 페이저값을 측정하는 페이저측정장치(Phasor Measurement Unit : PMU)의 활용방안이 모색되고 있다. GPS를 이용한 PMU는 측정위치의 전압페이저와 모든 전류페이저를 매우 정밀하게 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다[1,2,Appendix]. 전력계통의 여러 모선 중에서 적절한 수 만큼의 PMU를 적절한 위치의 모선에 설치하여 PMU가 설치된 각 모선의 페이저 값을 정밀한 동기성(synchronization)아래 측정할 수 있으면, 기존의 상태추정 시스템의 측정오차와 추정오차를 무시할 수 있을 만큼의 정밀한 실시간 전력계통 상태추정(power system state estimation)이 가능하게 되며 따라서 전력계통 감시·제어의 신뢰성을 높일 수 있다[1-3].

대규모 전력계통에서 허용된 정밀도 범위 내에서 각 모선의 상태값을 추정하기 위하여는 PMU의 최소 개수와 최적 배치에 관한 연구를 통해서 경제적인 측정시스템의 구성이 요구된다. 또한 PMU가 시설되어 있지 않은 모선의 상태벡터

는 측정데이터를 이용한 추정기법을 사용하여 추정하게 되는데, 이때 반드시 가관측성(observability)이 보장되어야 하기 때문에, PMU시설에 따른 가관측성 해석에 관한 검토가 선행되어야 한다. 기존 측정시스템의 경우 계통구성(system topology)과 측정시스템의 계수(rank)를 이용하여 가관측성을 해석하였다[5,6]. PMU만으로 구성된 측정시스템은 다른 측정시스템에 비해서 하나의 PMU로 얻을 수 있는 측정치가 많기 때문에(PMU가 시설된 모선의 전압과 연결된 모든 지로의 전류페이저), 가관측성이 보장되는 확률이 커지고 측정기의 개수 또한 줄일 수 있는 장점이 있다[2-4].

PMU 최적배치에 관한 연구는 1993년에 Baldwin등에 의해서 보고된 바 있다[4]. Baldwin이 제시한 최적배치 알고리즘은 SA(Simulated Annealing)기법을 기반으로 한 것으로서 대규모 전력계통에 적용할 경우 과도한 계산량이 요구되며, 한 개의 PMU 고장으로 측정시스템의 가관측성이 쉽게 무너질 수 있어 견실성(robustness) 면에서 미흡한 측정시스템이라 할 수 있다. 본 논문에서는 대규모 전력계통에 적용할 경우 요구되는 계산시간을 크게 줄일 수 있으며 또한 PMU 1기 고장(single contingency)에 대해서 대처할 수 있는 견실한 측정시스템 설계를 위한 PMU 최적 배치 알고리즘을 연구하였다. 이를 위하여 먼저 측정시스템의 가관측성 판정 알고리즘을 구성하였으며, 이를 기초로 가관측성을 보장하는 PMU의 최소 개수와 그 위치, 즉 PMU의 최적배치 알고리즘을 개발하였다. 최적배치 알고리즘으로서 (1) SA기법을 기반으로 가관측성과 계산량을 개선하는 방법과 (2) 직접 조합 계산법에 의한 방법을 제안하여 이 두 가지 방법의 성능을 비교하였다.

또한 최적배치 알고리즘을 기반으로 제시되는 측정시스템의 견실성 검토를 위하여 PMU 1기 고장에 따른 파급효과의

* 準 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 碩士課程
 ** 正 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 博士課程
 *** 正 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 接受日字 : 1999年 10月 22日
 最終完了 : 2000年 6月 5日

분석 기법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성 검증은 위하여 표본계통을 선정하여 사례연구를 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 경제성 및 신뢰성을 보장하는 PMU 측정시스템 구성의 예를 제시하였다.

2. 전력계통 가관측성 해석

전력계통의 가관측성 해석은 측정치 집합에 대한 자코비안 행렬과 밀접한 관련이 있기 때문에 이들 측정치로 구성된 자코비안 행렬의 계수를 통해서 직접 계산하는 방법과 전력계통의 토폴로지를 이용한 그래프기반 접근방법으로 크게 대별된다[5,6]. 전자에서는 측정치 집합의 자코비안 행렬이 최대계수(full rank)를 가지고, 이 행렬이 악조건(ill-condition)을 갖지 않는다면 시스템은 수학적으로 관측 가능하다는 것이고, 후자에서는 위상수학적 가관측성(topological observability) 이론으로 적어도 하나의 최대계수를 갖는 전장 측정 트리(spanning measurement tree)의 존재 여부로 가관측성을 정의한다[4].

본 연구에서와 같이 PMU를 이용하는 측정시스템의 경우는 PMU가 설치된 모선의 전압 페이지 및 이 모선과 연결된 모든 지로(branch)의 전류 페이지를 매우 정밀하게 알 수 있기 때문에, 가관측성 해석은 기존 측정시스템의 가관측성 해석에 비해서 훨씬 간단하고 명확하다. PMU 측정시스템의 가관측성은 오음의 범칙과 키르히호프의 전류법칙(KCL)에 의해서 결정된다. 전압 페이지를 알고 있는 모선에 인접한 모선의 전압 페이지는 오음의 범칙을 이용하여 결정 가능하고, 미지의 지로전류도 역시 오음의 범칙이나 KCL을 이용하여 얻을 수 있다. GPS 수신기를 탑재한 PMU로 구성된 측정시스템은 정밀한 시각동기가 가능하므로 측정오차가 작을 뿐만 아니라, 위 2가지 범칙만으로도 가관측성이 결정되므로 가관측성 판별에 많은 시간을 요하지 않는다. 미지의 상태벡터 값이 오음의 범칙과 KCL을 이용하여 산술적으로 계산되기 때문에 추정과정의 오차가 개입되지 않는다.

본 연구에서는 이러한 측정시스템의 가관측성 판별에 있어

서 PMU가 갖는 특성을 응용코자 전력계통의 토폴로지를 이용한 그래프 기반 접근방법을 시도하였다. 즉, 전력계통의 모선-지로의 연결정보를 반영한(연결상태는 1로 설정) 절점-지로 접속행렬(node-branch incidence matrix, [모선×지로])을 구성하고 이 접속행렬의 각 원소에 측정치의 종류에 따른 적절한 기호를 도입하여 할당하는 방법을 통하여 가관측성을 판별하였다.

본 논문에서 도입한 기호법을 요약하면 다음과 같다. 아래 사용한 기호의 선택은 프로그래밍 상의 편의를 위한 것이다.

- ① 접속행렬의 원소 중 PMU가 설치된 모선(또는 절점)에 해당하는 행(row)의 모든 '1'의 요소값에 '측정치 지로'임을 표시하는 기호 '15'를 할당한다. 이는 PMU가 설치된 모선에 연결된 모든 지로의 전류 페이지는 측정되는 것이기 때문이다.
- ② PMU 설치모선에 인접한 모선은 접속행렬의 해당 열의 '1'의 요소값에는 '의사측정치(pseudo-measurement) 모선'임을 나타내는 기호 '20'을 할당한다. 이는 한 모선의 전압페이지를 알고 연결선로의 전류페이지를 알고 있으므로 반대편 모선의 전압페이지는 오음의 범칙에 따라 결정할 수 있기 때문이다.
- ③ 지로 중에서 양쪽 모선에 측정치 또는 의사측정치가 할당된 지로의 전류는 수리적으로 결정할 수 있으므로 접속행렬의 양쪽모선에 해당하는 열의 '1'의 요소값에 '의사측정치 지로'임을 나타내는 기호 '30'을 할당한다.
- ④ 단순 연계모선 즉, 유입전력이 '0'인 모선(zero injection bus)에 연결된 지로 중 한 지로를 제외한 나머지 지로가 측정치 또는 의사측정치로 할당된 경우 KCL에 의해 미지의 지로 전류를 결정할 수 있기 때문에 해당 열의 '1'의 요소값에 'KCL에 의한 의사측정치 지로'임을 나타내는 기호 '40'을 할당한다.

표1은 본 논문에서 사용한 기호법의 예를 보이기 위하여, 그림8에 주어진 IEEE 14모선 표본계통[8]에 대한 기호를 할당한 후의 접속행렬을 나타낸 것이다.

표 1 기호가 할당된 후의 접속행렬
Table 1 Node-branch incidence matrix with assigned symbols

Node	Branch																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	20	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
②	15	15	15	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	20	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	20	0	0	30	30	0	0	0	30	20	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	20	0	0	30	30	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	15	15	15	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	20	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	15	0	0	0	0	15	0	0	15
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	20	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	30	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	30	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	30	30	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	20

○ 는 PMU가 설치된 모선임

본 연구에서 접속행렬에 모든 측정치와 의사측정치 기호를 할당한 후에도 접속행렬 내에 여전히 '1'인 상태로 남아있는 '행'이나 '열'이 존재하면 그 열에 해당하는 지로를 기점(행에 대해서는 그 모선을 기점)으로 계통이 관측 불가능하다고 판정한다. 물론 접속행렬의 요소 중 '1'이 남아 있는 경우 중에도 가관측성이 보장되는 경우가 있을 수 있겠지만, 그 경우에는 별도의 상태추정 알고리즘을 필요로 하므로 계산시간이 많이 소요되어 실시간을 맞추기 어려울 뿐만아니라 추정오차 때문에 정밀성 또한 유지하기 어렵다. 본 논문에서 사용한 가관측성 판정법은 비록 PMU의 최소 개수를 결정할 때 약간의 오차요인이 있을 수 있겠으나 '실시간성' 또는 '운전제어의 정밀성'을 전제로 하는 관점에서는 크게 문제시되지 않을 것으로 생각된다. 다시말하면, 본 논문에서는 '실시간성' 및 '운전제어의 정밀성'에 중점을 두어 앞에서와 같이 오음의 법칙이나 KCL만으로 계산이 가능한 경우에만 가관측성이 보장된다는 전제하에 최소의 PMU 개수와 최적배치를 구하는 데 주안점을 두었다. 이러한 전제하에서라면, 위에 보인 예의 경우, '1'인 상태로 남아 있는 요소가 없기 때문에 관측 가능한 계통이 되는 것이며, 이러한 접근을 통해서 관측 불가능한 모선과 지로 정보 그리고 관측 가능 지역의 식별이 가능하다. 또한 이 정보를 이용하면 다음에 설명하는 PMU 최적배치를 위한 탐색공간(search space)을 쉽게 설정할 수 있다.

3. 페이지 측정기 최적 배치

3.1 문제의 정식화

앞에서 설명한 것처럼 GPS를 이용한 PMU측정시스템의 경우는 측정오차가 작을 뿐만 아니라, 미지의 상태벡터 값이 오음의 법칙과 KCL을 이용하여 산술적으로 계산되기 때문에 추정과정의 오차가 개입되지 않으므로, 목적함수에 추정오차항을 두는 것은 무의미하다. 따라서 계통의 가관측성을 보장하는 최소의 PMU 배치집합(최소 PMU 개수와 최적의 위치)을 얻기 위해서 목적함수는 '관측 불가능 모선을 최소로 하는 PMU의 최소 개수'로서 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f = \min_p \left\{ \min_S g(p, S) \right\} \quad (1)$$

여기서, $g(p, S)$: 관측가능 하지 않은 모선의 수
 p : PMU의 수
 S : $S \in$ (임의의 p 개 배치집합 영역)
 인 PMU의 배치 집합

식(1)의 $g(p, S)$ 는 앞에서 설명한 기호법에 따라 전력계통의 절점-지로 접속행렬을 측정치의 종류에 따라 해당되는 기호를 할당하여 갱신한 후 관측 가능하지 않은 모선의 수를 산정한 값을 나타낸다. 즉, 어떤 PMU의 배치집합 S 에 대하여 기호법에 따라 기호를 할당한 후, 접속행렬의 각 행을 조사하여 특정 행의 모든 원소가 여전히 '1'인 상태로 남아있는 경우 해당 모선은 관측이 불가능한 것으로 판정하는 것이므로, 이러한 관측 불가능한 모선의 전체 개수를 $g(p, S)$ 로 표시하는 것이다.

3.2 배치 집합 선정

초기 배치 집합 선정은 PMU의 설치에 따른 효과를 극대화하기 위해 지로 수가 많은 모선에서부터 순차적으로 PMU를 설치하여 계통의 가관측성이 보장되는 배치집합에 이를 때까지 계속한다. 이렇게 얻어지는 '가관측성이 보장되는 배치집합'은 PMU 최적배치 문제에 대한 하나의 초기 해가 될 수 있으며, 또한 이 초기 배치집합은 계통의 가관측성을 보장하기 위해 PMU 개수에 제한 없이 시설하기 때문에, 가관측성이 보장되는 PMU의 최적 개수는 이 때의 PMU 개수보다는 크지 않을 것이다. 전력계통의 특성으로 볼 때 일반적으로 가관측성을 보장하는 새로운 해는 이전 해의 근처에 있을 확률이 크기 때문에 최적배치 탐색을 위한 새로운 해는 적당한 규칙에 의해서 선정할 수 있다[4]. 기존의 SA 접근방법에서는 경험적으로 이전 해의 85%내지는 95%의 PMU 개수로 새로운 시험배치집합을 구성하였으나, 본 논문에서는 다수의 PMU로 구성된 초기배치집합에서는 큰 폭으로 그 수를 감소시키고, 최소의 PMU에 가까워질 수록 그 수를 소폭으로 감소시켜 수렴특성을 개선하고자 식(2)와 같은 수정이분법(modified bisection method)에 의해서 시험배치집합을 구성하는 PMU 개수를 산정하였다.

$$PMU \text{ 개수} = \text{최대정수}[\text{Mean}(\text{Mid}(\text{상한}, \text{하한}), \text{상한})] \quad (2)$$

여기서 상한은 이전 배치집합을 구성하기 위한 PMU 개수를 의미하며 하한은 0으로 설정하였다.

3.3 SA기법에 의한 PMU 최적배치의 탐색

일반적으로 SA 기법은 전역 최적해를 보장하지만 최적해에 도달하는데 상당한 시간을 요하기 때문에 주어진 문제 조건에 합당한 탐색공간의 선정과 적절히 온도를 내리는 냉각계획(cooling schedule)이 매우 중요하다. SA와 조합 최적화 문제는 수학적으로 동일한 형태를 취하고 있기 때문에 조합 최적화 문제에 SA를 바로 적용할 수 있다. SA 기법은 발전기 기동정지 계획(unit commitment) 분야에 적용되어 기존의 선형 계획법(linear programming)이나 정수 계획법(integer programming)에 비해 비용감소 효과가 있음이 보고된 바 있다[7].

SA를 조합 최적화 문제에 적용하는 기본적인 개념은 가능해(feasible solution)를 무작위로 선택하고, 선정된 해의 이웃해(neighbor solution)를 구하여, 에너지의 변화량이 증가할 때 $e^{(-\text{에너지변화} / \text{제어상수})} \geq U(0, 1)$ 이거나, 이웃해가 목적함수 값을 개선하면 이웃해를 새로운 해로 채택하므로써, 국부해를 피하여 전역 최적해에 도달할 수 있는 기법이다. 여기서 $U(0, 1)$ 는 균등분포(uniform distribution)함수로 실제로는 0.1~0.9사이에서 무작위로 선택한 소숫점 한자리 값을 취한다.

본 논문에서는 PMU의 최적배치라는 문제의 특성에 맞도록 탐색공간과 SA기법의 제어상수(control parameter)인 초기상태 및 감소형태를 적절히 설정하였다. 제어상수의 초기 온도(초기상태)와 냉각계획(감소형태)의 설정은 다음과 같다.

- 초기온도, 냉각계획의 설정

초기온도 T_0 는 최초로 생성된 초기 해에서 새롭게 만들어지는 시험 해를 최대한 허용하기 위해서, 본 논문에서 시험 해의 채

탐색률을 0.95로 설정하였다. 평형 상태에서의 주어진 배치집합의 확률은 볼츠만 분포(boltzman distribution)로 주어진다.

$$T_0 = \frac{-\sigma_1}{\log(0.95)} \quad (3)$$

여기서 σ_1 는 초기 해에서 각 PMU의 상정사고시 관측 불가능한 모선들의 분산을 나타낸다. 식(3)과 같이 초기온도를 결정함으로써 부적절한 초기온도의 설정으로 많은 계산시간의 낭비나 지역해로 빠지는 것을 최대한 방지하였다. 즉, 초기온도 설정은 목적함수 값을 대표하는 관측 불가능한 모선의 σ_1 이 크면 에너지의 변화량이 많은 시험 해를 생성할 것이므로 초기온도를 크게 설정하고, 반대로 σ_1 이 작으면 초기온도를 작은 값으로 설정하게 된다.

냉각 스케줄은 그림 1과 같은 S형 함수(sigmoid function)와 일정온도에서 목적함수 변화량의 분산을 이용하여 식(4)와 같이 유도하였다.

$$T_{n+1} = \frac{1}{(1 + \exp(-0.5 \times \sigma_2))} \times T_n \quad (4)$$

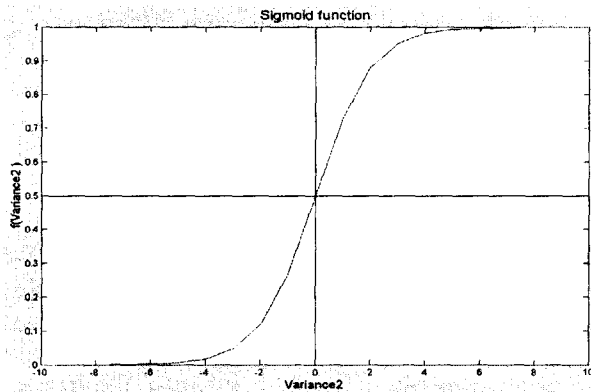


그림 1 S형 함수
Fig. 1 Sigmoid function

여기서 σ_2 는 일정온도 단계에서 목적함수 값 변화량의 분산이다. 즉, σ_2 가 작으면 에너지의 변화량이 적은 안정상태로 인식하여 온도를 빠르게 감소시키고, σ_2 가 크면 에너지의 변화량이 많은 불안정 상태로 판단하여 온도를 서서히 낮추었다. 식(4)에서 사용한 S형 함수를 그림 2에 나타내었다.

본 논문에서는 가능한 해의 정확한 탐색공간을 예측하여 불필요한 탐색을 최대한 배제하도록 다음과 같이 탐색공간을 선정하였다. 각 온도 조건에서 현재 해 집합에서 가능한 이웃 해는 PMU가 시설된 모선을 제외한 나머지 모선으로만 이루어지기 때문에, N모선 계통에서 K개의 PMU로 구성된 초기 해의 경우 시험 해 집합의 PMU수를 M이라 하면 $(N-M) \times M$ 의 탐색공간을 설정할 수 있다. 하지만 이웃 해로의 이동이 무작위 함수로서 수행되기 때문에 선택된 모선이 다시 선택될 가능성이 있으므로 이와 같은 발생확률을 낮추기 위해서 적절히 비례계수(k)를 설정하여 탐색공간을 확장하였다. 본 논문에서는 시행착오를 통하여 가장 효과적인 비례계수로 대상계통에 따라 1 내지 3을 설정하였다. 이 때 각 온도에서의 탐색공간은 $(N-M) \times M \times k$ 가 된다.

● PMU 최적배치 탐색 알고리즘

PMU 최적배치 탐색을 위하여 본 논문에서 제안한 초기조건과 냉각계획을 도입한 SA 알고리즘의 절차는 다음과 같다.

- 단계 1 - 초기 배치집합 선정
 - : 많은 지로를 갖는 모선부터 PMU를 시설하여 계통의 가관측성이 보장되도록 PMU 시설
 - : 수정 이분법의 상한 경계 및 하한경계(=0) 설정
 - 식(3)에 의해 초기온도 설정
- 단계 2 - 탐색공간 설정 - 식(2)에 의해 설정
- 단계 3 - 시험 해 선정 - 상한경계 해에서 무작위 선정
- 단계 4 - 가관측성 조사
 - if 가관측성 보장 (목적함수 값 = 0)
 - : 수정 이분법의 상한경계 변경,
 - : 종료조건 검사: if (상한 - 하한=1) → 종료
- 단계 5 - 탐색공간 설정: $(N-M) \times M \times k$, 탐색공간 만큼 반복
 - : Xcurrent의 이웃 시험 해 Xtrial 생성
 - 이에 상응하는 목적함수 값 Etrial 계산
 - case1 : if Etrial = 0 : 종료조건 검사
 - case2 : if Etrial < Ecurrent : 시험해 수락
 - Xcurrent = Xtrial 단계 5 수행
 - case3 : if $\exp[-(Etrial - Ecurrent)/cp] \geq U(0, 1)$:
 - Xcurrent = Xtrial 단계 5 수행
- 단계 6 - 식 (4)에 의해 온도감소
 - if 최저 제어온도
 - : 관측 불가능, 수정 이분법 하한경계 변경, 단계 2로 반복수행

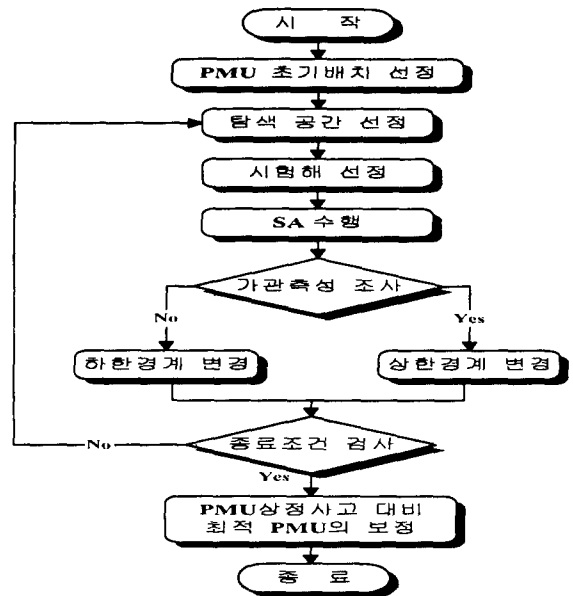


그림 2 제안 SA알고리즘의 흐름도
Fig. 2 Flowchart of the proposed SA algorithm

3.4 직접 조합 계산법에 의한 최적배치

본 논문에서는 또한 PMU의 최적배치를 얻기 위한 보다 간편한 방법으로서 직접 조합 계산법을 시도하였다. 이 방법은 SA기법을 이용하는 방법에서 사용하는 무작위 탐색방법

을 지양하여, 해의 가능성이 가장 큰 집합을 먼저 선정하도록 PMU 배치집합의 조합을 구성하여 최적의 배치를 탐색하는 방법이다. 즉, 초기해에서 가능한 모든 시험해를 구한다. 이때 초기해의 PMU개수를 상한으로 하고, 하한을 0으로 설정한 후 식(2)에 의해서 시험해 구성을 위한 PMU 개수를 산정한다. 이렇게 산정된 PMU 개수로 구성된 시험해는 초기해의 PMU개수에서 산정된 PMU 개수 만큼을 뽑아내는 조합문제로 볼 수 있다. 달리 표현하면, 초기해와 시험해의 PMU개수 차이 만큼을 초기해에서 제거하는 가능한 조합이다. 초기해를 선정할 때, 지로수가 많은 모선부터 순차적으로 PMU를 설치하여 가관측성이 보장되는 해를 도출하였기 때문에, 가능한 시험해의 집합도 이와 유사하게 지로수가 많은 모선에 시설된 PMU 위주로 시험해를 선정하는 것이 합리적이다. 또한 현재 시험해에 대해서 이웃해는 지로수가 가장 작은 모선의 PMU를 선정함으로써 현재 시험해가 가관측성을 보장할 확률을 높였다.

전력계통의 모선수를 N이라 할 때 이 계통에 대한 하나의 시험해에서 다음 탐색구간의 범위는 다음과 같이 설정된다. 시험해 중에서 일부 모선을 선정하여 다른 모선으로 PMU를 이동 시켜가면서 시험해를 판정하는데, 이때 이동 가능한 모선은 PMU가 설치된 모선(시험배치집합(PMU개수:M))을 제외한 나머지 모선으로 (N-M)×M개의 경우가 발생한다. 구체적으로 시험해의 이동 방법은 문제의 특성을 고려하여 규칙적으로 이동한다. 시험해의 집합은 당연히 관측 불가능한 지역을 갖는데, 이 중에서 최소의 관측 불가능 지역을 갖는 PMU를 먼저 선정, 즉, 시험해에서 최소의 지로수를 갖는 모선을 선정하여 최대 지로수로 갖는 모선으로 이동시킴으로써 가관측성이 보장될 확률을 높인 것이다.

그림 3은 초기 해에서 시험 해 및 이웃 해의 가능한 모든 조합의 구성을 표현 한 것이다. 여기서 K, M, 그리고 L은 각 배치집합을 구성하는 PMU 개수이다. 그림 3과 같이 구성된

조합을 통해서 PMU를 최적 배치하는 방법이 직접조합법(Direct Combination method)이다. 이 기법은 기존의 SA기법 및 본 논문의 앞에서 제안한 SA기법보다 훨씬 적은 탐색공간을 갖는 것이 특징이다. 그림 4는 직접조합계산법에 의한 알고리즘 흐름도이다.

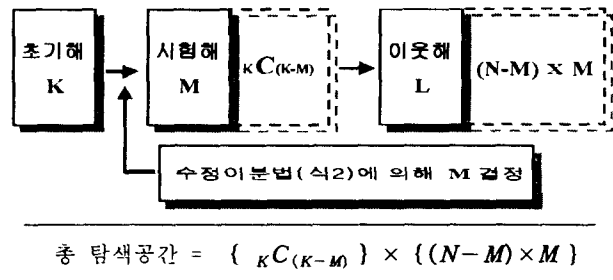


그림 3 직접 조합 계산법의 탐색공간
Fig. 3 Search space of direct combination method

3.5 PMU 단일 상정사고를 대비한 최적배치의 보정

본 논문에서는 계통의 가관측성이 항상 보장되는 건설한 PMU 배치를 위한 PMU 상정사고 대비책으로서 다음과 같은 방법을 택하였다. 즉, 최적 배치 알고리즘을 통하여 얻어진 PMU 집합에서 임의의 1기 PMU 상정사고에도 관측 불가능한 지역이 발생하지 않도록 최소의 PMU를 추가하였다. 이는 과도한 계산량을 피하며, PMU 단일 상정사고시에도 계통의 가관측성을 보장하기 위한 것이다. 그림 5는 PMU 단일 상정사고를 대비한 최적 배치 보정 알고리즘의 흐름도를 나타낸 것이다.

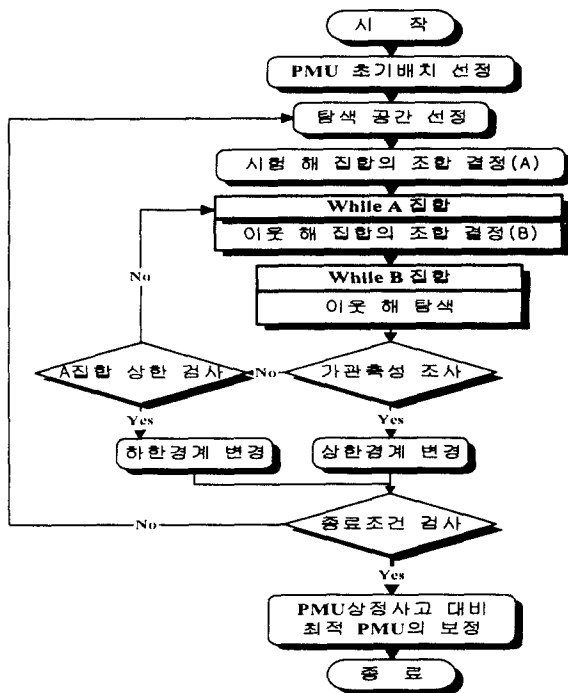


그림 4 직접 조합 계산법의 흐름도
Fig. 4 Flowchart of the direct combination method

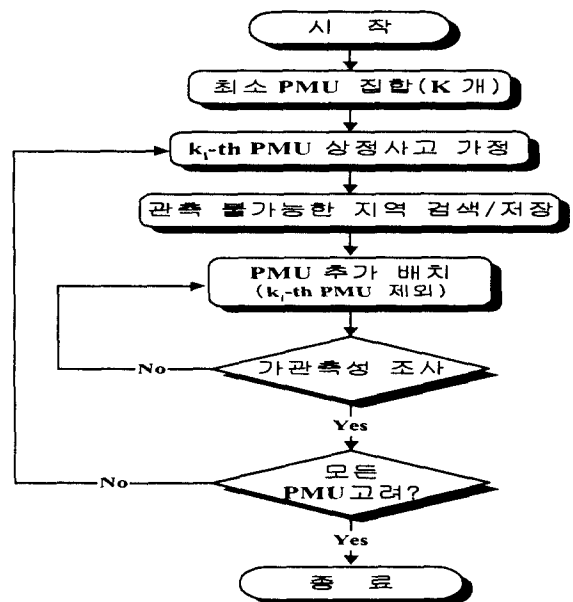


그림 5 PMU 상정사고 대비 최적 PMU의 보정 흐름도
Fig. 5 Flowchart for the adjustment of optimal PMU placement against contingency

4. PMU 최적배치에 의한 전력계통의 상태추정

전력계통에서의 상태추정은 계통의 가관측성이 보장된 상태에서 미지의 계통 상태변수 값을 결정하는 문제로서, 전력계통에서 상태변수는 각 모선의 전압크기와 위상각이다. 기존의 상태추정문제에서는 측정치벡터가 모선의 유입전력, 선로조류, 그리고 모선전압으로 구성되며, 측정치 벡터와 상태변수 추정치 사이의 오차를 최소화하는 방법으로 상태변수를 추정해왔다. 반면 PMU에 의한 측정시스템에서는 측정치가 페이저 값으로 상태벡터가 모선의 복소전압과 복소선로전류로 구성되며, 앞에서와 같은 방법으로 가관측성이 보장되는 PMU의 최적배치를 구한 후라면, 오음의 법칙과 KCL에 의해서 미지의 상태벡터를 쉽게 계산할 수 있다.

그림 6은 송전선로의 일반적인 π 등가회로이다. 선로간의 복소선로전류 I_{ij} 는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

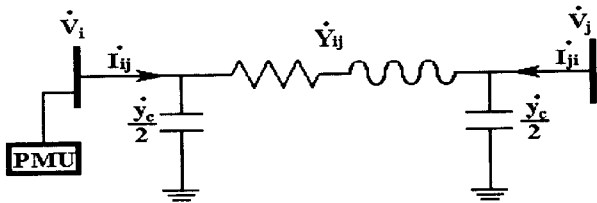


그림 6 송전선로의 π 등가회로
Fig. 6 π -Equivalent circuit of the transmission line

$$I_{ij} = Y_{ij}(\dot{V}_i - \dot{V}_j) + \frac{y_c}{2} \dot{V}_i \quad (5)$$

먼저, i 모선에 PMU가 설치된 경우에는 \dot{V}_i 와 I_{ij} 가 직접 측정되고, 측정기의 측정오차를 무시하면, \dot{V}_j 는 식(6)과 같이 간단히 오음의 법칙으로 계산된다. 이렇게 계산된 \dot{V}_j 는 의사 측정치로서 할당된다.

$$\dot{V}_j = \left[\frac{Y_{ij} + \frac{y_c}{2}}{Y_{ij}} \right] \dot{V}_i - \frac{I_{ij}}{Y_{ij}} \quad (6)$$

다음으로, 그림 7과 같이 PMU가 설치된 모선의 인접모선간의 전류는 다음과 같이 계산될 수 있다. PMU가 설치되면 인접 모선은 의사 측정치로 할당되며 이 의사 측정치에 의해 모선간의 전류는 식(7)처럼 계산될 수 있다.

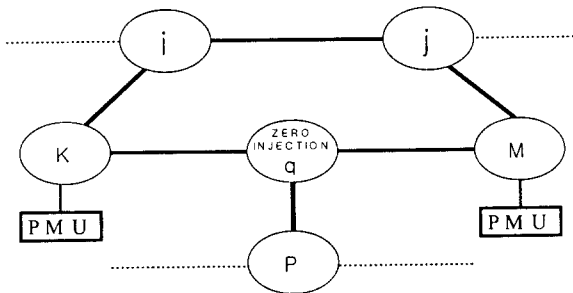


그림 7 2기 PMU가 시설된 단순계통
Fig. 7 Simple system with 2 PMUs

$$I_{ij} = -\frac{y_c}{2} \dot{V}_i + Y_{ij}(\dot{V}_i - \dot{V}_j) \quad (7)$$

셋째로, 그림 7에서와 같이 q모선이 0입력(zero-injection) 모선인 경우로, 인접 모선에 PMU가 설치되어 있다면 KCL에 의해 미지의 지로 전류(I_{qp})를 계산할 수 있다.

이와 같이 PMU로 구성된 측정시스템의 미지 상태벡터는 간단한 계산을 통하여 얻을 수 있으며, 측정된 상태벡터는 동기오차가 배제된 정밀한 값을 얻을 수 있다.

본 논문에서 수행한 최적배치를 통한 미지의 상태벡터 결정은 다음과 같은 절차에 의해서 결정되었다. 먼저 설치된 모선의 최소 인접 컷셋(Minimal Adjacent Cut Set : MACS)에 해당하는 모선의 상태벡터는 식(6)을 이용하여 계산한다. 식(6)에 의해서 결정 가능한 모든 상태벡터를 결정하고 미측정된 지로의 전류페이저를 식(7)을 이용하여 계산한다.

이 단계에서 0입력노드의 최소인접컷셋을 제외한 모든 노드의 상태벡터가 결정된다. 다음으로 0입력노드에 대해서 KCL을 적용하여 남은 지로전류페이저를 결정한다. 0입력노드의 최소인접컷셋 중에서 아직 결정되지 않은 모선의 상태벡터는 KCL을 이용하여 구한 전류페이저와 0입력노드의 전압페이저를 이용하여 결정한다.

이때 PMU 측정시스템이 방정식의 개수가 미지수의 개수에 비해 많은 형태를 갖는 우결정계(overdetermined system)으로 표현되는 경우, PMU의 계산 부담량을 고려하여 지로수가 적은 모선에 시설된 PMU측정 데이터를 상태벡터 계산에 사용하고 그 외의 측정치를 상태벡터 계산에 사용하지 않음으로써, 결정계(determined system)형태로 미지 상태벡터를 결정하였다.

5. 사례 연구

본 논문에서 제시한 PMU최적배치 알고리즘들의 타당성을 검증하기 위해서 IEEE 14모선 표본계통과 IEEE 30모선 표본계통[8]에 대한 사례연구를 수행하였다. 각 표본계통에 대해 기존의 SA기법에 의한 방법[4]과 본 연구에서 제안한 수정 SA방법 및 직접조합법을 비교하였다.

결론적으로 표본계통에 대한 기존의 SA기법과 본 논문에서 제안한 SA기법, 그리고 직접조합법에 의한 접근방법 모두 동일한 최적 배치집합에 도달한 것은 당연한 귀결이라 할 수 있겠으나, 최적해에 도달하기까지의 연산량은 비교될 수 있다. 여기서 연산량은 각 접근방법들이 갖는 탐색공간에 의해서 결정되기 때문에, 이를 비교함으로써 제안한 접근방법들의 실효성을 검증하였다.

5.1 IEEE 14모선 표본계통에 대한 사례연구

IEEE 14모선 표본계통에 대한 최적배치를 도출하기 위한 초기배치집합은 그림8과 같다. 그림 8에 의한 초기배치집합은 3가지 접근방법에서 동일하게 사용되었으며, 이들에 의한 최적배치집합은 그림 9처럼 3가지 방법 모두 동일한 결과를 나타내었다.

모의시험을 통하여 IEEE 14모선 표본계통의 경우 초기 집합은 5기 PMU로 구성하였으며, 최적 배치를 탐색한 결과 3기의 PMU만으로도 모델 계통을 관측할 수 있었다. 즉, 계통 규모의 약 1/5에 해당하는 수준의 모선에만 PMU를 설치하여도 계통의 전 모선을 관측할 수 있음을 알 수 있다.

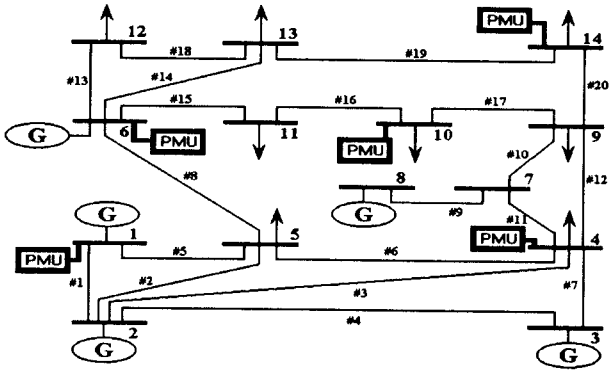


그림 8 초기치 집합(IEEE 14모선 표본계통)
Fig. 8 Initial placement set (IEEE 14-bus sample system)

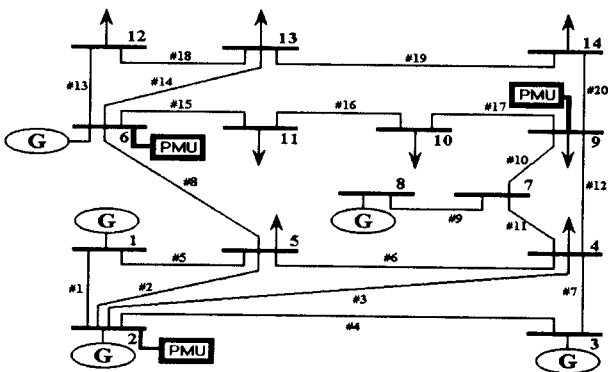


그림 9 최적배치 집합(IEEE 14모선 표본계통)
Fig. 9 Optimal placement set (IEEE 14-bus sample system)

표3은 표본계통에 앞에서 구한 최적 PMU 위치와 각 PMU의 상정사고시 관측 불가능한 지역을 나타낸 것이다. 표3을 통해서 2, 6, 9번 모선에 PMU를 시설할 경우 표본계통은 관측가능하며, 9번 모선의 PMU고장으로 관측 불가능한 모선 수가 5곳으로 가장 많은 것을 알 수 있다. 표3에서 중요도지수는 최적배치의 PMU 중에서 상정사고시 관측불가능 모선이 가장 많이 발생하는 위치를 가장 중요한 모선으로 간주하여 1로 두고, 이에 대한 각 PMU의 상정사고시 관측불가능 모선수의 비율 나타낸 것이다. 이 중요도지수는 계통의 가관측 해석을 위한 모선의 중요도를 비교할 수 있다.

표 3 PMU 단일 상정사고시 관측불가능 지역
Table 3 Unobservable islands at single PMU contingency (IEEE 14-bus sample system)

최적배치의 모선집합	상정사고시 관측불가능 지역모선	중요도지수
2	1, 2, 3	0.6
6	6, 11, 12, 13	0.8
9	7, 8, 9, 10, 14	1

5.2 IEEE 30모선 표본계통에 대한 사례연구

IEEE 30모선 표본계통에 대한 PMU초기배치집합과 최적 배치집합을 그림 10와 11에 나타내었다. 앞서와 마찬가지로 3가지 접근방법은 모두 동일한 최적배치집합을 보여주고 있다. 초기 배치집합은 지로수가 가장 많은 모선부터 순차적으로 PMU를 배치하여 계통의 가관측성을 보장하도록 한 것으로서 총 30모선중에서 11개 모선에 PMU를 설치하는 것으로 하였다. 최적배치 결과는 그림 11과 같이 7개 PMU를 설치하면 전 계통을 관측할 수 있는 것으로 나타났으며 이 역시 전체 모선 수의 약 1/4수준에 해당하는 것이다.

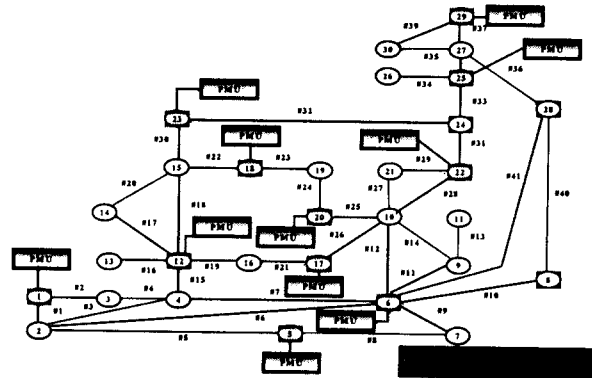


그림 10 초기치 집합 (IEEE 30모선 표본계통)
Fig. 10 Initial placement set

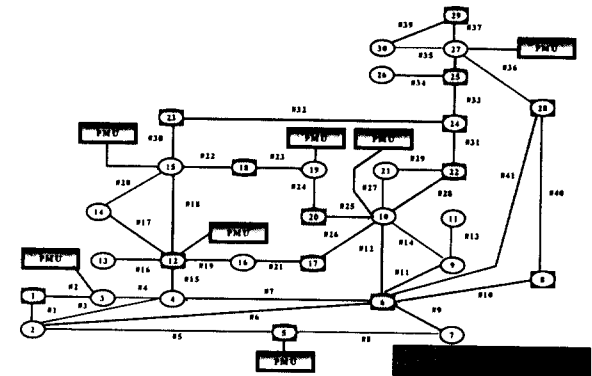


그림 11 최적배치 집합 (IEEE 30모선 표본계통)
Fig. 11 Optimal placement set

표 4 PMU 단일 상정사고시 관측불가능 지역
Table 4 Unobservable islands at single PMU contingencyC (IEEE 30-bus sample system)

최적배치의 모선집합	상정사고시 관측 불가능지역 모선	중요도 지수
3	1, 3	0.2
5	2, 5, 7	0.3
10	6, 8, 9, 10, 11, 17, 21, 22, 24, 26	1
12	3, 6	0.2
15	23	0.1
19	19	0.1
27	8, 25, 26, 27, 28, 29, 30	0.7

표 4에 최적 PMU의 위치와 PMU 단일 상정사고시의 관측 불가능한 지역 및 각 위치의 중요도 지수를 나타내었다

5.3 탐색공간 비교분석

각 접근방법들의 연산량을 간접적으로 비교하기 위하여 각 사례별로 탐색공간을 비교하였다. 표5는 그 결과를 보인 것이다.

표 5 각 방법별 탐색공간

Table 5 Search space at each method

	기존 SA방법	제안 SA방법	직접 조합 방법
14 모선	$0.002 \times {}_{14}C_4 \times 30$ 60.6	$(14-4) \times 4 \times 30$ 1,200	${}_5C_1 \times 4 \times 10$ 200
30 모선	$0.002 \times {}_{30}C_9 \times 30$ 858,429	$(30-9) \times 9 \times 30$ 17,010	${}_{11}C_2 \times 8 \times 22$ 9,680

전체 모선 수가 작은 계통의 경우에는, 초기 해에서 임의의 이웃 해를 선택하는 탐색공간이 위 3가지 방법에 따라 큰 차이를 보이지 않았지만, 계통의 규모가 커질수록 탐색공간이 기하 급수적으로 큰 차이를 보이고 있음을 표 5로부터 알 수 있다. 본 논문에서 제안하는 방법은 대규모 계통에서 기존의 SA방법보다 훨씬 적은 탐색공간을 갖기 때문에 동일한 조건이라면 최적배치집합에 도달하기까지 연산량이 크게 감소한다. 실제 IEEE 30모선 계통의 경우 모든 탐색공간을 검색한다 하더라도 제안한 SA에 방법은 기존SA기법에 비해 탐색공간이 1.98%, 직접조합법은 1.13%에 불과하나 그 결과로서 얻어진 최적배치집합은 동일하다.

5.4 PMU 최적배치에 따른 상태추정 성능평가

표 6은 본 논문에서 구한 PMU 최적배치를 통한 상태추정 결과를 보인 것이다. 표 6의 결과는 PMU의 장점인 측정 오차 및 데이터 전송오차를 무시한 경우 즉, 측정치 벡터에 오차가 유입되지 않는다고 가정한 상태추정 결과이다. 앞에서 말한 것처럼 PMU측정시스템의 경우는 측정오차가 기존 측정시스템에 비해서 매우 작을 뿐만 아니라, 미지의 상태 벡터 값이 오음의 범칙과 KCL을 이용하여 산술적으로 계산되기 때문에 추정과정의 오차가 개입되지 않는다. 계통의 토폴로지 상의 오차를 가정하는 경우는 별도의 검토가 필요한 것이므로 여기서는 토폴로지 상의 에러는 없는 것으로 가정하였다. 표 6의 결과는 PMU 최적배치에 의한 추정결과가 실제의 조류계산 결과에 소수점 이하 4자리까지 일치함을 보이고 있다.

5.5 PMU 단일 상정사고를 대비한 최적해의 보장

계통의 규모가 커지면 최적해(optimal placement set)는 분명히 여러 개 존재할 수 있다. 왜냐하면 PMU 측정시스템에서는 추정오차의 개입이 무시되어 목적함수는 식(1)과 같이 PMU의 최소 개수로 정의될 수 있기 때문이다. 즉, PMU 개수는 최소이지만 가관측성이 보장되는 배치(본 논문의 최적해 조건)의 경우 수는 다수 일 수 있다. 다수의 PMU배치 중에서 실제적인 최적해를 선택하는 기준을 마련하는 일도 중

요한 것이다. 가령 최적해 중 연결선로를 가장 많이 갖는 집합을 선택하면 상태추정의 결과는 상당히 적은 오차를 가질 것이나, PMU고장에 따른 관측 불가능한 지역을 확대시킬 가능성이 있다. PMU의 상정사고시에 관측 불가능한 지역이 최소가 되는 것이 계통의 안정적인 운영을 위해서 바람직하기 때문에, 여기서는 다수의 배치 중에서 각 집합에서 각 PMU의 상정사고시 가장 적은 관측 불가능한 지역을 갖는 해를 최적해로 선정하였다.

각 모선의 최적 배치집합 중 임의의 PMU 단일 상정사고시 전체계통의 가관측성을 보장할 수 있도록 표3 및 표4에 나타난 중요도에 따라 최적 배치를 보정한 결과로서 최소한의 PMU 추가 집합은 14모선 계통의 경우 {1,3,7,10,13}이며, 30모선 계통의 경우는 {3,9,13,14,17,20,23,25,28}이었다. 보정 후 결과는 PMU의 설치가 경우에 따라서는 전체 모선수의 약 60%수준까지 이를 수 있음을 보여 주고 있는데 이는 본 연구에서 계산량을 염두에 두어 다량의 정보를 내포하고 있는 PMU에 대한 보정알고리즘을 간편하게 구성한 때문이다. 앞으로 좀더 정교한 보정알고리즘으로 보완한다면 상정사고를 대비하더라도 PMU 개수를 한 층 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

표 6 기존 조류계산과 PMU 추정결과 비교

Table 6 Comparison of power flow results with estimation results with PMUs

모선번호	조류계산 결과		추정 결과			
			초기 배치집합		최적 배치집합	
	전압	위상각	전압	위상각	전압	위상각
1	1.0600	0.0000	1.0600	0.0000	1.0600	0.0000
2	1.0450	-4.9809	1.0450	-4.9809	1.0450	-4.9809
3	1.0100	-12.7180	1.0100	-12.7180	1.0100	-12.7180
4	1.0186	-10.3242	1.0186	-10.3242	1.0186	-10.3242
5	1.0203	-8.7826	1.0203	-8.7826	1.0203	-8.7826
6	1.0700	-14.2227	1.0700	-14.2227	1.0700	-14.2227
7	1.0620	-13.3682	1.0620	-13.3682	1.0620	-13.3682
8	1.0900	-13.3682	1.0900	-13.3682	1.0900	-13.3682
9	1.0563	-14.9466	1.0563	-14.9466	1.0563	-14.9466
10	1.0513	-15.1043	1.0513	-15.1043	1.0513	-15.1043
11	1.0571	-14.7953	1.0571	-14.7953	1.0571	-14.7953
12	1.0552	-15.0774	1.0552	-15.0774	1.0552	-15.0774
13	1.0504	-15.1589	1.0504	-15.1589	1.0504	-15.1589
14	1.0358	-16.0389	1.0358	-16.0389	1.0358	-16.0389

6. 결 론

본 논문에서는 PMU 측정시스템의 측정기 최적배치에 관한 연구로, PMU 최적배치에 알맞도록 (1) SA기법을 기반으로 가관측성 및 계산량을 개선하는 알고리즘과 (2) 직접 조합 계산법에 의한 알고리즘을 제안하였다. SA를 기반으로 한 방법에서는 조합 최적화 문제의 최적해를 제시하는데 이용되는 기존의 SA기법 중 냉각계획이나 탐색공간등을 PMU 최적배치라는 문제의 특성에 맞도록 수학적 확률론을 바탕으로 재 설정하여 최적해를 도출하였다. 즉, 효과적인 탐색공간의 선정으로 연산량을 현격히 감소시켰다. 직접조합법에 의한

방법은 PMU가 갖는 계통의 상태값에 대한 측정과 관측의 정밀성을 고려하여 아주 적은 탐색공간에 대한 탐색만으로도 쉽게 최적배치에 도달할 수 있었다. 이 두 가지 방법과 기존의 SA기법에 대한 사례연구를 통하여 본 연구에서 제시한 방법들이 PMU 최적배치 문제를 해결하는데 유용하게 쓰일 수 있음을 입증하였다. 이 과정에서 직접조합법이 가장 적은 탐색공간을 필요로 하며, 또한 PMU에서 얻어진 측정치 집합으로 정확하고 보다 쉽게 계통의 상태벡터 추정을 할 수 있음을 보였다.

또한 각 모선의 최적 배치집합 중 PMU 단일 상정사고시 전체계통의 가관측성을 보장할 수 있도록 최적 배치를 보정하는 알고리즘을 제시하였다. 보정 후 PMU의 설치 갯수가 상당량 증가하는 경우도 있었는데, 이는 본 연구에서 계산량을 염두에 두어 보정알고리즘을 간편하게 구성한 때문으로 여겨진다. 앞으로 좀더 정교한 보정알고리즘으로 보완한다면 상정사고를 대비하더라도 PMU 갯수를 한 층 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

본 논문에서 제안한 방법들의 탐색공간은 모선수가 많은 계통일수록 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 계산량의 대폭적인 감소에도 불구하고 최적해를 찾는 데는 아무런 차이를 발견할 수 없었다. PMU 측정시스템은 동기화된 상태벡터를 직접 측정하기 때문에 기존의 복잡한 계산이 요구되지 않고, 미지의 상태벡터를 쉽고 빠르게 추정할 수 있었다. 또한 PMU 최적배치도 초기 해와 동일한 상태벡터의 추정이 가능하였다.

본 논문의 PMU 최적배치 접근 방법은 전력계통의 토폴로지 정보가 주어진 것으로 가정한 것이므로, 대규모 부하의 변동이나 모선 또는 선로사고등의 계통의 변화, 그리고 PMU 측정 데이터의 손상등의 효과는 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점들에 관해서는 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

Appendix 측정기의 측정오차

페이저 측정기(Phasor Measurement Unit : PMU)는 PT와 CT의 2차출력을 입력으로 받아 AD변환을 수행하여 측정데이터를 생성하기 때문에 아날로그를 디지털로 변환하는 과정에서 분해능(Resolution)에 의한 오차가 포함될 수 있으며, 측정 데이터를 타지역으로 전송하는 경우에 전송경로상의 통신오차는 피할 수 없다. 그러나 본 논문에서 대상으로 하는 "GPS(Global Positioning System)수신기를 탑재한 PMU"는 GPS의 1pps신호에 동기된 정밀한 1MHz 펄스를 생성하여 위상각을 측정하기 때문에 60Hz 시스템에 대해서 0.0216° 단위의 정밀한 위상각 측정이 가능하다. 또한 모든 측정기가 GPS에 의해서 1μs 이상의 정밀시각동기를 유지할 수 있기 때문에, 기존의 측정시스템에 비해서 측정시각의 동기오차가 거의 발생하지 않는다. 즉, 측정시각의 동기오차를 배제할 수 있으므로 기존의 측정시스템에 비해 매우 정밀하게 측정점의 전력 페이저를 계량할 수 있다. 그림 A.1은 측정기의 측정오차를 나타낸 것이다.

여기서 측정기의 고유측정오차는 아날로그를 디지털로 변환하는 과정의 분해능에 의한 오차를 말한다. 참고로 본 논문에서 다루어지고 있는 PMU는 16bit 출력워드를 갖는 AD변환기를 사용하고 있다. 그림 A.1에서 ①은 측정시점 동기를 유지하면서 측정기의 고유측정오차만 존재할 때의 측정기의 측정치범위를 나타낸 것이며, ②는 측정시점 동기를 실패한 경우에 동기오차와 고유측정오차가 함유된 측정치범위이다.

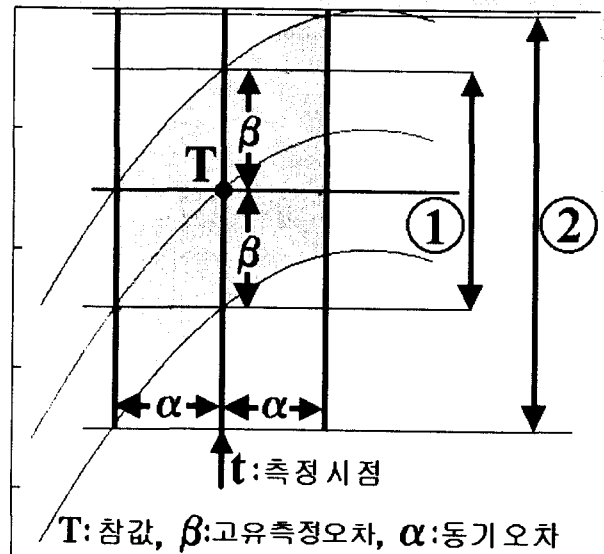


그림 A.1 측정기의 측정오차

Fig. A.1 The measurement error of a unit

전압상태벡터의 순시치를 v_T , 기존 측정기로 측정된 측정치를 v_M , 그리고 GPS수신기를 탑재한 PMU로 측정된 측정치를 v_G 라 하면 각 측정치의 표현식은 다음과 같다.

$$v_T = \sqrt{2} V \sin \omega t \tag{A.1}$$

$$v_M = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \alpha) * (1 + \beta) \tag{A.2}$$

$$v_G = \sqrt{2} V \sin \omega t * (1 + \beta) \tag{A.3}$$

여기서 α 는 동기오차이고, β 는 측정기의 고유측정오차이다. 따라서 "GPS수신기 탑재 PMU"는 동기오차에 의한 영향이 거의 없으므로 A/D변환기의 분해능 허용정밀도 이내로 유지한다면 매우 정밀한 페이저측정이 가능하다. 이들 측정치의 실제값에 대한 비오차를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} RE_{v_M} &= \frac{|v_T - v_M|}{v_T} \\ &= \frac{|Ve^{j\omega t} - Ve^{j\omega t} e^{j\alpha} * (\beta + 1)|}{Ve^{j\omega t}} \\ &= |(\beta + 1)e^{j\alpha} - 1| \end{aligned} \tag{A.4}$$

$$\begin{aligned} RE_{v_G} &= \frac{|v_T - v_G|}{v_T} \\ &= \frac{|Ve^{j\omega t} - Ve^{j\omega t} * (\beta + 1)|}{Ve^{j\omega t}} = |\beta| \end{aligned} \tag{A.5}$$

식(A.4) 및 (A.5)를 통해서 알 수 있는 바와 같이 GPS를 사용한 PMU측정치는 측정기의 고유오차인 β 만을 측정오차로 포함하고 있으며 기존 측정시스템에 비해서 정확한 측정치를 제공하고 있다.

예를 들어 측정기의 고유측정오차를 AD 분해능을 고려하여 0.004%, 동기오차를 4.6μs(60Hz 시스템에서 전기각 0.1°)라 가정하면, 기존 측정기의 비오차는 약 0.001746이고, GPS 수신기를 탑재한 PMU의 비오차는 0.000004이다. 즉, 전기각 0.1°의 동기오차에 대해서 GPS 수신기를 탑재한 PMU가 기존 측정시스템의 측정치에 비해서 약 43.65배 정도 정확하게 상태벡터를 계량하고 있다.

종합하면 GPS를 통해서 정밀시각동기를 유지하는 PMU는 고유측정오차만을 함유한 측정치를 얻을 수 있기 때문에 기존 측정시스템의 측정치에 비해서 정확한 측정치를 얻을 수 있다. 측정데이터를 전송하는 경우, 전송경로상의 유입된 잡음에 의한 통신오차는 모든 데이터 전송시스템에서 공통적으로 발생하는 문제이며, 유입된 잡음을 제거하는 기법과 효과적인 통신 수단을 통해서 통신오차는 해결될 수 있을 것이므로 본 논문에서는 이를 고려대상에서 배제하였다.

감사의 글

본 논문은 1997년도 한국과학재단 특정기초 지원 과제로 수행한 연구 결과의 일부임. (과제번호 : 97-0101-0201-3)

참 고 문 헌

[1] Zhang Wentao, aiu Yufeng, Zheng Xujun, Wu Ye, "The Implementation of Synchronized Phasor Measurement and Its Applications in Power system", Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering, vol. 1, pp.139~143, 1996.

[2] A.G. Phadke, "Synchronized Phasor Measurements in Power Systems", IEEE Computer Applications in Power, Vol.6, No. 2, pp. 10~15, April 1993.

[3] 조기선, 허문준, 채명석, 신중린, "GPS를 이용한 동기페이즈측정장치의 EMTP모델 구현", 1999년도 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1262~1266, 1999.7.

[4] T.L.Baldwin, L.Mili, M.B.Boisen, R.Adapa, "Power System Observability With Minimal Phasor Measurement Placement", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 8, pp. 707-715, May 1993.

[5] Rong-Liang, "A Fast Integer Algorithm For Analysis Using Network Topology", IEEE Transaction on Power Systems, VOL. 5, pp. 1001-1009, August 1990.

[6] G.R.Krumpholz, K.A.Clements, and P.W.Davis, "Power System Observability : A Practical Algorithm Using Network Topology", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-99, pp. 1534-1542, July/April 1980.

[7] A.H. Mantawy, Youssef L.Abdel-Magid, Shokri Z.Selim, "A Simulated Annealing Algorithm For Unit Commitment", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 13, pp. 197-204, February 1998.

[8] M.A.Pai, "Computer Techniques in Power System Analysis", Tata McGraw-Hill Publishing Company, 1979.

저 자 소 개



김재훈 (金載勳)
 1971년 9월 24일생. 1998년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1998년~ 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
 Tel : 02-458-4778
 E-mail : phoenix@kkucc.konkuk.ac.kr



김회철 (金會喆)
 1967년 8월 22일생. 1993년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 에너지관리공단 DSM사업처
 Tel : 02-458-4778



조기선 (曹基善)
 1968년 1월 26일생. 1995년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 02-458-4778
 E-mail : ckant@kkucc.konkuk.ac.kr



신중린 (愼重麟)
 1949년 9월 22일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학 졸업(공박). 현재 건국대 전기공학과 교수
 Tel : 02-450-3487
 E-mail : jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr