

견실한 전력계통 상태벡터 계산을 위한 동기 패이저 측정기 최적배치

조기선 · 신종린
건국대학교 전기공학과

Optimal Placement of Synchronized Phasor Measurement Units for the Robust Calculation of Power System State Vectors

Ki-Seon Cho · Joong-Rin Shin
Dept. of Electric Eng. Konkuk University
jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr

Abstract - This paper proposes the optimal placement with minimum set of Phasor Measurement Units (PMU's) using tabu search and makes an alternative plan to secure the robustness of the network with PMU's. The Optimal PMU Placement (OPP) problem is generally expressed as a combinatorial optimization problem subjected to the observability constraints. Thus, it is necessary to make a use of an efficient method in solving the OPP problem. In this paper, a tabu search based approach to solve efficiently this OPP problem proposed. The observability of the network with PMU's is fragile at any single PMU contingency. To overcome the fragility, an alternative scheme that makes efficient use of the existing measurement system in power system state estimation proposed. The performance of the proposed approach and the alternative scheme is evaluated with IEEE sample systems.

1. 서 론

전력산업의 구조개편이 구체화되고 있는 시점에서 전력계통의 정밀 감시·제어는 그 중요성이 날로 더해가고 있으며, 성공적인 구조개편을 위해서 한층 강화된 계량시스템에 대한 요구가 증대되고 있다. 전력계통 상태벡터는 감시·제어에 관련된 모든 전력계통 운용분야의 정확성 및 신뢰성을 보장하는 중요한 요소이기 때문에, 전력계통 상태벡터의 정확도를 증진시키는 연구가 다각도로 진행되고 있으며, 그 성능 면에서 효과적인 대안으로 제시되고 있는 것이 바로 GPS(Global Positioning System)와 PMU(Phasor Measurement Unit)를 통합한 동기패이저측정기(synchronized phasor measurement unit)이다[1,2,3].

GPS 수신기를 탑재한 패이저 측정기(PMU)는 해당 물리량을 정밀한 동기성(synchronization) 아래 측정하기 때문에, 측정기간의 시작 동기 오차는 무시할 수 있고, 측정기의 고유 측정오차 범위 이내에서 물리량을 계량할 수 있다. PMU는 시설된 모선의 전압패이저와 모든 연결선로의 전류패이저를 계량한다. 따라서 연결선로가 많은 모선에 PMU를 시설할 경우 다량의 물리량을 계량할 수 있어 PMU 측정시스템은 가관측성(observability)면에서는 유리한 반면 상정사고에 대해 소실되는 측정물리량이 많아 상정사고에는 취약한 측정시스템이다.

GPS 수신기를 탑재한 PMU는 가격면에서 상대적으로 고가인 측정기기이기 때문에, 경제성을 고려하여 최소의 개수로 최적의 위치에 PMU를 시설하는 것은 중요한 사안이며, 이를 PMU 최적배치(Optimal PMU Placement : OPP)문제라 한다. OPP 문제를 해결하기 위해서는 측정시스템의 가관측성 해석이 선행되어야 한다. 기존의 상태추정을 위한 측정시스템의 가관측성 해석은 측정시스템을 표현하는 행렬의 계수(rank)를 이용하는 방법[4]과 그라프 기반 접근방법[5]이 제시되었다. 기존 접근방법을 PMU 대체서 확장하기 위해, 본 논문에서는 그라프 기반 접근방법을 채택하였다. OPP 문제의 해를 구하기 위해서는 많은 조합을 탐색해야 하기 때문에, 측정시스템의 계수에 의한 접근방법보다는 그라프 기반 접근방법이 계산시간 면에서 유리하다는 취지에서 그라프 기반 접근방법이 선정되었다. 저자등이 절점-지로 접속행렬을 이용한 PMU측정시스템의 가관측성 해석방법을 제시[6]한 바 있으며, 본 논문에서는 절점-절점 접속행렬을 이용한 가관측성 해석기법으로 확장하였다.

OPP 문제는 측정기의 시설유무에 관련된 조합최적화 문제로서 계통의 규모가 커질수록 그 조합의 수가 기하급수적으로 증가하므로 효율적인 접근방법이 요구된다. Baldwin등은 SA(Simulated-Annealing)기법과 수정이분법(modified bisection method)을 기

반으로 한 접근방법을 시도하였다[7]. SA기법을 이용한 이러한 시도는 양호한 최적배치를 제시하였으며, 조합최적화문제에 대한 SA기법의 적용가능성을 입증하였다. 하지만 무작위 선정을 기초로 한 SA의 특성상 대규모 계통에 적용할 경우 과도한 계산시간이 요구되며, 상정사고에 대해 측정시스템의 가관측성이 쉽게 무너지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 저자등은 수정SA기법(modified simulated-annealing)과 직접조합법(direct combinatorial method)을 제안하였다[6]. 참고문헌[6]에서는 PMU의 특성을 고려하여 SA기법의 초기조건과 냉각계획을 재설정함으로써 대규모 계통에 적용이 용이하도록 하였으며, 물리적으로 합당한 조합을 우선적으로 탐색하도록 하여 탐색할 공간을 최소화함으로써 전체 계산소요시간을 대폭 감소시켰다. 또한 모선의 중요도 지수를 산정함으로써 견실한 PMU측정시스템 설계의 근거를 제시하였다[6]. 무작위 탐색을 합당한 문제조건 설정으로 어느 정도 보완했으나 근본적인 문제해결은 이루어지지 못했다. 이에 본 논문은 참고문헌[6]에서 제시한 직접조합법에 근거로 하여 탐색공간 설정을 직접적으로 관여할 수 있는 TS(Tabu Search) 기법을 통해서 최적배치문제를 해결하고자 하였다.

PMU측정시스템은 1기 PMU가 갖는 측정물리량이 많기 때문에 기존 상태추정을 위한 측정시스템에 비해서 가관측성 유지에 유리한 반면 견실성(robustness)은 취약한 측정시스템이다. 저자들의 선행연구에 의하면, PMU 측정시스템의 1기 상정사고에 대비하기 위해 추가로 시설할 측정기는 최적배치된 개수를 상회하며, 1기 상정사고에 대비한 PMU개수는 계통의 60% 수준에 이룬다는 것을 확인한 바 있다. 따라서 효과적인 대책을 수립하지 않는다면 경제성 면에서 불합리한 측정시스템이 될 것이다. 이에 본 논문에서는 PMU 측정시스템의 견실성을 보장하기 위해서 기존 상태추정을 위해 시설한 측정기를 활용하는 방안을 제시하였다. 물론 PMU 측정시스템의 가관측성과 기존 측정시스템의 가관측성은 그대로 유지하면서 PMU 측정시스템의 견실성을 보완하도록 하였다.

PMU 측정시스템의 상태벡터 결정은 오옴의 법칙과 키르히호프의 전류법칙을 통해서 수행된다. 따라서 영입력(zero injection) 모선의 개수가 많으면서 넓게 분포된 특성을 갖는 계통에 대해서는 최적배치의 개수가 줄어들 수 있으며, 기존의 상태추정에 의한 접근방법보다는 손쉽게 상태벡터를 결정할 수 있다.

본 논문에서는 PMU의 특성을 고려하여 TS기법에 의한 최적배치와 견실성을 보강하기 위한 기존측정시스템과의 연계방안을 제시하였다. 본 논문에서 제안한 기법의 성능과 제시한 대안의 타당성은 IEEE 표본계통에 대한 사례연구를 통해서 입증하였다.

2. PMU 최적배치 문제

2.1 문제 정식화

OPP 문제는 PMU측정시스템의 가관측성이 보장되도록 최소의 PMU를 계통에 시설하는 문제로, PMU 측정시스템은 상정사고에 취약하기 때문에, 동일한 최적배치에 대해 여유도(redundancy)가 크도록 설계하는 것이 합당할 것이다. 이러한 취지에서 본 논문에서 OPP 문제를 다음과 같이 정식화하였다.

$$J = \max_R \min_P \{R(Set(P))\} \tag{1}$$

s.t. Observability(Set(P)) = 1

여기서 Set(P) : P개의 PMU로 구성된 배치집합

R(S) : 집합 S에 대한 여유도(redundancy)

$Observability(S)$: 집합 S 의 가관측성 여부
 $Observability(S) = 1$: 관측가능
 $Observability(S) = 0$: 관측불가능
 P : PMU의 개수, R : 여유도

본 논문에서 여유도는 해당 모선의 상태벡터를 결정하기 위한 PMU의 수를 선정하였다(해당모선의 여유도 = PMU개수-1). 즉, PMU 1기의 상정사고에 대해서도 관측가능한 모선의 수가 여유도를 의미한다.

2.2 PMU 측정시스템의 가관측성

PMU 측정시스템의 가관측성을 해석하기 위해서 먼저 고려할 사항은 OPP문제의 제약조건으로 가관측성 해석이 요구된다는 것이다. 즉, OPP 문제의 해를 구하기 위해서 요구되는 계산시간을 줄이기 위해서는 가관측성 해석이 단순하고 빠른 시간내에 이루어져야 한다는 것이다. 이에 본 논문에서는 그래프 기반 접근방법으로, 해당PMU집합으로 구성된 측정시스템의 전장 측정 트리(spanning measurement tree)의 존재를 식별함으로써 가관측성 해석을 수행하였다. 이를 위해서 절점-절점 접속행렬(node-node incidence matrix)을 구성하여 접속행렬의 각 원소에 PMU가 계량한 측정치의 종류에 따른 기호를 할당하였다. 접속행렬의 대각원소는 해당모선의 전압결정여부를 비대각요소는 연결선로의 전류측정여부를 할당하였다. 할당된 기호는 모두 소수(prime number)를 사용함으로써 해당 모선의 전압이 다수의 PMU에 의해서 결정되는 지 여부를 쉽게 식별 가능하도록 하였다. 측정치로는 PMU 측정치, 오옴의 법칙에 의한 의사측정치(pseudo-measurement), 그리고 영입력절점에 키르히호프의 전류법칙을 적용한 의사측정치를 사용하였다. 측정치가 할당된 접속행렬에 전장측정 트리가 존재하면 해당 PMU배치는 가관측성이 보장되며, 이때 여유도는 접속행렬을 통해서 바로 구할 수 있다.

2.3 PMU 초기 배치

OPP 문제는 PMU의 최소 개수와 최적 위치를 선정하는 문제로 PMU의 시설유무에 따른 다양한 조합을 조사해야하는 조합최적화문제(combinatorial optimization problem)이다. 따라서 합당한 초기조건 설정은 해의 특성과 계산소요시간을 결정하는 중요한 요소이다. 본 논문에서는 OPP 문제의 해를 구하기 위한 초기배치를 PMU의 특성을 이용하여 설정하였다. 이 초기배치는 어떠한 접근방법을 통해서건 접근방법에 관계없이 통용될 수 있기 때문에 그 활용 가능성은 크다할 수 있다.

PMU는 시설모선의 전압페이저와 모든 연결선로의 전류페이저를 측정한다. 그림 1은 PMU가 시설된 단순계통을 보이고 있다.

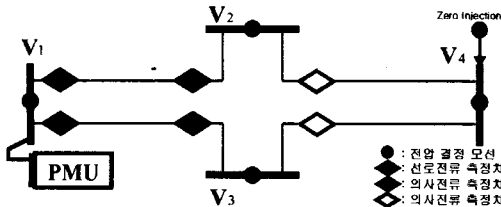


그림 1 PMU가 시설된 단순계통
 Fig. 1 Simple power system with PMU

PMU가 시설된 인접모선의 전압은 측정된 전압페이저와 연결선로의 전류페이저를 이용하여 계산할 수 있으며, 영입력모선의 경우는 키르히호프의 전류법칙을 사용하여 상태벡터를 구할 수 있다.

$$V_2 = V_1 - (I_{12} - Y_{112} V_1) / Y_{12} \quad (2)$$

$$V_3 = V_1 - (I_{13} - Y_{113} V_1) / Y_{13}$$

$$V_4 = \frac{V_2 Y_{42} + V_3 Y_{43}}{Y_{442} + Y_{443} + Y_{42} + Y_{43}} \quad (3)$$

여기서 Y_{ij} : i-j 연결선로의 대지충전용량(어드미턴스)

Y_{ii} : i-j 연결선로의 선로 어드미턴스

PMU가 시설된 모선의 인접모선의 상태벡터는 오옴의 법칙에 의해서, 영입력모선의 경우는 키르히호프의 전류법칙을 적용하여 의사 측정치를 유도할 수 있다. 따라서 PMU는 연결선로가 많은

모선에 시설할수록 의사 측정치가 많아지기 때문에, 초기배치는 최대 시료(연결선로)수를 갖는 모선부터 가관측성이 보장될 때까지 순차적으로 시설하여 생성된 배치집합이다. 이때 상태벡터가 결정된 모선에는 PMU를 시설하지 않도록 하였다. 이와 같은 절차에 의해서 구한 초기배치는 사례연구에 제시하였다.

3. PMU 최적배치

PMU최적배치와 같은 조합최적화문제는 분지한정법이나 동적계획법등으로 접근할 경우 과도한 계산시간과 컴퓨터 기억공간이 요구되어 대부분 주어진 문제에 맞는 알고리즘(problem specific algorithm)이 개발되고 있다. 하지만 주어진 문제가 조금만 변경되어도 최적해를 보장하지 못하게 되므로, 다양한 문제에 적용할 일반적인 알고리즘이 요구되며, 대규모 문제에 적용할 경우에 최적해를 구하는 데 요구되는 계산량이 지수적으로 증가하므로 수치적 기법보다는 주로 경험적(heuristic)기법이 사용되고 있다.

본 논문에서는 최근 많은 실제계 문제에 적용하여 그 성능이 입증되고 있는 타브탐색(tabu search)기법을 통해서 OPP 문제와 견실한 OPP 문제를 해결하고자 한다. 타브탐색기법은 기존 상태추정을 위한 측정기 배치 문제에서 GA(genetic algorithm)나 SA에 비해서 최적해의 질이나 소요되는 계산시간 면에서 우수한 성능이 입증된 바 있다[9]. 타브탐색기법은 탐색집단의 생성과정에 인위적인 접근이 가능하며, 저자 등이 제시한 바 있는 직접조합법[6]을 쉽게 활용할 수 있는 기법으로 본 논문에서 OPP 문제에 타브탐색기법을 적용하였다.

3.1 타브탐색기법

타브탐색은 Glover[9]에 의해 처음으로 소개된 조합최적화문제에 적합한 탐색기법으로 hill-climbing method와 같은 국부탐색기법에 기초로 한 경험적(heuristic)기법이다. 타브탐색은 국부탐색과 달리 국부해에서 벗어나 전역 최적해에 도달하기 위해서 타브리스트(tabu list)라는 기억공간을 활용한다. 탐색과정에서 타브리스트에 저장된 정보를 추출하여 체계적으로 탐색영역을 확장하거나 제한함으로써 국부 최적해를 피해 전역 최적해에 도달하는 방법이다.

타브탐색은 국부탐색 기법과 유사한 탐색절차로 수행된다. 먼저 현재 초기해에 가능한 모든 인접해를 생성하고 인접해 중에서 목적함수를 최소화 하는 해를 다음 해로 선정하여 목적함수 값이 더 이상 개선되지 않을 때까지 탐색과정을 진행한다. 단, 이전에 방문한 해는 일정한 크기의 기억공간(타브리스트)에 저장하여 해의 반복(cycling)을 방지하며, 최근의 탐색정보를 우선적으로 저장하고 일정한 크기(타브보유기간)이상의 정보는 망각하도록 한다. 탐색과정에서 타브리스트에 등록되어 있는 금지해(tabu solution)일 지라도 목적함수를 개선할 여지가 있는 경우에는 금지를 무시하고 해로 선정할 수 있도록 열망기준(aspiration criterion)을 두어 국부해 수렴을 방지한다.

타브탐색기법을 실제 문제에 적용할 때 고려해야할 중요한 요소는 초기해 선정방법과 인접해를 생성하는 방법, 그리고 타브리스트를 사용하는 방법 등이다. 본 논문에서는 각각에 대해서 PMU의 특성을 고려하여 효율적인 매개변수 선정방법을 제시하였다.

3.2 PMU 최적배치

본 논문에서 제안한 초기해 선정방법과 이웃해 생성방법, 타브리스트의 보유기간, 열망조건, 그리고 종료조건은 다음과 같다.

• 초기해 선정

많은 조합을 탐색해야만 하는 문제에서 초기해는 전체 계산시간 성능을 좌우하는 중요한 요소이므로, 합당한 초기해를 선정하는 것은 무엇보다 중요하다. 본 논문에서 OPP 문제의 해를 구하기 위한 초기해로 2.3절에서 언급한 초기배치집합을 타브탐색의 초기해로 선정하였다. 초기해는 실제로 문제의 크기를 1/3로 감소시키는 효과를 발휘하였다. 그 결과는 사례연구에 수록하였다.

• 시험해 및 인접해 생성

탐색할 인접해는 시험해와 시험해의 인접해로 구분하여 생성하였다. 시험해는 현재 PMU개수 보다 하나 작은 PMU개수로 구성된 배치집합이다. 인접해는 시험해 내의 PMU를 다른 모선으로 이동함으로써 발생되는 배치집합이다. 시험해 집합은 현재 PMU개수만큼의 배치집합이 생성된다. 인접해 집합은 한 모선에서 다른 모선으로 PMU를 이동시킴으로써 생성하므로 현재 PMU개수가 k라고 하면 k(k-1)/2개의 인접해가 생성된다. 결국 총 탐색공

간의 수는 $k \times k \times (k-1)/2$ 로 k 가 클 경우에는 방대한 계산시간이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 모든 이웃해를 탐색하지 않고 탐색과정에서 최선일 확률이 큰 배치부터 먼저 탐색하도록 직접조합법(6)에 근거하여 시험해 및 인접해를 생성하였다. 최선일 가능성이 높은 해를 먼저 탐색하도록 하고 주어진 문제의 크기와 현재 배치집합의 PMU개수를 고려하여 반복횟수를 설정하였다.

시험해는 PMU의 개수가 현재보다 하나 작은 배치로 현재 PMU의 개수가 k 라면 kC_{k-1} 개의 조합이 발생된다. 이 중에서 해의 가능성이 가장 높은 것은 여유도가 가장 높은 배치이다. 따라서 순서적인 탐색을 배제하고 여유도가 가장 큰 배치부터 탐색하도록 한다. 이를 위해서 현재 PMU가 시설된 모선들의 최소인접컷셋(minimum adjacent cutset)을 조사하여 연결선로가 가장 적은 모선을 삭제한 배치집합에서부터 탐색을 진행한다. 제거할 모선은 식(4)에 의해서 선정된다.

$$\text{제거 모선} = \min_i b(i) \quad (4)$$

여기서 $b(i)$: i 번 모선의 최소인접컷셋

인접해는 PMU의 위치를 변경한 배치로 식(5)를 통해서 변경할 모선(A→B)을 선정하였다.

$$A = \min_i b(i), i \in \text{PMU 설치 모선}$$

$$B = \max_i b(i), i \in \text{PMU 미설치 모선} \quad (5)$$

다양한 기준에서 사례연구를 수행한 결과 본 논문에서 제안한 방법은 시험해의 경우는 초기해의 50%, 인접해는 모선수의 50%수준에서 가장 우수한 성능을 제시하였으므로 이를 해의 선정에 도입하였다.

• **타브 보유기간 설정**

타브 리스트의 길이는 해의 특성과 계산시간을 좌우한다. 리스트가 길면 전체 해의 특성이 저하되고, 리스트가 짧으면 해의 반복이 발생된다. 따라서 합당한 리스트 길이 즉 타브 보유기간 설정은 최적배치 성능을 좌우하게 된다. 이에 본 논문에서는 전체 탐색공간을 탐색한 결과를 기초로 합당한 타브 리스트의 길이를 설정하였다. 주어진 문제의 1/10수준에서 OPP 문제의 성능이 가장 우수하였으며, 이를 사례연구에 도입하였다.

• **열망조건(aspiration criterion) 설정**

동일한 개수의 PMU로 구성된 배치에서 타브리스트에 등록되어 있어 금지된 해일지라도 가관측성을 만족하면서 여유도를 증가시키면 금지를 무시(타브 리스트에서 제거)하고 최선해로 선정하도록 하였다.

• **종료조건**

본 논문에서는 해의 가능성이 높은 조합을 먼저 조사하도록 시험집합과 이웃해 집합을 설정하고 있으므로 반복횟수에 의한 종료조건은 무의미하며, PMU의 개수가 줄어들지 않으면서 여유도가 개선되지 않으면 종료하도록 종료조건을 설정하였다.

본 논문에서 제안한 타브탐색의 설정조건을 통해서 OPP 문제를 해결하기 위한 전체 흐름도는 그림 2에 제시하였다.

4. PMU 측정시스템의 건설성 확보 대안

PMU 측정시스템은 1기 측정기가 다량의 물리량을 계량하기 때문에 측정시스템의 초기설계에 소요되는 시설 투자는 적으나 상정사고에 대비한 건설한 PMU 측정시스템을 설계하기 위해서는 과도한 설비투자가 요구된다. 이는 한 측정점에서 많은 물리량을 측정하기 때문에 발생하는 당연한 귀결이라 할 수 있다. 저자 등이 선행한 연구(6)에서 PMU 측정시스템의 건설성을 확보하기 위해서 추가로 PMU를 시설할 경우에 계통의 60%에 PMU를 시설해야 한다는 결과를 얻었다. 이에 본 논문에서는 건설성 확보를 위해 추가로 시설하게 될 측정기를 PMU로 하지 않고 기존의 상태추정을 위해서 시설한 측정기를 활용하는 방안을 모색하고자 하였다.

4.1 기존 측정시스템과의 연계에 위한 고려사항

기존의 상태추정을 위해서 시설된 측정기의 위치는 변경하지 않는 것이 상태추정의 성능면에서는 유리할지 모르나 현재 고려중인 PMU 측정시스템의 성능을 향상하기 위한 방안으로 기존 측정시스템을 활용하고자하는 취지에서 일차적으로 현재 배치된 기존 측정기의 위치는 고려하지 않고 단지 그 개수에 대해서만 고려하도

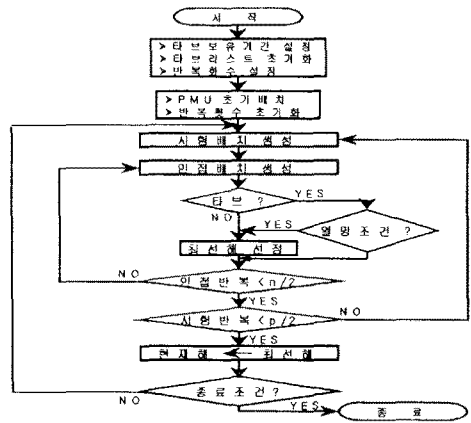


그림 2 제안한 기법의 흐름도
Fig. 2 Flowchart of the proposed method

록 한다. 이를 위해서 원방단말장치가 고려 대상 계통의 전 모선에 시설되어 있다는 전제하에 측정기기들의 재배치를 시도하였다. PMU 측정시스템과 기존 측정시스템을 연계하기 위해서는 우선적으로 동시각 측정데이터라야 연계의 의미를 가질 수 있다. 따라서 PMU 측정시스템과 연계되는 기존 측정기기는 반드시 PMU와 근접해서 시설되어야 하며, 동일 시각정보를 이용한 측정이 이루어져야 한다.

기존 측정시스템의 여유도가 크기 때문에, 전술한 두 가지 요구조건을 만족하도록 하는 측정기 배치는 다수 존재할 수 있다. 여유도가 변경될 경우 그 배치 또한 변경될 것이므로 모든 측정기 배치를 구하는 것은 무의미하다. 따라서 본 논문에서는 임계배치(critical placement)에 대해서만 고려하도록 하였다. 즉, 가관측성을 만족하는 최소의 기존 측정기 배치에 대해서만 고려한다.

4.2 제안한 건설한 PMU 최적배치

전술한 전제조건을 기초로 PMU 최적배치에 건설성을 보장한 최적배치를 타브탐색기법을 이용하여 도출하였다. 이는 두 측정시스템의 가관측성이 보장되면서 PMU 측정시스템의 상정사고시에 기존 측정시스템에서 데이터를 확보할 수 있는 최적배치를 구함으로써 가능하다. 본 논문에서 개발한 OPP 알고리즘을 기존 측정시스템에 적용할 수 있도록 알고리즘을 갱신하여 두 측정시스템에 대한 최적배치를 수행하였다. 제안한 건설 PMU 최적배치에 대한 흐름도는 그림 3에 나타내었다.

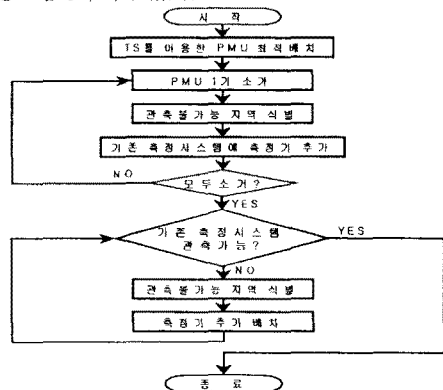


그림 3 건설성이 보장된 OPP 흐름도
Fig. 3 Flowchart of OPP reinforced the robustness

본 논문에서는 PMU 측정시스템의 건설성을 확보하기 위한 대안으로 기존 측정기기를 활용하는 방안을 제안하였다. 이러한 대안을 실현하기 위해서는 측정 데이터의 신뢰성이 확보되어야 한다. 즉, 기존 측정기기의 측정시각을 PMU와 동기시켜야 한다는 것이다. 따라서 PMU의 시각 출력단자와 PMU의 입력채널에 관련된 하드웨어 사양에 대한 면밀한 검토가 요구된다.

5. PMU 측정시스템의 상태벡터 계산

견실성을 보강하기 위해서 추가로 시설한 기존 측정기기와 PMU 측정치를 이용한 전력계통의 상태벡터 결정은 두 가지 절차에 의해서 수행된다. PMU 측정시스템에 고장이 없는 상태에서는 먼저 수집한 데이터의 신뢰성을 보장하기 위해서 데이터의 오차를 소거하는 과정과 오차가 소거된 데이터를 이용한 상태벡터 결정 과정으로 수행되며, PMU 측정시스템에 고장이 있는 경우에는 동기 측정된 기존 측정기기만으로 인접모선의 상태벡터를 결정하도록 하였다.

건설한 PMU 최적배치는 동일 물리량을 계량하는 다수의 측정치가 존재한다. 즉, PMU 시설모선의 전압페이저는 PMU 측정치와 기존 측정기기의 측정치가 존재한다. 본 논문에서는 측정기의 측정오차를 가우시안 랜덤 노이즈로 가정하고, 두 측정치를 평균함으로써 추정값을 유도하였다. PMU 시설모선의 전류페이저는 측정된 전류페이저와 추정된 전압페이저를 이용하여 선류조류 측정치를 생성하고 이를 기존 측정기기의 전류조류와 평균하여 추정치를 유도한 후, 이를 근거로 전류페이저 추정치를 도출하였다. 이는 식(6), (7)과 같다.

$$\widehat{V}_i = AVE(V_{existing-i}, V_{PMU-i}) \quad (6)$$

$$\widehat{I}_{ij} = AVE(S_{ij}^*, \widehat{V}_i I_{ij}) / \widehat{V}_i \quad (7)$$

오차가 소거된 추정치를 이용한 미지의 상태벡터 결정은 다음과 같은 과정을 통해서 수행되었다. PMU 인접모선의 상태벡터는 추정된 전류페이저와 전압페이저를 사용하여 오옴의 법칙으로 계산할 수 있다. PMU가 시설된 모든 인접모선의 상태벡터를 결정한 후 영입력 모선에 대해서 키르히호프의 전류법칙을 적용하여 남은 미지 상태벡터를 계산한다.

여유도가 2이상인 모선의 상태벡터 즉, 다수의 PMU로 결정되는 모선의 상태벡터는 식(6), (7)과 유사하게 평균하여 상태벡터를 결정하였다.

$$V_i |_{R \geq 2} = AVE(V_{PMU1}, \dots, V_{PMUj}) \quad (8)$$

전력계통의 상태벡터를 결정하는 과정을 흐름도로 표현하면 그림 4와 같다.

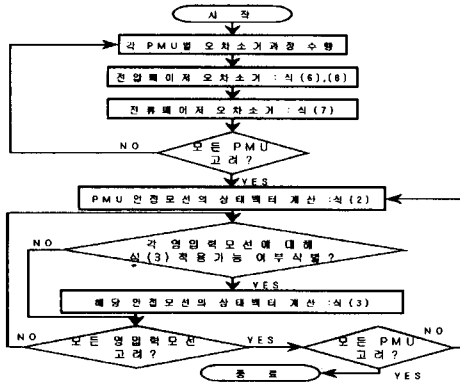


그림 4 상태벡터 계산 흐름도
Fig. 4 Flowchart of calculate the state vector

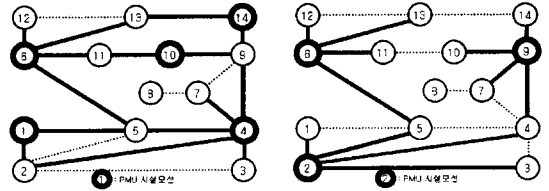
6. 사례연구

본 논문은 PMU 특성을 활용한 타보탐색 매개변수의 합당한 설정으로 OPP문제를 해결하였다. 본 논문에서 제안한 접근방법의 유효성과 견실성 확보 대안의 타당성을 검토하기 위해서 IEEE 14, 30, 57모선계통을 표본계통으로 삼아 사례연구를 수행하였다.

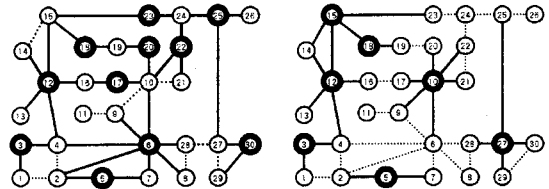
6.1 초기배치와 최적배치

본 논문에서 제안한 접근방법에 의한 표본계통의 초기배치와 최적배치는 그림 5, 6, 7과 같다. 개별 표본계통에 대한 결과에서 확인할 수 있듯이, IEEE 14, 30, 57 모선계통에 대해 초기배치는 각각 5기, 11기, 16기로 나타났다. 이는 개별 표본계통에 대해서 각각 35%, 36.7%, 28%의 PMU만을 시설하여도 측정시스템의 가관측성이 보장된다는 것을 의미한다. 따라서 합당한 초기배치를 통해서 OPP 문제의 크기를 약 1/3 수준으로 축소할 수 있다는 것이다. 이들 초기배치를 이용한 최적배치는 각각 4기, 7기, 13기

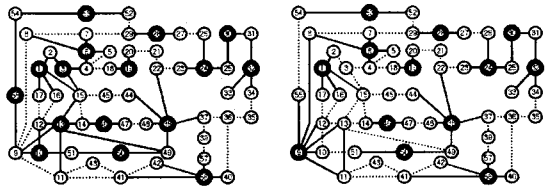
로 나타났으며, 이는 주어진 표본계통의 21%, 23.3%, 22.8%로 약 1/4수준에서 최적의 PMU배치를 얻을 수 있었다. 이때의 여유도는 각각 2, 5, 4로 계통의 구성상태에 따라서 최대 여유도는 달라질 수 있음을 알 수 있다. 본 사례연구를 통해서 주목할 사실은 초기배치와 최적배치의 차이가 계통의 약 10%이내에서 결정된다는 것이다. 이는 합당한 초기배치의 선정으로 OPP 문제의 해결을 찾기 위한 탐색공간이 축소됨을 의미하고, 결과적으로 OPP 문제의 계산부담량이 대폭적으로 감소될 수 있음을 보여주는 것이다.



(a) Initial placement (b) Optimal placement
그림 5 IEEE 14모선의 PMU 배치
Fig. 5 PMU placement on IEEE 14bus system



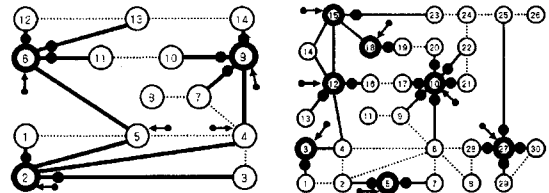
(a) Initial placement (b) Optimal placement
그림 6 IEEE 30모선의 PMU 배치
Fig. 6 PMU placement on IEEE 30bus system



(a) Initial placement (b) Optimal placement
그림 7 IEEE 57모선의 PMU 배치
Fig. 7 PMU placement on IEEE 57bus system

6.2 견실성이 보완된 PMU 최적배치

PMU 1기 상정사고에 대비한 PMU 측정시스템의 견실성을 보강하기 위해서 본 논문에서 제안한 기존 측정기기의 활용방안에 대한 사례연구 결과는 그림 8과 표 3과 같다. 최적배치된 PMU 측정시스템에 기존 측정기를 추가하는 방법은 최적배치시의 여유도에 의해서 좌우된다. 두 측정시스템에서 측정된 데이터의 신뢰도를 확보하기 위해서 반드시 측정치의 시각 동기가 이루어져야 하므로 PMU가 시설된 모선에는 기존의 유입전력 측정기를 연결선로에는 선류조류측정기를 배치한다. 단 여기서 여유도가 1 이상인 모선과의 연결선로에는 기존 측정기를 시설하지 않는다.



(a) IEEE 14 bus system (b) IEEE 30 bus system
그림 8 견실성이 보강된 OPP
Fig. 8 OPP reinforced the robustness

그림 8에서 확인할 수 있는 바와 같이 IEEE 14모선계통은 3개의 유입과 8개의 선로조류가 요구되고, IEEE30모선의 경우는 7개의 유입과 17개의 선로조류 측정기 요구된다. IEEE 57모선계통의 경우는 표 3에 제시된 바와 같이 13개의 유입전력측정기와 33개의 선로조류 측정기가 요구된다. 이러한 보강계획을 통해서 PMU 1기 상정사고에 대해서도 계통의 상태벡터를 결정할 수 있는 견실한 PMU 최적배치의 설계가 가능하게 된다. 본 사례연구에서는 기존 측정시스템의 여유도를 고려하지 않았으므로, 현재 배치집합을 포함한 기존 측정시스템의 설계를 통해서 PMU측정시스템의 1기 상정사고에 대한 견실성을 확보할 수 있다.

표 3 견실성을 보강하기 위한 기존 측정기 배치(IEEE 57bus)
Table 3 The placement of the existing metering device to reinforced the robustness (IEEE 57 bus system)

종류	위치	모 선 번 호
전 압		1,6,9,19,24,28,30,32,38,46,50,53,56
유입전력		1,6,9,19,24,28,30,32,38,46,50,53,56
전력조류		(1-2),(1-5),(1-16),(1-17),(6-4),(6-5),(6-7),(9-10) (9-11),(9-12),(9-13),(9-55),(19-18),(19-20),(24-23) (24-26),(28-27),(28-29),(32-33),(32-34),(38-22) (38-37),(38-44),(38-48),(46-14),(46-47),(50-51) (53-52),(53-54),(56-41),(56-42),(56-57),(56-40)

6.3 상태벡터 결정

최적배치된 PMU측정시스템의 견실성을 확보하기 위해서 추가로 시설된 측정기를 활용하여 미지의 상태벡터를 결정하였다. 이를 위해서 PMU의 시각정보를 활용한 모든 측정기의 크기 오차는 0.004%, 위상오차는 ± 0.0108 로 설정하고, 평균이 0인 무작위 오차를 생성하여 기존의 조류계산 결과에 부가함으로써 측정치를 생성하였다. 여유도가 1 이상인 선로를 제외하고 모든 측정 물리량은 측정치가 2개 이상 존재하므로 식(6)~(8)을 이용하여 오차를 소거하고, 오차가 소거된 데이터를 이용하여 미지의 상태벡터를 결정하였다. 미지의 상태벡터를 결정할 결과는 그림 9와 10에 제시하였다.

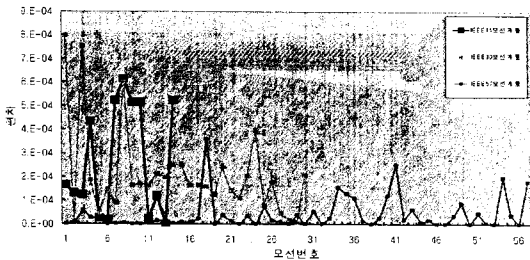


그림 9 각 표본계통에 대한 모선전압의 크기 편차곡선
Fig. 9 Deviation curve of voltage magnitude on each sample system

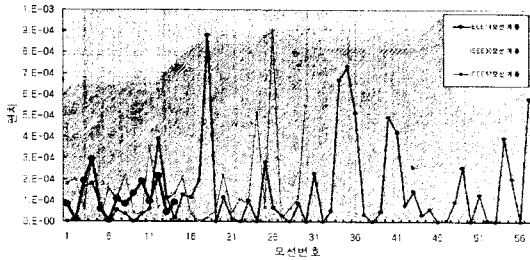


그림 10 각 표본계통에 대한 모선 위상각 편차곡선
Fig. 10 Deviation curve of phase angle on each sample system

그림 9는 각 표본계통에 대한 모선전압의 크기에 대한 기존조류계산 결과의 편차를 도시한 것이고, 그림 10은 위상편차를 도시한 것이다. 위 결과는 측정시점에서의 전압페이저를 나타내고 있지만, 대략 10^{-3} 의 정확도로 미지의 모선 전압 페이저를 결정하고 있음을 쉽게 확인할 수 있었다.

6.4 사례연구 고찰

사례연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 합당한 문제설정으로 OPP문제의 탐색공간을 축소하였다. 표4는 기존 접근방법과 비교한 결과를 제시하였다.
- 2) 초기배치는 약 30%수준에서, 최적배치의 경우는 약 23%의 PMU 설치로 가관측성이 보장된 최적배치를 도출하였다.
- 3) 기존 측정시스템은 PMU시설모선에 RTU를 시설함으로써 두 측정시스템을 쉽게 연계할 수 있었으며 RTU가 시설된 경우라면 별도의 시설투자 없이 기존 측정기의 재배치만으로 PMU측정시스템의 견실성을 확보할 수 있었다.
- 4) PMU 측정시스템의 상태벡터 계산 성능은 측정오차에 따라서 다를 수 있으나 10^{-3} 이내의 정확도를 확보할 수 있었다.
- 5) 제한한 견실성 확보방안을 PMU의 입력채널과 시각신호 출력채널에 대한 하드웨어 사양이 뒷받침되어야 실현될 수 있다.

표 4 탐색공간 비교
Table 4 Search space at each methods

	14모선계통	30모선계통	57모선계통
참고문헌 [7]	$K \times {}_{14}C_4$	$K \times {}_{30}C_9$	$K \times {}_{57}C_{15}$
($K=0.002 \times 30$)	60.6	858.429	1.3234E12
[6] SA	1,200	17,010	94,500
직접조합	200	9,680	23,760
본 논문	35	300	667

7. 결 론

본 논문에서는 GPS 수신기를 탑재한 페이저 측정기의 최적배치를 위한 타브탐색 접근방법과 PMU 측정시스템의 견실성을 확보하기 위한 기존 측정시스템의 활용방안을 제시하였다. 제한한 타브탐색기법은 기존의 발전기법에 비해서 빠른 계산성능을 보였으며, 23%이내의 모선에 PMU배치로 계통의 가관측성을 보장할 수 있었으며 1기 PMU상정사고에 대해서도 전력계통의 상태벡터를 일정정확도 이내에서 결정할 수 있었다. 또한 PMU 측정시스템의 견실성을 확보하기 위해서 본 논문에서 제안한 기존 측정시스템 활용방안은 과도한 시설투자를 줄일 수 있는 효과적인 대안이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 기존 측정시스템을 활용한 견실성 확보 방안은 우선적으로 PMU의 하드웨어 사양이 뒷받침되어야 실현 가능한 대안으로, 향후 PMU의 입력채널과 동기신호 출력채널의 충분한 확보를 위한 연구가 수행되어야 하며, PMU측정시스템의 상태벡터 계산성능은 측정오차에 민감하기 때문에, 측정오차와 불량데이터(bad data)를 식별·처리할 수 있는 기능을 PMU 하드웨어에 추가하는 연구를 수행할 계획으로 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Robert E.wilson, "Use of Precise Time and Frequency in Power Systems", proceedings of the IEEE, Vol.79, No. 7, pp.1009~1018, July 1991
- [2] Robert O. Burnett, Jr., Marc M. Butts, Patrick S. Sterlina, "Power System Applications for Phasor Measurement Units", IEEE Computer Applications in Power, Vol.7, No.1, pp.8~13, January 1994
- [3] 조기선, 허문준, 채명식, 신중린, "GPS를 이용한 동기 페이저 측정장치의 EMTP 모델 구현", KIEE Summer Annual Conference '99, pp.1262~1266, 1999.7.19-21
- [4] Rong-Liang, "A Fast Integer Algorithm For Analysis Using Network Topology", IEEE Transaction on Power Systems, VOL. 5, pp. 1001-1009, August 1990
- [5] 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
- [6] 김재훈, 조기선, 김희철, 신중린, "페이저 측정 시스템의 측정기 최적배치", KIEE Summer Annual Conference '99, pp.1195~1198, 1999.7.19-21
- [7] T.L.Baldwin, L.Mili, M.B.Bosen, R.Adapa, "Power System Observability With Minimal Phasor Measurement Placement", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 8, pp. 707-715, May 1993
- [8] Fred Glover, Manuel Laguna, "Tabu Search", Kluwer Academic Publishers, 1997 pp. 1~91
- [9] Hiroyuki Mori, Osamu Matsuzaki, "A Tabu Search Based Approach to Meter Placement in state State Estimation, Proceedings of ISAP '99, pp.365-369, April 4-8, 1999