

### 페이저 측정기 최적배치를 위한 초기 배치 전략

조기선\* · 신종린\* · 박종배\* · 채명석\*\*  
\*건국대학교 전기공학과 · \*\*군장대학

## An Initial Placement Strategy for Optimal Placement of Phasor Measurement Units in Power Systems

KI-Seon Cho\* · Joong-Rin Shin\* · Jong-Bae Park\* · Myung-Suk Chae\*\*

\*Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ. · \*\*Kunjang College

jrshin@konkuk.ac.kr

**Abstract** - This paper presents a new strategy to find starting points for placing optimally Phasor Measurement Units(PMUs). The performance of the starting point, initial placement set of PMUs, affect critically the computational burden and/or time, because the Optimal PMU Placement (OPP) problem is formulated the combinatorial optimization. By analyzing the properties of OPP solutions on IEEE sample systems in detail, a new strategy for initial PMU placement, in this paper, is proposed. To verify the performance of the suggested strategy, the comparison with the existing strategy and the new one, on IEEE sample systems, is performed. By using the new strategy, the numbers of search spaces to solve the OPP problem is drastically decreased.

**Keyword** : Phasor Measurement Unit(PMU), Optimal PMU Placement(OPP), PMU 초기배치 전략

### 1. 서 론

전력계통의 안정적 및 효율적 운용을 실현하기 위해서는 무엇보다 전력계통 전체 상태벡터에 대한 정밀한 감시가 전제되어야 하며, 최근 경쟁적 전력시장 도입에 따라 그 중요성이 다시금 강조되고 있다. 전력시스템이 지리적으로 넓게 분포된 특성을 고려하여 시스템 전체 상태벡터의 정밀 감시를 위해서, GPS(Global Positioning System)의 시각 정보를 활용하여 정밀 측정시각 동기를 실현한 페이저 측정기(Phasor Measurement Unit: PMU)에 대한 많은 연구가 보고되고 있다[1,2].

전력계통 상태벡터 감시에 PMU를 사용한 페이저 측정시스템을 구성하기 위해서는 측정시스템의 가관측성(observability)을 보장하는 PMU의 개수와 위치를 결정하는 문제가 일차적이며, 이를 페이저 측정기 최적배치(Optimal PMU Placement: OPP) 문제라 한다[3,4,5]. OPP문제는 측정기의 설치 유무에 따른 조합최적화(combinatorial optimization)문제로 정식화되므로, 시스템의 크기에 대해서 탐색공간이 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서, 방대한 탐색공간을 효과적으로 탐색하기 위해서 주로 발견적 접근(heuristic approach) 기법들이 고려되고 있으며, 탐색공간을 체계적으로 줄이면서도 해의 성능을 해치지 않는 다양한 접근방법들이 제시되고 있다[3,4,5].

전력시스템은 다양한 기술적 제약 하에서 자원을 효율적으로 이용할 수 있도록 설계되고 있으므로 OPP문제의 탐색공간은 전력엔지니어의 경험을 바탕으로 축소될 수 있다. 이는 대부분의 OPP문제의 접근방법에서 도입되고 있으며, 주로 PMU 초기배치(initial PMU placement) 용어를 사용하고 있다. 저자료를 비롯한 대부분의 연구자들이 PMU의 측정범위를 이용하여 단순한 배치전략을 수립하여 최적배치의 초기치로 활용하고 있는데, 배치전략이 단순하지만 탐색공간을 60%까지 효과적으로 줄일 수 있음이 연구 결과에서 보고되고 있다[3,4,5]. 따라서, 탐색 기법들의 성능 향상을 위한 탐색기법 자체에 대한 연구와 병행하여 PMU의 초기배치를 효과적으로 도출할 수 있

는 체계적인 전략을 수립하는 연구가 요구된다. 하지만, 이 부분에 대한 연구는 초기 탐색공간을 과도하게 설정함으로써 해가 초기에 국부 수렴할 가능성을 배제할 수 없다는 이유로 많은 연구가 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 기존의 단순 전략으로 도출된 PMU 초기배치와 PMU 최적배치사이의 상관관계를 면밀히 분석하여, 최적배치에 결정적인 영향을 미치는 요인을 파악하고 이를 PMU 초기배치 전략으로 활용함으로써, 국부 수렴에 대한 우려를 불식하고 효과적으로 탐색공간을 축소할 수 있는 PMU 초기배치전략을 제안하였다.

### 2. 페이저 측정기 초기 배치

일반적으로 조합최적화 문제의 탐색공간은 시스템의 크기에 대해 대체로 지수함수의 형태로 증가하므로, 초기에 문제의 특성을 고려하여 해일 가능성이 희박한 탐색공간을 선별해 범으로써 탐색공간을 줄일 수 있고, 이를 통해서 탐색 성능을 제고할 수 있다.

OPP문제도 마찬가지로 측정시스템의 관측 범위를 최대화하면서 측정기의 개수를 최소화하므로, 관측 범위를 최대화하는 즉 지료를 가장 많이 포함하고 있는 모선에 PMU를 시설하는 것이 최선이다. 이러한 취지에서 무의미한 탐색공간을 탐색과정에서 배제할 수 있도록 초기해를 선정하고 다양한 탐색기법을 통해서 최적 배치를 도출한다.

저자의 선행연구[4,5]에서 제시한 초기해 선정 과정을 간략히 요약하면, PMU의 관측범위를 최대로 활용할 수 있도록 가장 많은 지료수를 갖는 모선을 선정하여 PMU를 시설한다. 이를 통해서 관측 가능한 모든 모선을 계통에서 제거함으로써 관측 가능지역과 관측 불가능지역을 분리해내고, 남아 있는 관측 불가능한 지역에 대해서 동일한 규칙을 적용하여 전 계통이 관측가능해질 때까지 반복 수행한다.

이러한 선정 전략으로 실제 탐색 공간은 계통의 크기와 구조에 따라 달라질 수 있으나 개략적으로 60%이상의 무의미한 탐색공간을 배제할 수 있었다. 하지만 이러한 초기 배치 선정 전략은 최선책은 아니며 본 논문에서 좀 더 개선된 형태의 초기 배치전략을 도출하였다.

#### 2.1 초기 배치와 최적 배치의 상호 관계

본 절에서는 기존에 저자가 제시한 초기 배치 선정전략을 사용하여 도출된 초기 배치를 사용하여 다양한 사례계통에 대한 최적해를 도출한 결과를 면밀히 분석함으로써 이제까지 제시되었던 초기해 선정 전략을 좀더 구체화할 수 있는 방안을 도출하였다.

그림 1은 IEEE 표본계통에 대한 PMU 초기 배치와 최적 배치 결과를 나타내고 있다[5]. IEEE 30 모선 계통의 경우, 초기 배치는 11개 모선에 PMU가 시설된 결과를 얻었으며, 최적 배치는 7개 모선에 PMU가 배치된 결과를 얻을 수 있었다. 여기서 주목할 사실은 초기 배치 해에서 가장 많은 지료수를 갖는 모선이 최적 배치 해에서는 배제되는 경우가 발생한다는 사실이다. 이는 최대 지료수를 갖지만 이보다 적은 지료를 갖

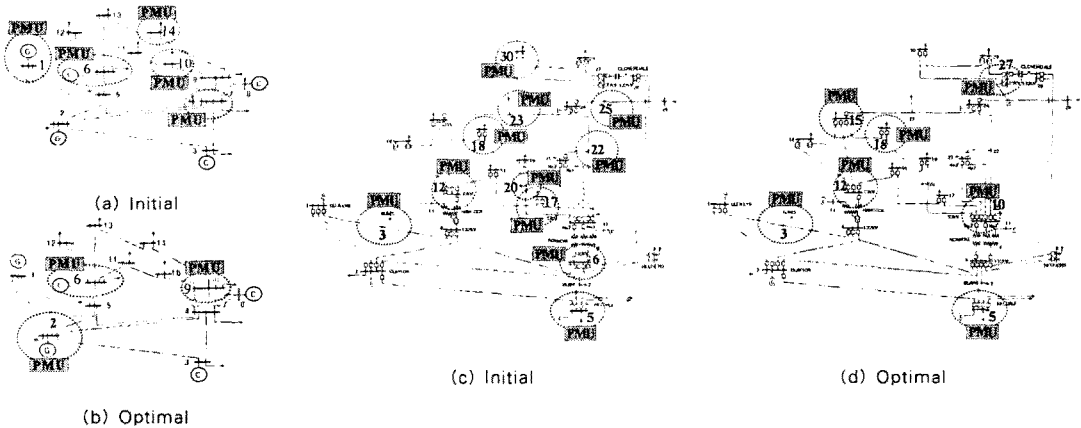


그림 1 PMU placement sets on IEEE sample systems

는 모선에 PMU를 시설하는 것이 성능 면에서 더 우수할 수 있음을 보여주는 예이다. 즉, 지로의 개수가 많은 모선에 우선 순위를 두고 배치하는 것만으로는 불충함을 알 수 있다. 또한, 지로수가 2개인 모선이 중속연결로 연결된 중속연결(cascade connection)의 경우에 계통의 가관측성을 보장하기 위해서 지로의 개수가 작을 지라도 반드시 PMU가 시설되어야 하는 모선이 존재한다는 사실에 주목할 필요가 있다.

전술한 사항들을 직관적으로 평가하기 위해서 IEEE 14모선 계통의 각 모선에 대한 특성표를 작성하여 표 1에 제시하였다. 표 1은 해당 모선에 PMU를 시설함으로써 얻을 수 있는 관측 가능 범위와 해당 모선에 PMU를 시설하면 인접모선에 PMU를 시설하지 않게 됨으로 관측 가능 범위를 확장할 수 있는 가능성을 잃게 되는 관측 불가능 범위를 표시하였다. 또한, 해당모선에 PMU를 시설함으로써 관측범위 차원에서 얻거나 잃게 되는 정보량을 모선 개수으로 표현한 것이다.

Table 1 Property table on IEEE 14-bus system

No	A	B	C	$\Delta$	관측 가능 모선(D)	D+ $\Delta$
1	2	6	1	-3	1,2,4	3 0
2	4	9	3	-2	1,2,3,4,5	5 3
3	2	7	1	-4	2,3,4	3 -1
4	5	12	3	-4	2,3,4,5,7,9	6 2
5	4	11	2	-5	1,2,4,5,6	5 0
6	4	7	1	-2	5,6,11,12,13	5 3
7*	3	7	1	-3	4,7,8,9	4 1
8	1	1	0	0	7,8	2 2
9	4	8	1	-3	4,7,9,10,14	5 2
10	2	4	0	-2	9,10,11	3 1
11	2	4	0	-2	6,10,11	3 1
12	2	5	1	-2	6,11,12,13	4 2
13	3	5	1	-1	6,12,13,14	4 2
14	2	5	0	-3	9,13,14	3 0

- A: 해당 모선과 인접하고 있는 모선(MACS\*\*)의 개수
- B: 인접모선들의 MACS 개수(해당 모선의 연결 상태는 제외)
- C: MACS간 연결된 지로의 개수
- $\Delta$ : A-B+C
- \*: zero-injection node
- \*\* : MACS(Minimal Adjacent Cut Set)

## 2.2 최대 지로수에 의한 배치전략 분석

IEEE 14모선 계통에 대해서 기존의 초기 배치 선정 전략을 적용하면 최대 지로수를 갖는 4번 모선에 우선적으로 PMU를 시설하게 되나, 이 모선이 최적 배치에는 배제되어 있다. 따라서 이 모선이 초기 배치에 선정되지 않는 것이 탐색성 면에서는 유리할 수 있다는 전제로, 이 모선이 최적 배치에서 배제된 연유를 조사하였다. 4번 모선에 PMU를 시설하면 인접한 5개 모선의 가관측성이 보장되지만, 해당모선에 PMU를 시설함으로써 인접모선에 PMU를 시설하지 않게 된다. 결국 인접 모선에 PMU를 시설하여 피할 수 있었던 관측 가능 모선 정보

(12개 모선)를 잃게 된다. 이처럼 해당모선에 PMU를 시설함으로써 얻을 수 있는 관측 가능 범위와 해당 모선에 PMU를 시설하지 않고 인접모선에 PMU를 시설함으로써 얻을 수 있는 정보의 차이를 표 1에서 확인할 수 있다.

인접 모선의 개수가 동일하다 할지라도 해당 모선의 인접모선들이 가지고 있는 지로수가 많은 경우에 초기 배치로 선정하는 것은 합리적이지 못하고, 관측 가능 범위와 관측 불가능 범위의 차가 동일한 경우에는 관측 가능 범위가 넓은 모선부터 선정하는 것이 합당하다는 결론을 도출할 수 있다.

## 2.3 중속연결 특성 분석

초기 및 최적배치 사이의 관계에서 중속연결 형태의 네트워크에서는 중속 연결된 모선 중 일부에 PMU가 반드시 시설된다는 사실을 확인한 바 있다. 즉, 중속연결 된 부분네트워크에 시설된 PMU는 초기배치와 일치하거나 해당 네트워크 내에서 위치만 일부 변경될 뿐 PMU 시설 개수에는 큰 영향을 주지 못한다는 것이다. 이러한 사실을 IEEE 30모선 계통을 통해서 확인할 수 있다.

그림 2는 IEEE 30모선 계통(표A.1 참조)에서 중속연결 형태만을 발췌한 것이다.

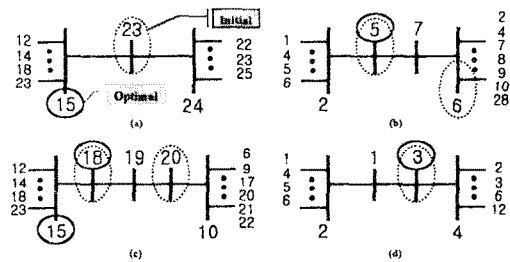


그림 2 Cascade connections on IEEE 30-bus system

그림 2에 나타난 바와 같이 중속 연결된 부분 네트워크 내에서 초기 및 최적배치 시의 PMU 개수에 있어서 큰 차이를 보이지 않고 있다. 개수의 차이를 보이는 것은 중속연결 네트워크의 경계모선에 PMU가 시설되는 경우나 영입력 모선이 존재하여 의사측정치가 도입되는 경우를 제외하고는 PMU의 개수가 더 늘어나지는 않는다. 설령 PMU가 경계노드에 시설되는 경우라도 할지라도 중속 연결된 부분네트워크의 가관측성을 보장하기 위해서 반드시 PMU가 존재해야함을 그림 2를 통해서 확인할 수 있다. 따라서 중속 연결된 부분 네트워크를 식별하고, 이 부분 네트워크는 경계 모선을 제외하고 최적배치 시에 고려대상에서 제외함으로써 탐색공간을 효과적으로 축소할 수 있다. 축소된 네트워크의 PMU배치가 결정된 후 부분네트워크에 대한 PMU 배치는 경계 모선을 고려하여 배치함으로써 최종 PMU최적배치를 도출할 수 있다.

### 3. 제안한 초기 배치 전략

지금까지 살펴본 최대 지료수를 이용한 기존의 초기 배치 전략의 문제점을 보완하고 중속연결 특성을 고려할 수 있도록, 기존의 저자들이 제시한 바 있는 초기 배치 전략을 확장한 새로운 초기 배치 전략을 제안하였다.

제안한 초기 배치 전략의 절차는 다음과 같다.

- 단계 1  
: 계통의 topology 데이터를 이용한 특성표 작성
- 단계 2  
: 중속 연결된 부분 네트워크 식별  
: 부분 네트워크의 경계 모선을 제외한 내부 모선을 초기 배치 대상에서 제외, 삭제된 모선 정보 기록
- 단계 3  
: 특성표에서 (D+Δ)가 최대인 모선에 PMU 시설  
: 관측 가능 모선 식별, 모선 정보 기록  
: 영입력(zero injection)모선이 존재할 경우에는 관측 가능 영역을 확장
- 단계 4  
: 특성표 수정  
: 관측 가능 모선 정보를 특성표에서 삭제
- 단계 5  
: 남은 네트워크의 전 모선이 관측 가능한지 식별  
: 관측 가능하지 않다면 단계 3으로 반복
- 단계 6  
: 부분 네트워크에 PMU 배치  
: 최종 초기 배치 집합 도출

제안한 초기 배치 전략은 시스템에 따라서 다수의 초기 배치를 도출할 수 있다. 하지만, 도출된 다수의 초기 배치는 대부분 부분 네트워크 내부에 위치한 PMU의 위치 정보만 변경된 경우이므로, 배치 성능은 유사하다. 여기서 OPP 해법의 시간 성능을 제고하기 위해서 초기 배치 전략의 단계 6을 초기 배치 전략에서 수행하지 않고 부분네트워크이 제거된 수정네트워크에 대해서만 최적 배치를 수행하고, 최적 배치가 완료된 후에 수정네트워크에 PMU를 배치하는 방법을 사용할 수 있다. 즉, 본 논문에서 제안한 새로운 초기 배치 전략은 기존의 OPP 해법의 성능을 제고하는 데 활용할 수 있다.

### 4. 사례연구 및 고찰

제안한 초기 배치 전략의 타당성과 성능을 평가하기 위해서 표본 계통에 대한 사례연구를 수행하였다. 사례연구는 제안한 초기 배치 전략과 기존의 전략을 동일한 조건하에서 적용하여 그 결과를 비교 검토하여 하였다. 사례 연구를 수행한 표본계통은 IEEE 14,30,57모선계통에 대해서 수행하였으며 그 결과를 표2에 제시하였다.

표2에 통해서 알 수 있듯이 기존의 단순 배치 전략에 비해서 보다 적은 수의 PMU 배치를 도출할 수 있었으며, 도출된 초기 배치의 PMU 개수에 있어서는 최적배치의 개수와 일치된 결과를 얻고 있음에 주목할 필요가 있다. 즉, 초기 배치에서 최적 배치를 도출하기 위해 다양한 탐색 기법을 도입하고 있으나 본 논문에서 제안한 초기 배치 전략만으로도 최적 배치에 가까운 초기 배치를 얻을 수 있다는 것이다.

Table 2. Comparison with the existing strategy and the proposed strategy in the number of PMUs

계통	IEEE 표본계통			
	6-bus	14-bus	30-bus	57-bus
기 준	2	5	11	15
제 안	2 (33.3%)	3 (21.4%)	7 (23.3%)	13 (22.8%)
최적 배치	2	3	7	13
(기존-제안)	0 (0%)	2 (40%)	4 (36.4%)	2 (13.4%)

배치 전략의 변경에 따른 초기 배치의 성능은 시스템의 특성에 따라 차이를 보이고 있다. IEEE 30모선 계통에 있어서는 제안한 배치 전략을 적용한 결과 중속연결에 의한 배치가 4건,

(D+Δ) 판단기준에 의해서 배치된 개수가 3건으로 전체 7개의 PMU를 시설하는 초기 배치를 도출하였다. 여기서 주목할 사실은 (D+Δ) 판단기준에 의한 배치는 최적배치에 그대로 나타난다는 사실이며 중속연결 형태는 4가지가 존재하고 있음으로 다수의 최적해가 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 특히 IEEE 14모선 계통의 경우에는 3개의 배치가 모두 (D+Δ) 판단기준에 의해서 도출된 것이고 중속연결에 의해서 반드시 시설되어야 하는 PMU가 없기 때문에 유일한 최적해가 존재한다는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 페이저 측정기의 최적 배치에 사용되는 초기치를 효과적으로 산정할 수 있는 새로운 PMU 초기 배치 전략을 제안하였다. PMU 측정 시스템은 조합 최적화 문제로 정식화되므로 방대한 탐색 공간을 효율적인 탐색할 수 있는 다양한 기법들이 모색되고 있다. 초기치로 사용되는 PMU 초기 배치는 탐색 공간을 효과적으로 축소하는 수단으로, PMU의 측정 범위에 기초한 단순 전략이 수립되어 사용되어 왔다. 본 논문에서 PMU의 초기 및 최적 배치 사이의 연관성을 면밀히 검토하여, 전력 계통의 topology에 관련된 새로운 PMU 초기 배치 전략을 수립하였다. 본 논문에서 제안한 PMU 초기 배치 전략은 최적 배치와 유사한 형태의 배치를 도출하였으며, 최적 배치를 위한 다양한 접근 기법들의 성능 향상에 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

전력 계통이 자원의 효율적 이용을 위한 목적으로 설계되고 있으므로, 향후 계통의 기하학적 구조에 대한 분석을 통해서 그라프 기반 최적 배치 도출 방안을 모색할 것이며, 중속 연결된 부분네트워크의 효과적인 처리를 통해서 PMU 최적 배치 문제의 성능 향상에 관한 연구를 수행할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] A.G. Phadke, "Synchronized Phasor Measurements in Power IEEE Computer Applications in Power, Vol.6, No.2, pp.10-15, Apr
- [2] Robert O. Burnett, Jr., et al., "Power System Applications for Measurement Units", IEEE Computer Applications in Power, Vol. pp.8-13, January 1994.
- [3] T.L. Baldwin, et al., "Power System Observability With Minima Measurement Placement", IEEE Transactions on Power Systems pp.707-715, May 1993.
- [4] 초기치의 3인, "전력 계통의 페이저 측정기 최적 배치", 대한전기학회논문지, 제 49권, 7호, pp.313-322, 2000.7.
- [5] Ki-Seon Cho, et al., "Optimal Placement of Phasor Measurement U GPS Receiver", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, pp.258-262, January 2001.
- [6] M.A. Pai, Computer Techniques in Power System Analysis, McGraw Hill

### [부 록]

Table A1. Property table on IEEE 30-bus system

No	A	B	C	Δ	관측 가능 모선(D)	D+Δ	
1	2	4	0	-2	1,2,3	3	1
2	4	11	1	-6	1,2,4,5,6	5	-1
3	2	4	0	-2	1,3,4	3	1
4	4	14	1	-9	2,3,4,6,12	5	-4
5	2	4	0	-2	2,5,7	3	1
6*	7	17	2	-8	2,4,6,7,8,9,10,28	8	0
7	7	7	0	-5	5,6,7	3	-2
8	2	8	0	-5	6,8,28	3	-2
9*	3	11	1	-7	6,9,10,11	4	-3
10	6	13	2	-5	6,9,10,17,20,21,22	7	2
11	1	2	0	-1	9,11	2	1
12	5	8	1	-2	4,12,13,14,15,16	6	4
13	1	4	0	-3	12,13	2	-1
14	2	7	1	-4	12,14,15	3	-1
15	4	7	1	-2	12,14,15,18,23	5	3
16	2	5	0	-3	12,16,17	3	0
17	2	6	0	-4	10,16,17	3	-1
18	2	4	0	-2	15,18,19	3	1
19	2	2	0	0	18,19,20	3	3
20	2	6	0	-4	10,19,20	3	-1
21	2	7	1	-4	10,21,22	3	-1
22*	3	8	1	-4	10,21,22,24	4	0
23	2	5	0	-3	15,23,24	3	0
24	3	5	0	-2	22,23,24,25	4	2
25*	3	5	0	-2	24,25,26,27	4	2
26	1	2	0	-1	25,26	2	1
27*	4	6	1	-1	25,27,28,29,30	5	4
28*	3	10	1	-6	6,8,27,28	4	-2
29	2	4	1	-1	27,29,30	3	2
30	2	4	1	-1	27,29,30	3	2

\* 용례는 표 1과 동일