

페이저 측정 시스템의 측정기 최적배치

김 재훈* 조 기선 김 희철 신 중린
*건국대학교 전기공학과

Meter Optimal Placement in Measurement System with Phasor Measurement Unit

Jae-Hoon Kim* Ki-Seon Cho Hoi-Cheol Kim Joong-Rin Shin
Dept. of Electric Eng. Konkuk Uni.

Abstract - This paper presents optimal placement of minimal set of phasor measurement units(PMU's) and observability of measurement system with PMU. By using the incidence matrix symbolic method which directly assigns measurement and pseudo-measurement to incidence matrix, it is much simpler and easier to analyze observability. The optimal PMU set is found through the simulated-annealing(SA) and the direct combinational method. The cooling schedule parameter which is suitable to the property of problem to solve is specified and optimal placement is proven by presented direct combinational method. Search spaces are limited within reasonable feasible solution region to reduce a unnecessary one in the SA implementation based on global search. The proposed method presents to save CPU time and estimate state vectors based on optimal PMU set.

1. 서 론

전력계통의 정밀한 운전제어를 위해서는 우선적으로 전력계통의 제반 상태값의 정밀한 감시·측정이 요구된다. 최근 정밀한 상태값을 확보하기 위해 GPS(Global Positioning System)를 통해 동기화를 유지하는 PMU(Phasor Measurement Units)의 활용이 모색되고 있다[1]. 대규모 전력시스템의 각 모선의 페이저를 동시성을 가지고 측정하게 되면, 기존의 측정치를 통한 전력시스템 제어에 비해 월등한 제어 신뢰성을 보장하게 되어 실시간 전력 시스템 감시제어가 가능하게 된다.

대규모 전력시스템의 전 모선에 페이저 측정장치를 시설하면 고 신뢰성을 보장하는 측정시스템을 구성할 수는 있겠으나, 허용할 수 있을 정도의 추정오차 범위 내에서 측정이 가능하다면 굳이 전 모선에 PMU를 시설할 필요가 없겠다. 따라서, 경제성 문제를 고려해 모든 모선에 PMU를 시설하지 않게 되면 과연 어느 정도의 PMU를 시설하고, 또한 어느 위치에 시설할 것인지에 관한 충분한 연구가 수행되어야 할 것이다. 즉 PMU의 최소 개수와 최적 배치에 관한 연구를 통해서 경제적인 측정 시스템 구성이 가능하게 된다[2].

전력계통의 상태벡터 추정은 반드시 계통의 가관측성(Observability)이 보장되는 경우에 수행될 수 있기 때문에, PMU시설에 따른 가관측성 해석에 관한 연구가 선행되어야 한다. 기존의 측정시스템의 가관측성 해석은 계통의 토폴로지와 측정시스템의 Rank를 이용하여 수행되었다[3][4]. PMU만으로 구성된 측정시스템은 기존의 측정시스템에 비해서 1기 PMU가 갖는 측정치(모선전압, 모든 지로전류)가 많기 때문에 기존의 측정시스템에 비해서 가관측성을 보장할 확률이 커지고 측정기의 개수 또한 대폭 줄일 수 있는 측정시스템이다[2].

본 논문에서는 PMU 측정시스템의 구성에 관한 연구로 가관측성을 보장하는 측정기의 최소 개수와 그 위치를 결정한다. 가관측성을 판정하는 알고리즘을 개발하고 이를 기초로 측정기의 최소개수와 위치 선정에 관한 연구를 수행하였고, 신뢰성을 보장하는 측정시스템 구성을 위해서 1기 PMU 고장에 따른 과급효과를 검토함으로써 신뢰성을 보장하는 측정시스템 구성의 기반연구를 수행하였다.

본 논문에서 제시한 여러 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해서 모델계통을 선정하여 사례연구를 수행하였으며, 그 결과를 통해서 경제성 및 신뢰성을 보장하는 PMU 측정시스템을 구성하였다.

2. 전력시스템 가관측성 해석

전력시스템의 가관측성 해석은 측정집합의 자코비안 행렬에 밀접한 관련이 있기 때문에 자코비안 행렬의 Rank를 직접 계산하는 방법과 전력시스템의 토폴로지를 이용한 그래프기반 접근 방법으로 크게 대변된다[3]. 전자는 측정집합의 자코비안 행렬이 완전한 Rank를 가지고, 이 행렬이 약조건(ill-condition)을 갖지 않는다면 시스템을 수학적으로 가관측 하다는 것이고, 후자는 토폴로지 가관측성 이론으로 적어도 하나의 완전 Rank를 갖는 확장측정트리(Spanning Measurement Tree)의 존재로서 정의된다[4].

PMU로 구성된 측정시스템의 가관측성 해석은 PMU가 시설된 모선의 전압 페이저 및 모든 지로의 전류 페이저를 알 수 있기 때문에 기존의 측정시스템 가관측성 해석에 비해서 간단하고 명확하게 입증될 수 있다.

이 측정시스템의 가관측성은 옴의 법칙과 키르히호프의 법칙에 의해서 결정된다. 전압 페이저를 알고 있는 인접모선의 전압 페이저는 옴의 법칙을 이용하여 결정 가능하고, 미지의 지로전류는 KCL에 의해서 결정할 수 있다[2]. PMU로 구성된 측정시스템은 순수하게 위 2가지 법칙에 의해서 가관측성이 결정된다.

3. 페이저 측정장치 최적배치

3.1 문제의 정식

네트워크의 가관측성을 보장하는 최소의 PMU 배치집합을 얻기 위해서 다음과 같은 목적함수를 정의할 수 있다.

$$f(P) = \text{minimize} \{g(S)\} \quad (1)$$

여기서, $g(S)$ = 관측되지 않는 모선수
 $S \in$ 임의의 P 개 배치집합 영역
 S = PMU 배치집합
 P = PMU의 수

미 관측 모선을 결정하기 위해서 자코비안 행렬의 Rank를 통한 접근법은 자코비안 행렬이 특이행렬에 가까워지면 계산이 곤란하고 연산에 소요되는 시간이 많기 때문에, 본 논문에서는 미 관측 모선 수를 결정하기 위해 노드-지로 접속행렬 A (모선수 \times 지로수)를 이용하여 행렬의 각 원소에 측정치에 따른 적절한 기호법을 도입함으로써, Rank에 의한 접근법의 단점을 보완하였다. 본 논문에서 도입한 기호법은 다음과 같다. 기존의 노드-지로 접속행렬의 해당 행에 PMU가 시설된 행에 기호 15를 할당하고, PMU가 시설된 모선의 인접모선은 옴의 법칙에 의해서 결정할 수 있으므로 접속행렬의 해당 열에 기호 20을 할당한다. 양쪽 모선에 의사 측정치가 할당된 지로의 전류는 결정할 수 있으므로 접속행렬의 양쪽모선의 해당 열에 기호 30을 할당한다.

이러한 절차에 의해 접속행렬을 구성하면 측정치 및 의사 측정치에 의해서 기호의 접속행렬이 변화되고, 여전히 모든 행과 열이 '1'인 상태로 남아있는 경우는 관측이 불가능하다는 것을 알 수 있다. 이러한 접근을 통해서 결국 관측이 불가능한 모선과 지로 정보 및 관측 가능 지역의 식별이 가능하게 되고, 미 관측 모선의 수를 결정하는 데 소요되는 연산시간이 대폭 감소하게 된다.

3.2 배치 집합 선정

초기 배치 집합 선정은 PMU의 시설에 따른 효과를 극대화하기 위해 지로 수가 많은 모선에서부터 순차적으로 PMU를 시설하여 가관측성을 보장하는 배치집합(이하 해)을 선택한다[2]. 이 초기 배치집합은 계통의 가관측성을 보장하기 위해 PMU 개수에 제한 없이 시설하기 때문에, 이때의 PMU 개수가 최적 개수의 상한이 된다. 따라서, 초기 해에서 적절한 PMU의 배치로 보다 적은 PMU로 가관측성을 보장할 수 있다. 계통의 특성상 가관측성을 보장하는 해는 이전 해의 근처에 있을 확률이 크기 때문에 적당한 규칙에 의해서 선정해야 한다[2]. 본 논문에서는 다음과 같이 설정하였다.

$$TEST_{set} = \lceil Mean\{Mid\{상한, 하한\}, 상한\} \rceil \quad (2)$$

3.3 시뮬레이티드-어닐링(Simulated Annealing)

SA 기법은 이론적으로 전역 최적해를 보장하지만 최적해에 도달하는데 상당한 시간을 요하기 때문에 문제의 조건에 맞는 탐색공간 선정과 온도를 내리는 냉각스케줄이 중요하다. SA와 최적화 문제의 유사성을 이용하여 조합 최적화 문제에 SA를 적용할 수 있다[5].

SA를 조합 최적화 문제에 적용하는 기본적인 개념은 가능해(feasible Solution)를 무작위로 선택하고 이 해의 이웃 해를 구하여, 목적함수 값이 개선되거나 에너지의 변화량이 증가할 때 $\exp(-\text{에너지변화}/\text{제어상수}) \geq U(0,1)$ 이면 이웃해로 이동하는 것으로, 국부해를 피하여 전역 최적해에 도달할 수 있는 기법이다. 본 논문에서는 PMU의 최적배치라는 문제의 특성에 맞도록 탐색공간과 제어상수(Cp)의 초기상태 및 감소형태를 설정하였다. 제어상수의 초기온도와 냉각스케줄은 다음과 같이 설정하였다.

3.3.1 SA에 의한 문제설정

초기온도 T_0 는 최초로 생성된 초기 해에서 새롭게 만들어지는 시험 해를 최대한 허용하도록 하여야 하며, 본 논문에서는 시험 해의 수락 확률을 0.95가 되도록 설정하였다.

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

σ_1 는 초기 해에서 각 PMU의 상정사고시 관측 불가능한 모선들의 분산을 나타낸다. 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 설정하였다. 따라서 부적절한 초기온도의 설정으로 많은 계산시간의 낭비나 지역해로 빠지는 것을 최대한 방지하였다.

본 논문의 냉각 스케줄은 S형 함수(sigmoid function)와 일정한 온도에서 목적함수 변화량의 분산을 이용하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

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

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.

SA 기법은 기본적으로 최적해를 찾기 위해서 전역탐색을 기반으로 하지만 전역 최적해에 도달하는데 많은 시간이 요하므로 본 논문에서는 문제의 특성을 고려하여, 가능한 해의 정확한 탐색공간을 예측하여 불필요한 탐색을 최대한 배제하도록 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(d)를 정하여 탐색공간을 확장하였다. 본 논문에서는 가장 효과적인 비례상수로 2를 설정하였다. 따라서 각 온도에서 $(N-M) \times M \times 2$ 의 탐색공간을 갖는다.

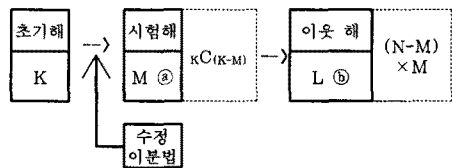
3.3.2 제안한 알고리즘의 수행과정

- 단계 1 - 초기 배치집합 선정
: (최대 모선부터 PMU를 시설하여 네트워크의 가관측성이 보장되도록 PMU 시설)
: 수정 이분법의 상한 경계, 식(3)에 의해 초기온도 설정, 하한경계 = 0
- 단계 2 - 탐색공간 설정
: 식(2)에 의해 설정
- 단계 3 - 시험 해 선정
: 상한계 해에서 무작위 함수 발생기로 선정
- 단계 4 - 가관측성 조사
if 가관측성 보장 (목적함수 값 = 0) : 수정 이분법의 상한경계 변경, 종료조건(if 상한 - 하한=1) 만족 → 종료
else 단계 5 수행
- 탐색공간 설정
단계 5 - for 탐색공간 : $(N-M) \times M \times k$
: $X_{current}$ 의 이웃 시험 해 X_{trial} 생성, 이에 상응하는 목적함수 값 E_{trial} 계산
case1.if $E_{trial} = 0$: 종료조건 검사
case2.if $E_{trial} < E_{current}$: 시험해 수락, $X_{current} = X_{trial}$ 단계 5 수행
case3.if $\exp[-(E_{trial} - E_{current})/C_p] \geq U(0, 1)$: $X_{current} = X_{trial}$ 단계 5 실행
- 단계 6 - 식 (4)에 의해 온도감소
if 최저 제어온도 : 관측 불가능, 수정 이분법 하한경계 변경, 단계 2 수행

본 논문에서는 PMU의 최적배치가 결정된 후 계통의 가관측성을 향상 보장하는 신뢰성을 지닌 PMU의 배치를 위해 최적 배치된 PMU 집합에서 임의의 1기 PMU 상정사고시에 관측 불가능한 지역을 검색하여 PMU를 추가 시설하였다. 즉, 임의의 1기 PMU 상정사고시에도 계통의 가관측성을 보장하기 위한 접근이다. 실험에서 1기 PMU 상정사고시에도 계통의 가관측성을 보장하는 PMU 배치집합은 계통의 2/3수준으로 결정할 수 있음을 확인하였다.

3.4 직접 조합 계산법에 의한 최적배치

본 논문에서 제안한 이 방법은 기존의 SA 기법에서 사용하는 무작위 탐색방법을 사용하지 않고, 해의 가능성이 가장 큰 집합을 먼저 선정하도록 가능한 모든 PMU 배치집합의 조합을 구성하였다.



$$\text{총 탐색공간의 수} = \text{시험 해 집합} \{ (K C(K-M)) \} \times \text{이웃 해 집합} \{ (N-M) \times M \}$$

그림 1 직접 조합 계산법의 탐색공간
Fig. 1 Search space of Direct Combinational Method

그림 1은 초기 해에서 시험 해 및 이웃 해의 가능한 모든 조합을 구성하여 PMU를 최적 배치하는 방법이다. 이 방법은 기존의 전역탐색 기반의 알고리즘보다 훨씬 적은 탐색공간을 갖는 것이 특징이다. 간단한 알고리즘은 다음과 같다.

- 단계 1 - 초기 해 선정
- 단계 2 - 시험 해 집합의 조합 결정(그림 1의 a)
- 단계 3 - 이웃 해 집합의 조합 결정(그림 1의 b)
- 단계 4 - 최소의 미 관측모선을 갖는 집합선택(while a 집합)
- 단계 5 - 이웃 해를 선정(while b 집합)
최대 연결선로를 갖는 모선으로 PMU를 이동
if 가관측성을 만족 : 상한경계 변경, 종료조건 검사
- 단계 6 - 하한경계 변경, 단계 2수행

4. 사례 연구

모델 계통에서 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하였으며 PMU 측정시스템의 성능을 평가하여 기존 조류계산과 PMU 측정시스템의 추정결과를 비교하였다. 6모선 시험계통과 IEEE 14모선, IEEE 30모선을 실험모델로 하였다.

4.1 6모선 계통

표1은 6모선 실험계통의 최적해로서 초기 해와 변화가 없음을 확인하였다. 표1은 최적 해의 1기 PMU 상정사고시 관측 불가능한 지역이다. 표1의 결과에서 6번 모선은 시설된 PMU의 상정사고시 관측 불가능한 지역이 2번 모선보다 많으므로, 계통의 가관측성 보장을 위한 중요한 모선으로 간주할 수 있다. 따라서 6번 모선을 신뢰성 지수의 기준으로 하여 2번 모선의 신뢰성 지수를 구하였다. 이 신뢰성 지수는 계통의 가관측 해석을 위한 모선의 중요도를 제공 할 수 있다. IEEE 14모선, 30모선에서 사용하는 신뢰성 지수 또한 같은 의미를 갖는 것이다.

표 1 1기 PMU 상정사고시 관측불가능 지역
Table 1 Unobservable islands at one PMU contingency

최적배치집합	관측 불가능 지역	신뢰성지수
2	2, 3	0.67
6	1, 4, 6	1

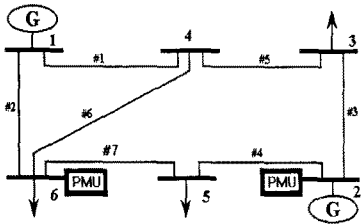


그림 2 최적배치 집합
Fig. 2 Optimal Placement Set

4.2 IEEE 14모선 계통

표 2 1기 PMU 상정사고시 관측불가능 지역
Table 2 Unobservable islands at one PMU contingency

최적배치집합	관측 불가능 지역	신뢰성지수
2	1, 2, 3	0.6
6	6, 11, 12, 13	0.8
9	7, 8, 9, 10, 14	1

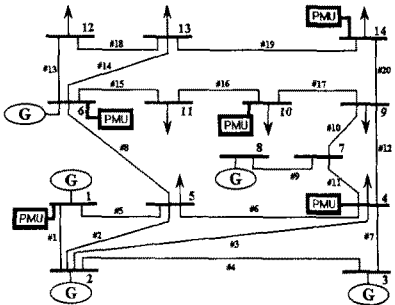


그림 3 초기배치 집합
Fig. 3 Initial Placement Set

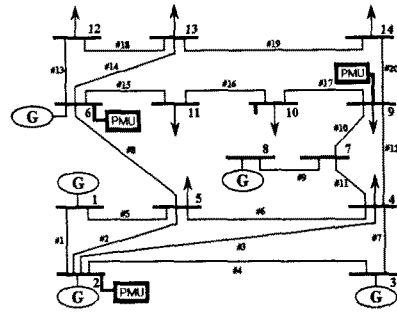


그림 4 최적배치 집합
Fig. 4 Optimal Placement Set

4.3 IEEE 30모선 계통

표 3 1기 PMU 상정사고시 관측불가능 지역
Table 3 Unobservable islands at one PMU contingency

최적배치집합	관측 불가능 지역	신뢰성지수
3	1, 3	0.5
6	2, 8	0.5
7	5	0.25
10	17, 21, 20, 22	1
12	13, 16	0.5
15	23	0.25
18	18	0.25
25	24, 26	0.5
27	29, 30	0.5

각 모델의 시험 해의 탐색공간을 비교하면 다음과 같다.

표 4 각 방법별 탐색공간
Table 4 Search space at each Method

모선	기존 SA방법	제한 SA방법	직접 조합 방법
6모선	$0.002 \times 2C1 \times 30 = 0.12$	$(2-1) \times 1 \times 30 \times 2 = 120$	$2C1 \times 2 \times 4 = 16$
14모선	$0.002 \times 14C4 \times 30 = 60.6$	$(14-4) \times 4 \times 30 \times 2 = 2,400$	$5C1 \times 4 \times 10 = 200$
30모선	$0.002 \times 30C9 \times 30 = 858.8429$	$(30-9) \times 9 \times 30 \times 2 = 11,340$	$11C2 \times 9 \times 21 = 10,395$

모델계통의 경우 초기 해에서 임의의 이웃 해를 선택하는 탐색공간으로 모선이 작은 경우, 기존의 SA방법이 적은 공간을 탐색하지만 계통이 커지면 조합의 수는 기하 급수적으로 증가하므로 기존의 SA방법은 탐색공간이 무척 커지게 된다. 그러나, 본 논문에서 제안하는 방법은 대규모 계통에서 기존의 SA방법보다 훨씬 적은 탐색공간과 소요시간으로 최적해를 찾을 수 있다.

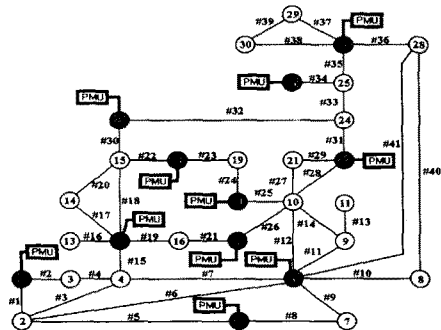


그림 5 초기배치 집합
Fig. 5 Initial Placement Set

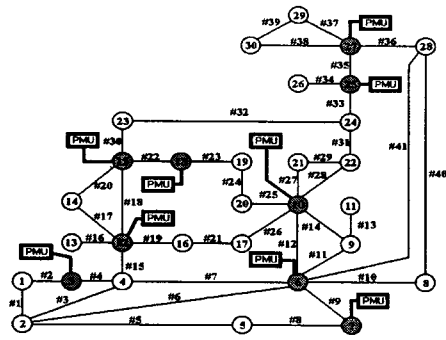


그림 6 최적배치 집합
Fig. 6 Optimal Placement Set

4.4 최적배치에 따른 상태추정 성능평가

본 논문에서 구현한 측정시스템의 최적배치를 또한 상태추정 성능을 평가하기 위해서 상태추정을 실시하여 제시하였다(표5).

표 5 기존 조류계산과 PMU 추정결과 비교
Table 5 Comparison of Power flow results with Estimation results

모선 번호	조류계산 결과		최소 배치집합 추정결과		최적 배치집합 추정결과	
	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

4.5 결과 고찰

계통의 규모가 커지면 최적의 해를 갖는 집합은 분명 다수가 존재하는데, 다수의 해 중에서 최적해를 선택하는 기준을 제공하는 것도 상당히 중요한 관심사이다. 가령 최적해 중 연결선로를 가장 많이 갖는 집합을 선택하면 상태추정의 결과는 상당히 적은 오차를 가질 것이다, 이때 가장 많은 연결 선로를 갖는 모선의 PMU에 상정사고가 발생하면 그 사고의 여파는 상당히 클 것이다. PMU의 상정사고시에 관측 불가능한 지역이 최소가 되는 것이 계통의 안정적인 운영을 위해서 바람직하기 때문에 본 논문에서는 30모선의 경우 다수의 최적해 중 각 집합에서 각 PMU의 상정사고시 가장 적은 관측 불가능한 지역을 갖는 해를 최적해를 선정하였다.

본 논문에서는 각 모선의 최적 배치집합 중 임의의 1기 PMU 상정사고시 전체계통의 신뢰성을 보장하기 위해서 추가되는 PMU는 6모선의 경우(1,3), 14모선의 경우(1,3,7,10,13), 30모선의 경우(1,5,8,13,17,20,22,23,26,29)으로, PMU가 모선의 2/3수준까지 필요함을 확인하였다. 경제성을 고려한다면 이러한 배치는 합리적이지 못한 것으로 고려된다. 따라서, 본 논문에서는 상정사고시 관측 불가능한 지역이 가장 많은 모선을 기준으로 신뢰성 지수를 설정하여 각 모선의 중요도를 평가하는 기준으로 제시하였다.

본 논문에서 제시한 방법들의 탐색공간은 모선이 클수록 탐색공간이 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 상당한 계산소요시간의 감소에도 불구하고 최적해를 찾는 데도 전혀 문제가 없었다. 계통에 PMU를 시설하면 동기화된 상태벡터를 직접 측정하여 기존의 복잡한 계산이 필요 없이 미지의 상태벡터를 쉽고 빠르게 추정할 수 있다. 또한 계통에 PMU의 수를 최소화

시설하여도 초기 해와 동일하게 상태벡터를 추정하였다.

본 논문의 PMU 최적배치 접근 방법은 단순히 네트워크의 토폴로지를 중심으로 하고 있다. 이러한 접근방식은 부하의 변동이나 인접 모선간의 상호 특성은 전혀 고려되지 못하고 있다. 따라서, 부하의 변동이나 인접 모선의 영향에 따른 계통의 변화는 반영을 하지 못하는 단점을 가지고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 PMU 측정시스템의 최적배치에 관한 연구로 조합 최적화 문제의 최적해를 제공하는 SA 기법의 온도관리 파라미터를 문제의 특성에 맞는 수학적 확률을 바탕으로 설정하여 최적해에 도달하였다. 또한 효과적인 탐색공간의 선정으로 계산시간을 현저히 감소시켰다. 직접 조합 방법으로 SA의 해를 증명하였으며, 위 세 가지 방법 중 가장 적은 탐색공간을 보여 주었다. 또한 시설된 PMU에서 얻어진 측정치 집합으로 정확하고 보다 쉽게 계통의 상태벡터 추정을 할 수 있음을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 PMU의 배치는 최소의 최적배치를 선정하였기 때문에 1기 PMU의 네트워크의 가관측성이 더 이상 보장되지 않으므로 이에 대한 고려와 해결방안을 모색할 필요가 있다. 본 논문에서는 임의의 1기 PMU 상정사고시에도 가관측성을 보장하는 배치를 연구하였으나, 그러한 배치는 모선의 2/3 수준의 PMU가 필요하며, 경제성을 고려하면 이러한 배치보다 각 모선의 신뢰성 지수를 설정하여 각 모선의 중요성을 제시하는 것이 합당하다고 판단하였다. PMU의 최소배치에 의한 상태추정은 만족할 만한 결과를 도출하였으나 PMU의 상정사고가 발생하면 더 이상 수리적인 방법으로 상태추정을 도출할 수 없기 때문에 PMU 상정사고시에도 학습기능을 갖는 AI를 이용하여 상태벡터 추정을 실시하는 것이 효과적이다.

(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", EPRI, pp. 139-143
- [2] 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
- [3] Rong-Liang, "A Fast Integer Algorithm For Analysis Using Network Topology", IEEE Transaction on Power Systems, VOL. 5, pp. 1001-1009, August 1990
- [4] 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
- [5] 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