

동기페이저측정기를 활용한 전력계통 상태벡터 결정을 위한 병렬처리기법

이 기 송 · 이 찬 주 · 조 기 선 · 신 종 린
 건국대학교 전기공학과

Parallel Processing Techniques to Determine State Vectors of a Power System using PMU

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

Abstract - This paper presents the linear model of the measurement system with Phasor Measurement Units (PMU's) and the parallel processing technique to determinate state vectors of a power system. The conventional model of the PMU measurement system is in a dilemma that it is not applicable to optimal PMU placements and it needs more PMU to apply this model. In order to improve this defect, in this paper, the extended linear model which adaptable to optimal PMU placements considering the feature of zero injection bus is proposed. Because the proposed model is expressed as over-determined measurement equation, the efficient algorithm is needed. This paper proposed the partitioning scheme and the process algorithm for parallel determinating state vectors of a power system efficiently. The performance of the proposed linear model and the parallel processing algorithm is evaluated with IEEE sample systems.

1. 서 론

전력계통의 제반 상태(state vectors)는 안정도 제어를 비롯한 전력계통 운용·제어의 중요한 입력변수로서, 모선 상태벡터의 품질은 곧 전력계통 제어행위의 신뢰도에 대한 근본적인 전제가 된다. 최근 GPS(Global Positioning System)를 전력계통에 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 실효성이 크게 두각을 보이고 있는 분야가 전력계통의 정밀 상태벡터 측정분야이다. 이는 GPS의 시각정보를 측정시각의 동기신호로 활용한 PMU(Phasor Measurement Unit)로 전력계통의 실시간 감시·제어 및 사고기록계에 활용하여 그 실용 가능성이 긍정적으로 평가되고 있으며, 이에 관련된 많은 연구가 진행되고 있다(1,2).

PMU는 정밀한 측정시각의 동기를 유지하면서 시설된 모선의 전압페이저와 모든 연결선로의 전류페이저를 측정한다. PMU 측정시스템은 기존 측정시스템에 비해서 1기 측정기가 갖는 측정치가 다량 함유한 측정시스템이므로, 기존 측정시스템과는 다른 접근이 요구된다. 또한 PMU측정시스템에 대한 측정시스템이 갖추어야 할 전반적인 제반사항을 면밀히 검토할 필요가 있다. 기존의 상태추정을 위한 측정시스템에 관련된 상태추정문제는 크게 불량 데이터(bad data) 해석, 위상수학적 가관측성(topological observability) 해석, 측정기 배치(meter placement), 고속 추정 알고리즘 등의 연구분야로 나뉘어 수행되고 있다. 따라서 PMU측정시스템도 전술한 4가지 형태의 관련사항에 대한 신중한 검토가 요구된다 하겠다. 이 중에서 위상수학적 가관측성 해석이나 측정기 배치 문제는 연구가 활발히 진행(3,4)되고 있는 반면 불량데이터 해석이나 고속추정 알고리즘에 대한 연구는 미흡한 상태이다. 본 논문에서는 이 중에서 PMU 측정시스템이 전력계통 상태벡터를 결정하는데 있어서 계산소요시간 향상을 위한 효율적인 처리방법에 대해서 논하고자 한다.

전력계통의 상태벡터는 크게 계획에 의한 적정한 물리적 가정을 통한 계산법과 측정치를 이용한 추정법으로 결정된다. 근본적으로 PMU측정시스템의 상태벡터 결정은 측정치를 기초로 하기 때문에 추정기법을 사용해야 하지만 PMU측정시스템의 측정치가 기존 측정치에 비해서 높은 측정시각의 동기성을 유지할 수 있어, 측정 데이터의 정확도가 보장되기 때문에, 계산법과 추정기법을 적절히 혼용하여 정식화될 수 있다. 이에 본 논문에서는 PMU 측정시스템의 상태벡터 결정에 PMU의 물리적인 특성과 모선의 특성을 고려하여 계산법과 추정기법을 혼용하여 정식화하였다.

PMU 측정시스템 모델은 Baldwin등이 PMU의 높은 측정정밀도를 기초로 선형모델을 제시한 바 있다(3). 제시된 모델은 PMU로 측정된 모선과 이 모선에 인접한 모선에 대한 관계식으로

그림 1의 의사측정범위A 이내의 모선에 대한 상태벡터만을 표현하기 때문에, 필요 이상으로 측정기를 배치해야 하는 문제가 발생되며, 영입력(zero injection)모선의 특성을 고려하여 최적 배치한 경우에는 제시된 정식화 수식을 적용할 수 없는 근본적인 문제점이 발생된다. 이에 본 논문에서는 PMU의 높은 측정 정밀도를 고려하여 선형모델을 사용하되 영입력모선의 특성을 고려하여, 측정기의 최적배치시나 임의배치시에도 적용상에 문제점이 없는 PMU 측정시스템의 측정모델을 정식화하였다. 본 논문에서 제시한 측정모델은 PMU 측정시스템의 적용범위를 그림 1의 의사측정 범위B까지 적용 가능한 측정모델이다.

효과적인 고속 처리 알고리즘은 주로 분할처리기법을 사용하여 수행된다. 기존 측정기에 의한 측정시스템은 계통을 분할 처리하기 위해서 추가적인 측정기가 요구되지만, 본 PMU측정시스템의 분할 처리를 위해서는 본 논문에서 제안한 선형모델을 사용하기 때문에, 추가적인 측정기 배치가 요구되지 않는다는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 PMU 측정시스템의 최대 계산소요시간 제약을 특정PMU의 계산소요시간으로 설정하고 임의의 개수로 계통을 분할하는 방법을 제안한다.

본 논문에서 제안한 선형모델과 분할처리기법의 타당성을 검증하기 위해서 IEEE 표본계통에 대한 사례연구를 수행하였으며, 본 논문의 결과는 PMU측정시스템의 설계시 하드웨어 고려사항으로 활용할 수 있을 것이다.

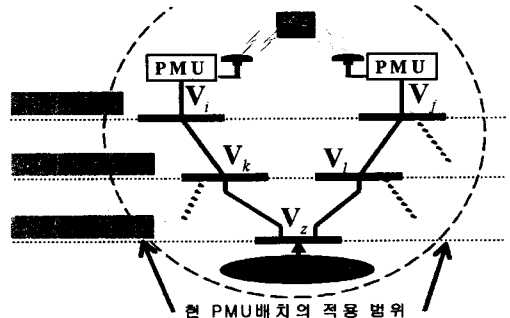


그림 1 PMU가 시설된 단순계통과 PMU의 측정범위
 Fig. 1 Simple system with PMU's and the coverage of PMU's

2. 전력계통 상태벡터 결정을 위한 정식화

k기 PMU가 시설된 n모선 계통을 고려해 보자. k기 PMU로 측정 가능한 페이저는 다음과 같이 유도할 수 있다. 먼저, 시설된 PMU 모선벡터 P는 식(1)과 같다.

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T \quad (1)$$

j번 모선에 PMU가 시설되어 있다면, $p_j = 1$ 이고 시설되어 있지 않으면 $p_j = 0$ 이다. 측정된 지로전류벡터는 I_{PMU} 벡터로 식(2)와 같이 정의하였다.

$$I_{PMU} = P^T \times NBIM \quad (2)$$

여기서 I_{PMU_i} : k기 PMU로 측정가능한 지로전류

$NBIM$: n모선계통의 절점-지로 접속행렬
(Node-Branch Incidence Matrix : NBIM)

P : 시설된 PMU 모션벡터

식(1)과 (2)를 이용하여 PMU로 측정 가능한 전압·전류페어의 개수는 각각 n_V, n_I 로 식(3)과 같이 유도할 수 있다.

$$n_V = \sum_{i=1}^n \beta_i, \quad n_I = \sum_{i=1}^n i_{PMU_i} \quad (3)$$

PMU로 측정되지 않은 미지 모선의 상태벡터를 결정하기 위해서 본 논문에서는 아래와 같은 선형모델을 제시한다. 우선 PMU로 구성할 수 있는 측정치 벡터는 식(4)와 같다.

$$Z = [Z_V \mid Z_I]^T \quad (4)$$

여기서 Z_V 는 $(n_V \times 1)$ 차원의 전압페어이고, Z_I 는 $(n_I \times 1)$ 차원의 전류페어이다. PMU측정치와 미지 상태벡터 사이에 다음과 같은 선형모델을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Z_V \\ Z_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_M \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_V \\ e_I \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 V_M 은 PMU로 측정된 모선의 전압페어($n_V \times 1$)이고,

V_C 는 PMU가 시설된 모선의 최소인접컷셋(Minimal Adjacent CutSet : MACS)에 해당하는 모선의 전압페어이다. 영입력(zero injection)모선에 대해서는 식(6)과 같은 선형관계식을 유도하였다.

$$\begin{bmatrix} PZ_V \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -Y_{ZM} & Y_{ZC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{MA} \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 V_{MA} 는 영입력모선에 대한 MACS의 전압페어이고, PZ_V 는 영입력 모선에 대한 MACS의 의사전압 페어이다. V_Z 는 영입력 모선의 전압페어로 식(5)에 의해서 상태벡터가 결정되지 않은 모선이다. 만일 해당 영입력 모선의 모든 MACS의 전압페어가 결정되어 있다면, 해당 영입력 모선의 전압페어는 식(6)를 통해서 결정할 수 있다.

식(5)와 식(6)의 각 부분행렬은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$Y_{IM} = M_{IB} Y_{BB} A_{MB}^T \quad (7)$$

$$Y_{IC} = M_{IB} Y_{bb} A_{CB}^T \quad (8)$$

$$Y_{ZM} = M_{ZB} Y_{bb} D_{MB}^T \quad (9)$$

$$Y_{ZC} = M_{ZB} Y_{BB} M_{MB}^T \quad (10)$$

$$Y_{BB} = Y_{bb} + Y_{bs} \quad (11)$$

여기서

$Y_{IM} [n_I \times n_V]$: 측정 노드에 대한 어드미턴스 행렬

$M_{IB} [n_I \times n_B]$: 전류측정치-지로 접속행렬

$Y_{BB} [n_B \times n_B]$: 선로 어드미턴스 행렬(대지충전용량 포함)

$Y_{bb} [n_B \times n_B]$: 선로의 직렬 어드미턴스 행렬(대지행렬)

$Y_{bs} [n_B \times n_B]$: 선로의 대지충전 어드미턴스 행렬(대지)

$A_{MB} [n_V \times n_B]$: 측정 모선-지로 접속행렬

$Y_{IC} [n_I \times n_V]$: 미 측정모선에 대한 어드미턴스 행렬

$A_{CB} [n_V \times n_B]$: 미 측정모선-지로 접속행렬

$M_{ZB} [n_Z \times n_B]$: 영입력 모선-지로 접속행렬

$D_{MB} [n_{MZ} \times n_B]$: 영입력모선의 MACS-지로 접속행렬

$Y_{ZC} [n_Z \times n_Z]$: 영입력모선에 대한 어드미턴스 행렬

$Y_{ZM} [n_Z \times n_{MZ}]$: 영입력모선의 인접모선에 대한 어드미턴스 행렬

그림 1은 실제 PMU 집합이 갖는 측정영역을 도시한 것이다. PMU가 시설된 모선의 상태벡터는 측정되고, 해당 시설모선의 인접모선은 식(5)를 통해서 추정할 수 있고, 영입력 모선을 갖는 경우에는 식(6)을 통해서 해당 PMU의 측정범위를 확장할 수 있다. 따라서 PMU를 계통의 전도선에 시설할 경우에는 최대로 $2n_B$ 개의 전류 측정치가 존재하게 되지만, PMU가 기존 측정기에 비해서 상대적으로 고가이기 때문에, 일반적으로 계통의 전 모선에 시설하지는 않고, 최적의 위치에 최소의 개수만큼을 시설하게 되는데 이를 최적PMU배치(Optimal PMU Placement)문제라 한다. OPP 문제의 해를 도출하면, 일부 모선의 상태벡터가 다수의 PMU로 결정될 수 있다. 즉, 각 PMU의 측정영역이 교차하는 부분이 발생된다. 이러한 이유로 식(5)의 계수행렬이 열에 비해서 행이 많은 우결정계(overdetermined system)로 표현되는 것이 일반적이다. 따라서 식(5)의 오차항을 최소화하는 최적해를 도출하기 위해서 의사역행렬(pseudo-inverse)을 도입할 수 있다. 의사역행렬을 이용하여 식(12)와 같이 그림 1의 의사측정범위A의 측정범위까지 모선의 상태벡터를 결정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_M \\ V_C \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IC} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_V \\ Z_I \end{bmatrix} \quad (12)$$

그리고 고려중인 PMU 집합 내에 존재하는 영입력 모선에 대해서는 식(6)을 이용하여 그림 1의 의사측정범위B까지 측정범위를 확장할 수 있고, 해당 영입력 모선의 상태벡터는 기 결정된 모선의 상태를 이용하여 결정된다.

3. PMU 측정시스템의 분할 처리

PMU는 기존의 측정기에 비해서 상대적으로 고가이므로 전력계통의 전 모선에 시설되지 않고 상태벡터의 정확도와 건설성을 고려하여 일반적으로 계통규모의 20~40%이내에서 시설하고 있다[3]. 이때 PMU의 관측범위를 최대로 유지하기 위해서 주로 연결지도가 많은 모선위주로 시설하게 되므로, 적절한 처리방법을 강구함으로써 전력계통의 상태벡터를 최대 지로수를 갖는 모선의 계산시간이내에서 결정할 수 있다. 또한 기존의 측정시스템에서는 계통을 분할하여 처리하기 위해서 추가적인 측정기가 요구되기 때문에, 초기에 이를 고려하여 측정기를 배치하고 있지만, PMU측정시스템은 본 논문에서 제안한 선형모델을 사용하고 있기 때문에, 추가적인 측정기가 요구되지 않는다. 본 절에서는 PMU측정시스템의 분할기법과 분할된 계통에 대한 상태벡터 결정과정을 기술한다.

• PMU 측정시스템의 분할기법

PMU측정시스템에 대한 전력계통 상태벡터의 병렬처리를 위해서 먼저, 본 논문에서는 최종 상태벡터 결정시간을 최대 지로수를 갖는 모선의 계산시간으로 설정하고, 전체 분할계통의 개수에는 제한을 두지 않았다. 이는 본 연구가 PMU측정시스템의 실제 시점에서 활용될 것이기에, 전체 하드웨어의 사양을 결정하는데 활용한다는 관점에서 이러한 가정을 도입하였다.

분할 계통의 가관측성을 보장하면서 전체 계산소요시간을 최대 지로수를 갖는 모선으로 제한하기 위해서, 본 논문에서는 그림2에 제시한 흐름도를 통해서 계통을 분할하였다.

• cluster당 상태벡터 결정

각 분할 계통은 PMU가 하나 이상 포함되어 있으며, PMU의 측정범위내의 모선으로 구성되어 있기 때문에, 개별적으로 가관측성이 보장된다. 따라서 본 논문에서 제안한 식(5),(6)을 적용할 수 있다. 이때 식(5)의 우변의 두 번째항인 오차항은 분할처리에 적용할 수 없다. 이는 각 분할계통의 미지수의 개수와 방정식의 개수가 동일하도록 설정되었기 때문이다. 따라서 식(5)의 오차항을 무시하고 개별계통의 PMU 시설모선과 그 인접모선은 다음 식(12)에 의해서 결정될 수 있다.

$$\begin{aligned} V_M &= ZV \\ V_C &= Y_{IC}^{-1} (Z_I - Y_{IM}Z_V) \end{aligned} \quad (12)$$

개별 분할계통의 상태벡터가 결정된 이후에는 각 cutset에 대한 상태벡터를 식(6)을 적용하여 결정한다. 이때 각 cutset에 대해서는 우결정계(overdetermined)로 정식화되므로 의사역행렬을 도입하여 cutset모선의 상태벡터를 결정할 수 있다.

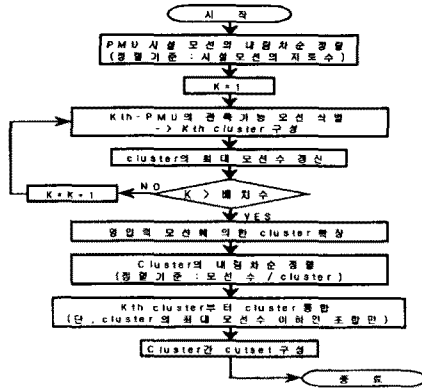
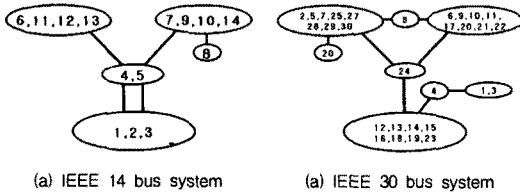


그림 2 제안한 분할 알고리즘의 흐름도
Fig. 2 Flowchart of the proposed algorithm for partitioning

4. 사례연구

본 논문에서 제안한 PMU 측정시스템의 선형모델과 분할처리 기법에 대한 타당성을 조사하기 위해서 IEEE 14, 30, 57 모선 계통에 대한 사례연구를 수행하였다. 각 사례연구에 사용된 PMU 측정시스템의 오차는 크기 0.004%, 위상각 ± 0.0216 의 랜덤오차를 가정하였다.

제안한 분할기법을 IEEE 14모선과 30모선계통에 적용한 결과는 그림 3에 제시하였다.



(a) IEEE 14 bus system (a) IEEE 30 bus system
그림 3 제안한 분할기법 적용 결과
Fig. 3 The results of performing the proposed partitioning procedure

분할 처리하지 않았을 경우와 분할하여 처리한 경우에 IEEE 14 모선계통에 대한 상태벡터는 랜덤오차에 대해서 100회 수행한 결과로 모선전압의 크기편차와 위상각 편차에 대해서 그림 4에 제시하였다.

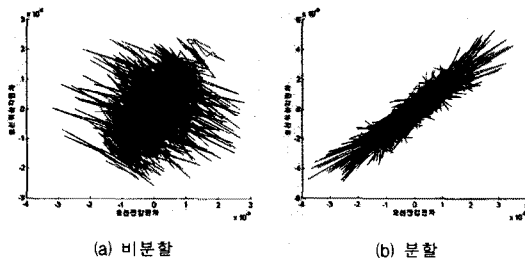


그림 4 모선 전압크기 대 위상각 편차곡선(IEEE 14모선 계통)
Fig. 4 Deviation curve of voltage magnitude vs phase angle

그림 4을 통해서 확인할 수 있듯이, 분할하였을 경우는 분할하지

않았을 경우에 비해 오차가 더 수반된다. 이는 개별 분할계통에 대한 상태벡터 결정과정에서 오차소거가 생략되었기 때문에 발생한 결과이다. 하지만 두 경우 모두 10^{-3} 이내의 상태벡터 정밀도를 유지할 수 있음을 확인하였다.

IEEE 57모선계통에 대한 분할 결과는 그림 5에 제시하였고, 상태벡터 결정 결과는 이전의 사례연구와 유사한 형태의 결과를 얻을 수 있었다.

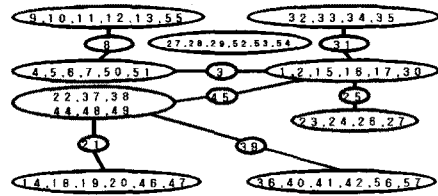


그림 5 제안한 분할기법 적용 결과(IEEE 57모선계통)
Fig. 5 The results of performing the proposed partitioning procedure (IEEE 57 bus system)

• 사례연구 고찰

사례연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) PMU의 측정오차를 전압의 크기에서 0.004%, 위상에서 ± 0.0216 를 가정하였을 경우에 본 논문에서 제안한 선형모델로 전압의 크기와 위상각에서 10^{-3} 이내의 정확도로 전 모선의 상태벡터를 결정할 수 있었다.
- 2) 제안한 분할기법을 적용한 결과 소규모 계통에서는 3개의 cluster로 분할이 가능하였고, IEEE 57모선의 경우는 9개의 cluster로 분할이 가능하였다. 제안한 분할 알고리즘은 분할계통의 개수에 대해 쉽게 갱신이 가능하기 때문에 PMU 측정시스템의 하드웨어 요구조건에 따라서 확장될 수 있었다.
- 3) 고속처리를 위해서 계통을 분할하였을 때는 PMU 인접모선의 오차소거 과정이 수행되지 않음으로써 2×10^{-3} 만큼 오차가 더 발생되었다.

5. 결 론

본 논문은 PMU 측정시스템의 선형모델과 상태벡터 결정의 고속 처리를 위한 분할처리기법을 제시하였다. 제안한 선형모델은 PMU 최적배치나 임의배치에 대해서도 모선의 특성을 반영하여 적용할 수 있었다. 제안한 분할처리기법은 cluster의 개수에 제약을 두지 않고 각 cluster당 계산부담량을 일치시키는 데 주안점을 둔 기법이다. 제안한 알고리즘은 cluster 개수의 제약문제로 쉽게 확장이 가능하기 때문에, PMU 측정시스템의 하드웨어 요구사항에 따라서 능동적으로 대처할 수 있다. 본 논문의 분할처리기법은 선형모델에 근거하고 있기 때문에, 그 효과에서는 크지 않지만, 향후 PMU 하드웨어 설계시에 활용하기 위한 취지로 수행되었다. 향후 계통 구성정보를 입력받아 개별 PMU가 바로 해당 측정범위 이내의 상태벡터를 결정하는 PMU 하드웨어에 대한 연구를 수행할 계획이며, 분할처리시에 오차의 영향을 최소화하는 방안에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Robert O. Bumett, 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
- [2] 조기선, 허문준, 채명석, 신종원, "GPS를 이용한 동기 페이저 측정 장치의 EMTP 모델 구현", KIEE Summer Annual Conference '99, pp. 1262-1266, 1999. 7. 19-21
- [3] 김재홍, 조기선, 김희철, 신종원, "페이저 측정 시스템의 측정기 최적 배치", KIEE Summer Annual Conference '99, pp. 1195-1198, 1999. 7. 19-21
- [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