

## 동기 페이저 측정치를 이용한 전력계통 매개변수 추정

송시철 · 조기선 · 신종린  
건국대학교 전기공학과

### Estimation of Power System Parameters using Synchronized Phasor Measurements

Shi-Cheol Song · Ki-Seon Cho · Joong-Rin Shin  
Konkuk University  
jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr

**Abstract** - Network parameters in power systems are indispensable for all of power system engineering studies, including the power flow calculation and the state estimation. The network parameters required for the studies, in general, are estimated by using several estimation techniques, since it is very difficult to measure. To improve the estimation accuracy of the network parameters, this paper adopts the synchronized phasor measurements which are acquired from the Phasor Measurement Unit with built-in GPS receiver. In this paper, the parameter estimation problem is formulated with over-determined nonlinear measurement equations and solved with Newton-Raphson method and pseudo-inverse. The effectiveness of the proposed parameter estimation with the synchronized phasor measurements is verified through some case studies with IEEE sample system. The results are very promising.

#### 1. 서 론

전력계통의 실시간 감시·제어 성능을 향상할 목적으로 최근 GPS(Global Positioning System)를 시각 동기원으로 활용한 동기페이저 측정장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. GPS의 시각신호는 기후조건에 관계없이 지구상 어느 위치에서건 24시간 내내 제공받을 수 있기 때문에 페이저 측정의 공통기준으로 충분히 활용이 가능하며, 여타 시각 동기원에 비해 동기정밀도가 매우 우수함이 입증되었다[1,2,3].

원거리 측정점들의 전력계통 상태벡터 측정을 GPS수신기를 탑재한 페이저 측정장치를 통해서 측정함으로써 고정밀 시각동기가 전제되어 측정점 간의 측정물리량의 비교분석이 가능하게 된다. 이러한 측정 물리량은 다양한 전력계통 운용 및 제어를 위한 입력데이터로 사용할 수 있으며, 사고 해석분야에서도 기존의 성능을 월등히 향상시킬 수 있다. 또한 정밀 동기측정 물리량을 이용하여 기존 전력계통의 정식화 모델에 대한 검증도 수행할 수가 있어서 전체적인 전력계통의 감시·제어 성능 즉 포괄적인 계통의 공급신뢰도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대되며, 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다 [1,2,3].

전력계통의 감시·제어 기능을 비롯한 모든 계통 운용상의 정식화 과정에서 전력계통의 매개변수는 기지않은 가장된 중요한 정보이다. 전력계통의 매개변수로는 전송선로의 임피던스, 변압기 탭비, 그리고 정지형 무효전력 보상기의 용량 등이 있다. 이들 매개변수는 계통의 상황에 따라서 변화하기 때문에 기지않은 가장하는 과정에서 매개변수의 특성에 맞는 기지않은 사용기간을 검토할 필요가 있다. 즉, 실시간으로 변화하는 매개변수에 대해서는 매개변수의 수치를 실시간으로 취득하여 활용해야 하며, 다소 일정기간 그 물리량이 변화하지 않는 매개변수에 대해서는 그에 상응하는 수치 취득과정을 거쳐야 함은 자명한 사실이다. 그럼에도 불구하고 이들 매개변수에 대한 정밀 측정이 곤란하여 주로 추정기법을 통해서 매개변수의 정확도를 확보하고 있다. 또한 매개변수로는 주로 변압기의 탭비나, 정지형 무효전력 보상기의 용량에 대해서 주로 연구되고 있으며 전송선로의 임피던스에 대한 연구는 미진한 상태이다[4,5,6,7,8].

전력계통 운용상에 수행되는 상태벡터 추정은 측정치의 오차보다는 매개변수의 오차에 의한 영향이 크다는 사실이 이미 알려져 있으므로[4,5,6,7], 매개변수의 정

확도를 확보하는 것은 전력계통 상태벡터 추정 결과의 신뢰성을 확보하는데 중요한 사안이다.

기존 전력계통의 매개변수 추정은 모선의 유입전력 측정치와 선로조류측정치로 구성된 측정치 집합을 통해서 상태벡터를 추정하고, 이를 기초로 하여 매개변수를 추정하는 접근방법이나 두 추정과정을 일괄하여 처리하는 접근방법을 취하고 있다[4,5,6,7]. 이러한 기존의 접근방법은 계통 매개변수를 결정하기 위해서 과도한 계산량이 요구되고 계산소요시간이 증가되는 문제점이 발생되며, 근본적인 문제점은 초기에 사용한 측정치의 측정오차가 추정과정에 누적될 수 있다는 것이다.

본 논문에서는 기존의 매개변수 추정 접근방법의 문제점을 보완하기 위해서 정밀 동시각성을 제공하는 GPS 수신기를 탑재한 페이저 측정장치를 측정기로 사용하고 이를 통해서 매개변수를 추정하는 접근방법을 제시한다. 이를 통해서 동기 페이저 측정치의 활용 가능성을 모색하였다.

본 논문에서 제시한 동기페이저 측정치를 이용한 매개변수 추정 성능을 평가하기 위해서 IEEE 표본계통에 대한 사례연구를 수행하여 기존의 매개변수 추정기법과 비교하였다. 또한 매개변수 별로 설정한 실시간 추정여부에 대한 타당성을 조사하기 위한 사례연구를 병행하여 그 결과를 검토하였다.

#### 2. 전력계통 매개변수 추정

GPS수신기를 탑재한 페이저측정장치를 통해서 측정된 동기페이저 측정치는 측정기가 시설된 모선의 전압페이저와 연결선로의 전류페이저이다. 이는 과거의 상태추정이나 조류계산을 통해서만 구할 수 있었던 모선의 위상각을 실시간으로 측정할 수 있음을 의미하며, 기존의 상태벡터 결정을 위해서 수행된 상태추정이나 계산상에 함유된 오차는 동기페이저측정을 통해서 배제할 수 있다. 이를 통해서 매개변수를 추정하면 보다 정확한 추정치를 얻을 수 있다.

##### 2.1 전력계통의 매개변수

전력계통의 매개변수로는 변압기 탭비, SVC용량, 그리고 전송선로(컨덕턴스, 서셉턴스, 대지충전용량) 등이 있다. 이 중에서 변압기 탭비, SVC는 매개변수로, 전송선로는 주로 매개상수로 가정하여 모든 감시·제어를 구현하고 있다. 전송선로로 비롯한 계통의 매개변수는 기후조건과 조류상태 그리고 실비의 사용기간 등 다양한 요인에 의해서 변화될 수 있기 때문에, 본 논문에서는 매개상수로 가정된 전송선로를 매개변수로 고려하고자 한다. 따라서 본 논문에서 전력계통의 매개변수로는 전송선로의 컨덕턴스, 서셉턴스, 대지충전용량, 변압기 탭비, 그리고 SVC용량등을 선정하였다.

##### 2.2 매개변수 추정을 위한 정식화

전술한 전력계통 매개변수에 대한 매개변수 벡터  $X$ 는 다음과 같다.

$$X = [LG, LB, Y, T, S]^T \quad (1)$$

여기서

- $LG$  : 선로 컨덕턴스,  $[LG_1, LG_2, \dots, LG_k]^T$
- $LB$  : 선로 서셉턴스,  $[LB_1, LB_2, \dots, LB_k]^T$
- $Y$  : 대지충전용량,  $[Y_1, Y_2, \dots, Y_k]^T$
- $T$  : 변압기 탭비,  $[T_1, T_2, \dots, T_i]^T$
- $S$  : SVC 어드미턴스,  $[S_1, S_2, \dots, S_j]^T$
- k : 지로수, i : 변압기수, j : SVC 수

동기페이저 측정기가 측정한 전압·전류페이저를 통해서 모선의 유입전력과 선로조류 측정치를 구성할 수 있으며, 이를 본 논문의 측정치로 선정하여 측정치 벡터  $Z$  를 다음과 같이 구성하였다.

$$Z = [P, Q, P_f, Q_f, Q_s]^T \quad (2)$$

여기서

- $P$  : 유효 유입전력,  $[P_1, P_2, \dots, P_n]^T$
- $Q$  : 무효 유입전력,  $[Q_1, Q_2, \dots, Q_n]^T$
- $P_f$  : 유효 선로조류,  $[P_{f1}, P_{f2}, \dots, P_{fk}]^T$
- $Q_f$  : 무효 선로조류,  $[Q_{f1}, Q_{f2}, \dots, Q_{fk}]^T$
- $Q_s$  : SVC 무효전력,  $[Q_{s1}, Q_{s2}, \dots, Q_{sj}]^T$
- n : 모선수, k : 지로수, j : SVC 수

측정치벡터  $Z$  와 매개변수벡터  $X$ 와의 관계식은 전력방정식과 전력조류방정식을 통해서 유도할 수 있으며, 각 측정치에 대한 매개변수와의 관계식은 식(3)과 같다.

$$P_i = F(LG_k, LB_k, T_i) \quad (3a)$$

$$Q_i = F(LG_k, LB_k, Y_k, T_i, S_j) \quad (3b)$$

$$P_{fi} = F(LG_k, LB_k, T_i) \quad (3c)$$

$$Q_{fi} = F(LG_k, LB_k, Y_k, T_i) \quad (3d)$$

$$Q_{si} = F(S_j) \quad (3e)$$

여기서 매개변수  $LG_k, Y_k, S_j$ 는 주어진 방정식과 선형이고,  $LB_k$ 와  $T_i$ 는 비선형 관계에 있다. 또한  $LB_k$ 와  $T_i$ 사이에는 선형관계가 있다. 따라서 매개변수와 전력방정식 내지는 전력조류방정식은 비선형 방정식으로 표현되는데 이는 변압기 탭비에 기인한다. 결국 변압기가 없는 특수한 상황에서는 고차원선형대수방정식으로 정식화가 이루어지기 때문에, 짧은 시간내에 매개변수가 결정될 수 있다.

이를 바탕으로 측정치벡터는 매개변수에 대한 비선형 함수  $Z = F(X)$ 로 정식화된다. 이를 부정형으로 표현하면 다음 식(4)와 같다.

$$Z - F(X) = 0 \quad (4)$$

식(4)를 해결하기 위해서 수렴특성과 계산소요시간을 고려하여 그 효율성이 우수한 Newton-Raphson기법을 사용하여 정식화하였다. 즉 초기치를 가정하고 식(4)의 좌변항이 감소하는 방향으로 반복계산 함으로써 해에 도달하도록 하였다.

임의의 초기치  $X_0$ 를 가정하고 이 점 근방에서 Taylor 급수로 전개한 후 1차항 까지만 사용하면,

$$F(X) \approx F(X_0) + H(X_0) \cdot \Delta X_0 \quad (5)$$

여기서  $H(X_0)$ 는  $X_0$ 에서 매개변수에 대한 전력방정식이나 전력조류방정식의 편미분이다.

식(5)를 매개변수에 대한 변분으로 정리하고, 다음 반복

값을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta X_0 \approx [H(X_0)]^{-1} \cdot [F(X) - F(X_0)] \quad (6)$$

$$X_1 = X_0 - \Delta X_0 \quad (7)$$

여기서  $\Delta X_0$ 를 구하기 위해서는  $H(X_0)$ 의 역행렬이 존재해야한다. 즉,  $H(X_0)$ 는 정방행렬(square matrix)이고, 특이행렬(singular matrix)이지 말아야 한다. 본 매개변수 추정문제에서  $H(X_0)$ 는 정방행렬이 안된다. 왜냐하면 추정할 미지수의 개수에 비해서 측정치의 개수가 훨씬 많은 우결정계(over-determined system)로 표현되기 때문이다. 따라서 바로 역행렬을 취할 수 없으므로 의사역행렬(pseudo-inverse)을 도입해야 한다. 식(6)에 의사역행렬을 도입하고 이를 일반화시키면 다음 식(8),(9)와 같은 반복구조 형태로 정식화 할 수 있다.

$$\Delta X_k \approx [H(X_k)^T \cdot H(X_k)]^{-1} \cdot H(X_k)^T \times [F(X) - F(X_k)] \quad (8)$$

$$X_{k+1} = X_k - \Delta X_k \quad (9)$$

초기치를 선정하고 식(9)를 반복 계산하는 과정에서  $X_k$ 의 상태값이 변화하지 않으면 ( $|X_k - X_{k+1}| \leq 10^{-5}$ ), 반복계산을 종료하고 이를 해로써 채택한다.

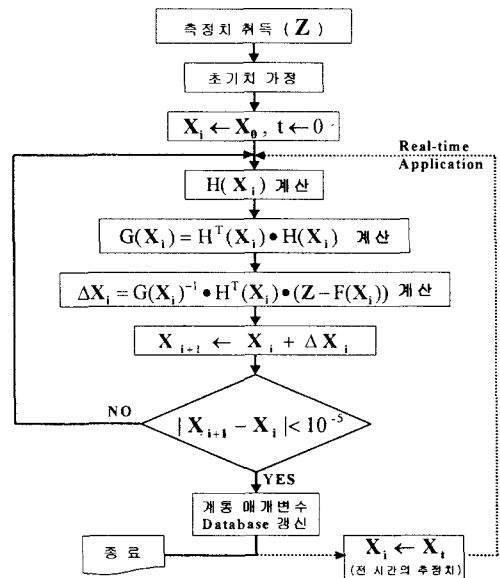


그림 1 제안한 매개변수 추정 흐름도

Fig. 1 Flowchart of the proposed parameter estimation

### 2.3 초기치 선정 및 제안한 매개변수 추정 절차

Newton-Raphson기법은 초기치에 민감함 특성을 보이는 접근방법이다. 따라서 주어진 매개변수 추정문제에 이러한 접근방법을 사용할 경우 초기치 선정문제를 검토할 필요가 있다.

먼저 변압기 탭비는 보정이 전혀 없는 상태로 1을 설정하고, SVC는 이상적으로 잘 설계된 계통이라면 투입되어 있지 않을 것이므로 SVC용량은 0으로 초기치를 가정한다. 전송선로 매개변수인 선로의 컨덕턴스와 서셉턴스, 그리고 대지충전용량은 현재 시설된 계통의 선로의 km당  $Q$ 값을 단위분율법으로 환산한 값을 초기치로 선정하였다. 실제 노후된 선로의 경우에는 이와는 다른

수치를 갖을 수 있으나, 초기치로 선정하는 데에는 무리가 없을 것으로 사려된다. 물론 Newton-Raphson 기법의 초기치 문제를 초기치에 둔간한 해법을 통해서 선행함으로써 극복할 수는 있겠으나 본 논문에서는 물리적으로 합당한 가정을 통해서 초기치를 선정하게 되었다.

전술한 정식화를 이용하여 제안한 전력계통 매개변수 추정과정에 대한 흐름도는 그림 1과 같다. 여기서 점선으로 표시된 부분은 실시시간이나 온라인으로 매개변수를 추정할 때의 흐름도이다.

### 3. 사례연구

본 논문에서 동기측정치를 이용한 매개변수 추정기법의 성능과 동기페이저 측정치의 활용방안을 모색하기 위해서 IEEE 표본계통에 대한 사례연구를 수행하여 그 결과를 기존의 선행연구와 비교함으로써 제안한 기법의 성능을 평가하였다. 먼저 측정치에 오차가 전혀 혼입되지 않은 상태에서 매개변수의 추정성능을 평가하고, 오차가 혼입된 경우의 성능도 평가하였다. 또한 off-line으로 매개변수를 추정할 경우의 추정성능에 대해서도 사례연구를 수행하였다.

#### 3.1 측정치의 오차가 없는 경우 매개변수 추정

본 논문에서 수행하는 매개변수 추정성능을 평가하기 위해서 먼저 측정치의 오차가 전혀 없는 상태에서 매개변수를 추정하였다. 표 1은 IEEE 14모선 계통에 대해서 오차의 혼입이 없는 측정치를 통해서 매개변수를 추정한 결과를 보이고 있으며, 그림 2는 추정오차를 나타내고 있다.

표 1 측정치의 오차가 없을 때 매개변수 추정결과  
Table 1 The results of parameter estimation on perfect measurements

	Conductance		Suseptance		Charging		Tap ratio	
	참	추정	참	추정	참	추정	참	추정
1-2	4.9991	4.9991	-15.2630	-15.2630	0.0264	0.0264		
2-3	1.1350	1.1350	-4.7818	-4.7818	0.0219	0.0219		
2-4	1.6860	1.6860	-5.1158	-5.1158	0.0187	0.0187		
1-5	1.0258	1.0258	-4.2349	-4.2349	0.0246	0.0246		
2-5	1.7011	1.7011	-5.1939	-5.1939	0.0170	0.0170		
3-4	1.9859	1.9859	-5.0688	-5.0688	0.0173	0.0173		
4-5	6.8409	6.8409	21.5785	-21.5785	0.0064	0.0064		
4-6	0.0000	-0.0000	-3.9679	-3.9679	0.0000	0.0000	1.0730	1.0730
4-7	0.0000	-0.0000	-4.7819	-4.7819	0.0000	0.0000	1.0225	1.0225
4-8	0.0000	-0.0000	-5.6769	-5.6769	0.0000	0.0000		
4-9	0.0000	-0.0000	-1.7979	-1.7979	0.0000	0.0000	1.0320	1.0320
7-9	0.0000	-0.0000	-9.0900	-9.0900	0.0000	0.0000		
9-10	3.9020	3.9020	-10.3653	-10.3653	0.0000	0.0000		
6-11	1.9550	1.9550	-4.0940	-4.0940	0.0000	0.0000		
6-12	1.5259	1.5259	-3.1759	-3.1759	0.0000	0.0000		
6-13	3.0989	3.0989	-6.1027	-6.1027	0.0000	0.0000		
6-14	1.4240	1.4240	-3.0290	-3.0290	0.0000	0.0000		
10-11	1.8808	1.8808	-4.4029	-4.4029	0.0000	0.0000		
12-13	2.4890	2.4890	-2.2519	-2.2519	0.0000	0.0000		
13-14	1.1369	1.1369	-2.3149	-2.3149	0.0000	0.0000		

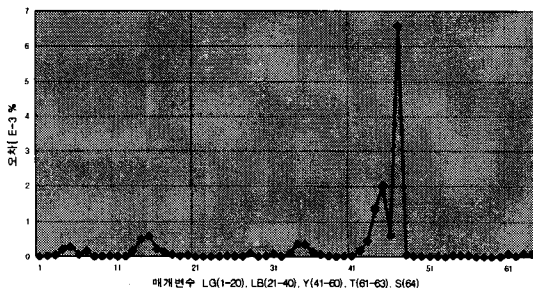


그림 2 측정치의 오차가 없을 때 매개변수 추정 오차 곡선  
Fig. 2 The error curve of parameter estimation on perfect measurements

표 1과 그림 2를 통해서 알 수 있는 바와 같이 측정치의 측정오차가 전혀 혼입되지 않는 경우에 매개변수 추정결과와 최대오차가 0.006581%로 매우 정확한 추정이 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 전력계통에 동기페이저 측정장치를 시설한 후 오차를 소거하여 최선의 측정치를 얻을 수 있다면 현재 전력계통의 매개변수를 정확하게 추정할 수 있다는 것이다.

#### 3.2 측정기에 오차가 혼입된 경우의 매개변수 추정

동기 페이저 측정치에 측정오차가 혼입되어 있을 때의 매개변수 추정 성능을 평가하기 위해서 3개의 표본계통에 대한 매개변수 추정 결과를 제시하였다. 동기 페이저 측정치에 혼입된 측정오차는 0.05%의 크기와 위상오차를 가정하였으며, 무작위로 오차를 생성하여 기존 전력조류계산의 결과에 부과함으로써 오차가 혼입된 측정치를 생성하였다.

##### 3.2.1 6모선-7지로 계통

6모선-7지로 계통에 대한 매개변수 추정결과는 표 2와 그림 3에 제시하였다.

표 2 6모선-7지로 계통의 매개변수 추정결과  
Table 2 The results of parameter estimation on 6bus-7branch system

	Conductance		Suseptance		Charging		Tap ratio	
	참	추정	참	추정	참	추정	참	추정
1-4	0.5583	0.5588	-2.58200	-2.58514	0.0070	0.0070		
1-6	0.4339	0.4347	-1.82746	-1.82962	0.0100	0.0100		
2-3	0.4449	0.4452	-0.84506	-0.84712	0.0000	-0.0000		
2-5	0.5765	0.5775	-1.30846	-1.30975	0.0000	-0.0000		
4-3	0.0000	-0.003	-7.51880	-7.52337	0.0000	-0.0000	1.1001	1.1001
4-6	0.5541	0.5574	-2.32494	-2.32756	0.0076	0.0076		
6-5	0.0000	0.0704	-3.33333	-3.40934	0.0000	-0.0000	1.0246	1.0241

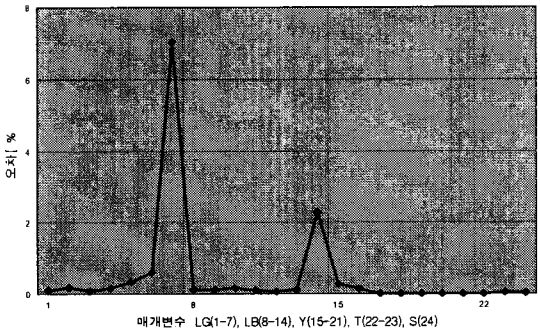


그림 3 6모선-7지로 계통의 매개변수 추정 오차  
Fig. 3 The error of parameter estimation on 6bus-7branch system

본 표본계통의 매개변수 평균 추정오차는 선로의 컨덕턴스의 경우 1.215%, 선로의 서셉턴스는 0.422%, 선로의 대지충전용량은 0.062%, 변압기 탭비는 0.0073%, 그리고 SVC 용량은 0.0046%였다. 하지만 그림 3을 통해서 확인할 수 있듯이 평균은 크지 않지만 일부 매개변수, 특히 선로의 컨덕턴스와 서셉턴스에서 상대적으로 큰 오차를 발생하였다.

##### 3.2.2 IEEE 14모선 계통

본 표본계통에 대한 매개변수 추정결과는 표 3과 그림 4에 나타내었다.

표 3 IEEE 14모선의 매개변수 추정결과  
Table 3 The results of parameter estimation on IEEE 14bus system

	Conductance		Suseptance		Charging		Tap ratio	
	참	추정	참	추정	참	추정	참	추정
1-2	4.9991	5.1390	-15.2630	-15.1876	0.0264	0.0263		
2-3	1.1350	1.1156	-4.7818	-4.7924	0.0219	0.0219		
2-4	1.6860	1.6840	-5.1158	-5.1180	0.0187	0.0187		
1-5	1.0258	1.0399	-4.2349	-4.2246	0.0246	0.0246		
1-5	1.7011	1.6853	-5.1939	-5.2078	0.0170	0.0170		
3-4	1.9859	1.9261	-5.0688	-5.1150	0.0173	0.0173		
4-5	6.8409	7.0089	21.5785	-21.5002	0.0064	0.0064		
4-6	0.0000	-0.003	-3.9679	-3.9646	0.0000	0.0000	1.0730	1.0730
4-7	0.0000	-0.031	-4.7819	-4.7522	0.0000	0.0000	1.0225	1.0226
4-8	0.0000	-0.006	-5.6769	-5.6469	0.0000	0.0000		
4-9	0.0000	-0.009	-1.7979	-1.7946	0.0000	0.0000	1.0320	1.0321
7-9	0.0000	0.0538	-9.0900	-9.10762	0.0000	-0.0000		
9-10	3.9020	3.9968	-10.3653	-10.1196	0.0000	-0.0000		
6-11	1.9550	1.9788	-4.0940	-4.1384	0.0000	-0.0000		
6-12	1.5259	1.5308	-3.1759	-3.1770	0.0000	-0.0000		
6-13	3.0989	3.1448	-6.1027	-6.0721	0.0000	-0.0000		
9-14	1.4240	1.3980	-3.0290	-3.0473	0.0000	-0.0000		
10-11	1.8808	1.8748	-4.4029	-4.3209	0.0000	0.0000		
12-13	2.4890	2.5979	-2.2519	-2.2009	0.0000	-0.0000		
13-14	1.1369	1.0842	-2.3149	-2.3612	0.0000	0.0000		

앞의 사례연구와 유사하게 평균 매개변수 추정오차는 선

로의 컨덕턴스는 1.9686%, 선로의 서셉턴스는 0.79%, 선로의 대지충전용량은 0.045%, 변압기 탭비는 0.00149%, 그리고 SVC 용량은 0.00226%를 얻었다. 이때 각 매개변수별로 최대의 추정오차는 각각, 5.3867%, 2.37%, 0.3924%, 0.014%, 그리고 0.03158%로 확인되었다. 이전의 사례연구와 마찬가지로 일부 매개변수에서 추정오차가 크게 발생되었지만 평균 1%이내의 매개변수 추정결과를 얻을 수 있었다.

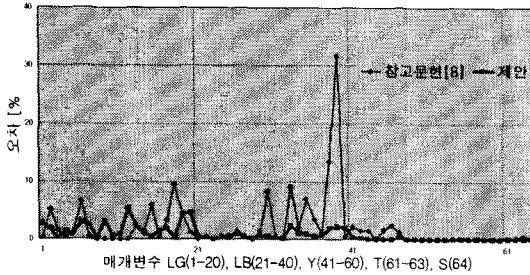


그림 4 IEEE 14모선 계통의 매개변수 추정 오차  
Fig. 4 The error of parameter estimation on IEEE 14bus system

기존의 매개변수 추정결과와 본 논문에서 제시한 추정결과를 비교·검토하기 위해서 그림 4에 참고문헌[8]에 제시된 매개변수 추정오차와 비교하여 도시하였다. 기존의 결과와 비교해서 본 논문에서 도출한 추정오차가 평균에서 뿐만 아니라 최대 추정오차면에서도 양호한 결과를 도출하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3.2.3 IEEE 30모선 계통

IEEE 30모선에 대한 매개변수 추정결과는 표 4와 그림 5에 제시하였다. 전술한 사례연구에 비해서 본 표본계통의 평균 및 최대 추정오차가 상대적으로 크게 발생되었다. 매개변수의 평균 추정오차는 선로의 컨덕턴스는 4.5366%, 선로의 서셉턴스는 3.8576%, 선로의 대지충전용량은 0.0297%, 변압기 탭비는 0.00089%, 그리고 SVC 용량은 0.004%였다.

표 4 IEEE 30모선의 매개변수 추정결과

Table 4 The results of parameter estimation on IEEE 30bus system

	Conductance		Susceptance		Charging		Tap ratio	
	참	추정	참	추정	참	추정	참	추정
1-2	5.2246	5.1416	-15.646	-15.707	0.0264	0.0263		
1-3	1.2437	1.2237	-5.0360	-5.1036	0.0204	0.0203		
1-4	1.7055	1.7622	-5.1973	-5.1705	0.0184	0.0183		
1-5	8.1954	8.9325	-23.530	-22.907	0.042	0.041		
2-3	1.1359	1.1528	-4.7724	-4.7597	0.0209	0.0209		
2-4	1.6861	1.6934	-5.1164	-5.1013	0.0187	0.0186		
2-5	5.4131	5.8245	-22.311	-22.550	0.045	0.045		
3-4	3.9540	3.8560	-2.4492	-2.5132	0.012	0.010		
3-5	3.5902	3.7391	-11.026	-10.883	0.0085	0.0085		
3-6	6.2893	3.9641	-22.012	-21.282	0.045	0.045		
4-5	0.0000	0.0778	-4.8076	-4.8752	0.0000	-0.000	0.9847	0.9849
4-6	0.0000	0.0216	-1.7985	-1.8055	0.0000	-0.000	1.0385	1.0384
4-7	0.0000	0.0127	-4.8076	-4.7938	0.0000	0.0000		
4-8	0.0000	0.0019	-9.0909	-9.0891	0.0000	0.0000		
4-9	0.0000	-0.010	-3.9062	-3.9057	0.0000	0.0000	0.9872	0.9872
4-10	0.0000	-0.007	-7.1423	-7.1606	0.0000	-0.000		
4-11	1.5295	1.5243	-3.1734	-3.1231	0.0000	0.0000		
4-12	3.6193	3.1009	-6.4007	-6.6059	0.0000	0.0000		
4-13	1.9520	1.9024	-4.1043	-4.2078	0.0000	-0.000		
4-14	2.4909	2.4933	-2.2508	-2.1828	0.0000	-0.000		
4-15	1.8675	1.7769	-4.386	-4.386	0.0000	0.0000		
4-16	1.8072	1.8444	-3.8914	-3.8849	0.0000	0.000		
4-17	3.0757	2.8780	-6.2187	-6.3823	0.0000	0.0000		
4-18	5.8823	5.8659	-11.784	-11.784	0.0000	0.0000		
4-19	7.6488	7.6488	-14.0813	-14.0813	0.0000	0.0000		
4-20	3.9560	3.9450	-10.317	-12.053	0.0000	-0.000		
4-21	1.0118	5.0939	-10.980	-11.562	0.0000	-0.000		
4-22	5.6191	2.6244	-5.6051	-5.6051	0.0000	-0.000		
4-23	16.7746	20.297	-34.127	-32.454	0.0000	-0.000		
4-24	1.9683	1.9022	-3.9760	-4.1272	0.0000	-0.000		
4-25	2.3405	2.5182	-3.9544	-4.0206	0.0000	-0.000		
4-26	4.4614	1.4734	-3.9544	-3.9544	0.0000	-0.000		
4-27	1.3099	1.3291	-2.2876	-2.0699	0.0000	0.0000		
4-28	1.2165	1.2123	-1.8171	-1.7677	0.0000	0.0000		
4-29	5.9694	1.9209	-3.7092	-3.103	0.0000	-0.000		
4-30	0.0000	0.0019	-2.5255	-2.5301	0.0000	-0.000		
5-6	0.9955	0.9924	-1.8810	-1.8667	0.0000	0.0000		
5-7	0.6573	0.6743	-1.2939	-1.3134	0.0000	-0.000		
5-8	8.9129	8.9743	-17.843	-17.843	0.0000	-0.000		
5-9	1.4440	1.6304	-4.5408	-4.2769	0.0214	0.0214		
6-28	4.3628	4.9523	-15.463	-14.714	0.0065	0.0065		

최대 추정오차가 발생한 매개변수는 6번 모선과 8번 모선을 연결하는 선로의 컨덕턴스(58%)와 21번 20번 모선을 연결하는 선로의 서셉턴스(53.7%)였다. 하지만 나머지 매개변수에 대해서는 평균 및 최대 추정오차가

정확하게 추정되었다.

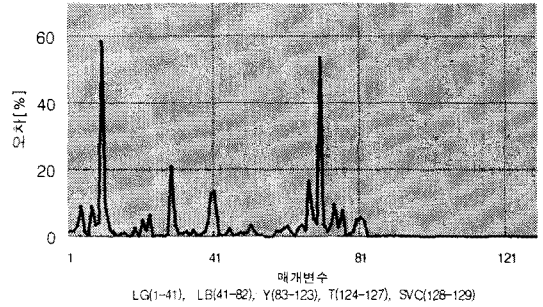


그림 5 IEEE 30모선 계통의 매개변수 추정 오차  
Fig. 5 The error of parameter estimation on IEEE 30bus system

### 3.2.4 사례연구 검토

표본계통에 대한 사례연구 결과, 동기 페이저 측정기의 측정오차를 고려한 매개변수 추정 성능은 대체적으로 양호한 결과를 얻었다. 즉, 선로의 컨덕턴스는 5%이내, 선로의 서셉턴스는 4% 이내로 추정할 수 있었으며, 선로의 대지충전용량과 변압기 탭비, 그리고 SVC 용량은 상대적으로 정확한 수치를 도출할 수 있었다. 하지만 추정오차가 상대적으로 큰 매개변수가 사례연구 계통에서 나타나고 있으며, 이에 대한 좀더 구체적인 원인 분석 및 대책수립이 요구된다.

### 3.3 매개변수 추정 효과 및 활용방안

본 논문에서 추정한 매개변수 및 동기 페이저 측정치의 활용방안을 모색하기 위해서 추정된 매개변수를 이용한 전력조류계산을 수행하고 동기 페이저 측정기로 측정된 데이터와 기존의 전력조류계산을 비교하였다. 전력조류계산은 IEEE 14모선 계통에 대해서 수행하였으며 그 결과를 표 5에 제시하였다.

그림 6.7은 동기 페이저 측정치와 추정한 매개변수를 이용한 전력조류계산의 전압과 위상각을 기존 전력조류계산 결과를 기준으로 도시한 것이다.

표 5 IEEE 14모선 계통의 상태벡터

Table 5 The state vector on IEEE 14bus system

	기존조류계산		동기 페이저 측정치		생성 조류계산	
	전압	위상각	전압	위상각	전압	위상각
1	1.0600000	0.0000000	1.0605194	0.0000000	1.0600000	0.0000000
2	1.0450000	-4.9809489	1.0446029	-4.9801519	1.0450000	-4.9992588
3	1.0100000	-12.071968	1.0102525	-12.7156734	1.0100000	-12.739299
4	1.0186234	-10.324222	1.0182770	-10.3254613	1.018264	-10.336713
5	1.0202637	-8.7825757	1.0201413	-8.7825757	1.020128	-8.7942819
6	1.0700000	-14.226553	1.0699893	-14.2245026	1.0700000	-14.237559
7	1.0619507	-13.368248	1.0622481	-13.3735953	1.062067	-13.384203
8	1.0900000	-13.368248	1.0904360	-13.3719912	1.0900000	-13.382523
9	1.0563459	-14.946601	1.0564833	-14.9464515	1.056367	-14.957265
10	1.0513278	-15.104324	1.0513279	-15.1025120	1.051234	-15.113734
11	1.0570818	-14.795264	1.0513209	-14.7902341	1.057166	-14.802357
12	1.0552201	-15.071424	1.0550302	-15.0811935	1.055030	-15.094285
13	1.0504425	-15.158939	1.0502745	-15.1531791	1.050267	-15.165907
14	1.0357947	-16.038934	1.0361573	-16.0467938	1.036088	-16.058450

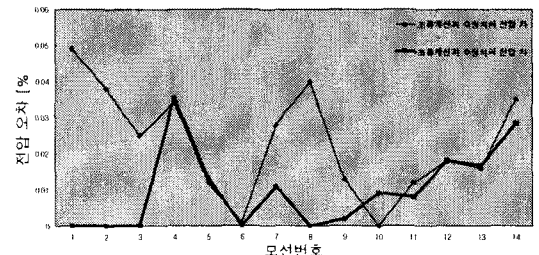


그림 6 IEEE 14모선 계통의 모선전압편차 곡선  
Fig. 6 The voltage deviation curve on IEEE 14bus system

그림 6에 제시된 바와 같이 모선전압의 경우 기존의 전

력조류계산 결과와 비교해서 동기 페이저 측정기로 측정 한 수치보다는 추정된 매개변수를 활용하여 상태벡터인 모션전압의 크기를 결정하는 것이 효과적이다.

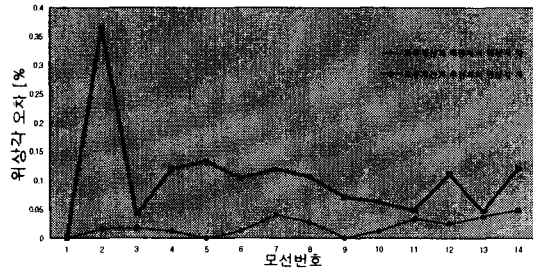


그림 7 IEEE 14모션 계통의 모션 위상각 편차 곡선  
Fig. 7 The phase angle deviation curve on IEEE 14bus system

측정된 위상각이 추정된 위상각에 비해서 오히려 실제 전력조류계산에 근접함을 그림 7을 통해서 확인할 수 있다. 즉, 전력계통의 상태벡터인 모션의 위상각은 추정된 매개변수를 이용하여 계산하기 보다는 동기 페이저 측정기로 측정된 수치를 상태벡터로 사용하는 것이 유리하다는 것이다. 종합하면, 모션 전압의 크기는 매개변수를 추정 한 후에 전력조류계산을 수행하여 결정하고 모션의 위상각은 동기 페이저 측정기가 측정한 수치를 사용하는 것이 합당하다고 할 수 있다.

#### 4. 고 찰

본 논문에서는 동기 페이저 측정치를 이용한 매개변수 추정에 관한 다양한 사례연구를 수행하였으며, 이를 종합하면 다음과 같다.

먼저 매개변수 추정의 성능을 평가하기 위해 동기 페이저 측정기의 측정오차를 배제한 상태에서 매개변수를 추정하였다. 사례연구 결과에서 확인한 바와 같이, 매우 정확하게 매개변수를 추정할 수 있었다. 이는 매개변수의 추정 성능이 바로 측정치의 오차에 좌우되며, 측정치가 정확할수록 매개변수의 추정 성능이 향상된다는 것을 의미하고 있다.

두 번째는 동기 페이저 측정기의 측정오차를 고려한 매개변수 추정을 수행하였다. 사례연구를 통해서, 선로 매개변수의 경우는 5%내외로, 변압기 탭비와 SVC는 1%이내의 정확도를 유지할 수 있음을 알 수 있었다. 하지만 평균오차의 대부분이 특정 매개변수가 좌우하고 있으므로 이에 대한 좀더 많은 원인 분석이 요구되고 있지만 평균적인 추정오차는 양호한 상태이다.

세 번째는 매개변수 추정의 효과와 동기페이저 활용방안을 모색하기 위한 사례연구를 수행하였다. 이 사례연구의 결과로서, 전력계통의 상태벡터를 결정하는 문제가 있어서 모션의 위상각은 동기 페이저 측정장치가 측정한 측정치를 사용하는 것이 정확하고, 모션전압의 크기에 대해서는 추정한 매개변수를 이용하여 전력조류계산 결과를 상태벡터로 사용하는 것이 정확도 면에서 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 추정한 매개변수는 상태벡터 뿐만 아니라 기타 전력계통 운용제어 기능의 입력 변수 및 입력 매개변수로 활용함으로써 기존 성능의 향상을 꾀할 수 있다.

#### 5. 결 론

본 논문은 GPS 수신기를 탑재한 페이저 측정장치를 통해서 측정한 동기페이저 측정치를 매개변수 추정에 활용하였다. 기존의 매개변수 추정기법은 측정치(유입전력, 선로조류)를 통해서 상태벡터를 추정하고, 이를 이용하여 매개변수를 추정하지만 본 논문에서 다루어진 동기 페이저 측정치를 이용하면 처음 추정과정을 생략할 수 있어, 추정된 매개변수의 정확도를 확보할 수 있다.

본 논문에서 도달한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 매개변수의 추정 성능은 측정치의 측정오차에 좌우되며, 측정오차를 줄임으로써 향상된 매개변수를 도출할 수 있다.
- (2) GPS 수신기를 탑재한 페이저 측정장치로 측정 한 동기페이저 측정치를 이용하여 매개변수를 추정하면 선로 매개변수의 경우는 5%이내, 변압기 탭비와 SVC용량은 1% 이내로 추정이 가능하였다.
- (3) 전력계통의 상태벡터를 결정하는 데 있어서 위상각은 동기 페이저 측정기로 측정한 데이터를, 전압의 크기는 추정된 매개변수를 이용한 전력조류계산을 통해서 결정하는 것이 정확도 면에서 유리하다는 것을 확인하였다.

동기 페이저 측정치를 이용한 전력계통 매개변수 추정은 정밀한 매개변수의 결정 뿐만 아니라 전력계통의 상태벡터를 결정하는 데도 활용할 수 있으며 GPS 수신기를 탑재한 페이저 측정장치는 매개변수 및 상태벡터의 정확도를 향상할 수 있음을 확인하였다.

#### (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) 신중린, 조기선, "GPS를 이용한 동기 페이저 측정장치의 EMTF모델 구현", KIEE Summer Annual Conference '99, pp.1262~1267, 1999.7.19~7.21
- (4) A.S.Debs, "Estimation of Steady-State Power System Model Parameters", IEEE Trans. on PAS, Vol.93, No. 5, pp.1260~1268, 1974
- (5) A.S.Debs, "Parameter Estimation for Power Systems in the Steady-State", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.19, No. 6, pp. 882~886, December 1974
- (6) Wen-Hsiung Edwin Liu, "Estimation of Parameter Errors from Measurement Residuals in State Estimation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.7, No.1, pp.81~89, February 1992
- (7) Wen-Hsiung Edwin Liu, swee-Lian Lim, "Parameter Error Identification and Estimation in Power System State Estimation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.1, February 1995
- (8) Masahiro Usui et al, "On-line Network Parameter Estimations using Global Positioning System", Trans. IEE Japan, Vol.117-B, No. 6, pp. 822~829, 1997