

배전계통 상태추정위한 의사측정치에 관한 연구

최승규 전영재 김훈 임태훈 김재철
* 송실대학교 ** 한국전력공사

A study on pseudomeasurement for distribution system state estimation

Choi Seungkyu Jeon youngjae Kim hoon Rim taehoon Kim jaechul
* Dept. of Electrical Engineering in Soongsil University ** KEPCO

Abstract - In this paper, pseudomeasurements have decided using real-time measurements and forecasting data in order to reduce the difference between accuracy of real-time measurements and pseudomeasurements.

A decided pseudomeasurement by means of the presented method can look for estimated solution as compared to conventional pseudomeasurement because there is no difference between accuracy of measurements.

The simulations are carried out for test systems and corresponding results are presented.

하여 실시간 측정정보보다 적은 가중치를 준다. 그러나 의사측정치와 측정 정보간의 정확도 차가 크면 상태추정 결과에 대한 신뢰도가 떨어지고 상태추정 연산 시 수렴을 못할 수 있다[3].

본 논문에서는 부하예측 자료에서 의사측정치를 결정해야 할 모선의 부하패턴을 구하고 이 값을 실측된 측정 정보에 적용하여 의사측정치를 결정하는 해법을 제시하고자 한다. 그리고 참고문헌 [9]에서 제시된 예제 배전계통을 이용하여 이 해법의 우수성을 보였다.

2. 상태추정의 수학적 모델과 측정함수

1. 서 론

과거 배전계통에서 조류계산은 선로 신설이나 확장을 위한 기본적인 자료로만 사용되었다. 하지만 산업화가 진행되면서 수용가의 전력 수요가 증가하게 되어 현대의 배전계통은 복잡해졌고 이런 선로를 효율적으로 운영하고자 실시간으로 선로를 제어하고 운용할 수 있는 배전 자동화가 진행되고 있다. 하지만 실시간으로 배전선로를 운영하기 위한 실시간 측정정보는 오차를 포함하고 있어 측정된 값을 바탕으로 선로를 제어하기 위한 조류계산은 계통 운용에 많은 문제점을 도출하게된다.

상태추정은 모선주입전력, 선로전력과 선로전류로 표현되는 전력계통의 출력 정보가 가지고 있는 오차를 여과하여 정확한 상태 값을 구하는 알고리즘이다. 이들 출력 정보는 전압 크기와 위상으로 표현되기 때문에 전력계통 상태추정에서 상태변수는 전압 크기와 그 위상으로 나타낸다.

1960년대 후반 F. C. Schweppe에 의해 상태추정 알고리즘을 전력계통에 처음 도입된 이래 많은 전력계통 상태추정에 대한 논문들이 발표되었으나 대부분 송전계통에 국한되었다[1,2,3]. 하지만 1990년대 미국에서부터 상태추정 알고리즘을 배전계통에 도입하려는 연구가 진행되었다. C. N. Liu와 M. E. Baran는 측정된 전력 정보를 매 단계마다 추정된 전압으로 나누어 얻은 전류 값으로 상태추정을 시도하였고, A. K. Ghosh은 조류계산의 확률적 확장을 이용하여 상태추정을 시도하였다[4,5,6]. 그리고 김홍래는 배전계통 상태추정을 위한 측정정보 집합에 선로전류를 포함하여 배전계통 상태추정을 시도하였지만 그 사용범위를 상태추정을 위한 충분한 측정여유도를 확보하지 못한 경우로 한정하였고, 김재철은 조류계산 해를 이용하여 측정된 선로전류를 복소 전류화하여 상태추정을 시도하였다[7,8]. 그러나 송전계통과 달리 배전계통 상태추정은 측정 정보의 수가 적어 실시간 측정정보만으로 상태추정을 시도하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 있다.

전력계통 상태추정에서 의사측정치는 상태추정을 위한 측정여유도를 늘려주고 가관측성을 확보해주는 역할을 하는데 일반적으로 부하예측 자료를 사용한다. 하지만 의사측정치는 추측된 값이므로 실시간 정보에 비해 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 그래서 의사측정치는 성능이 좋지 않은 측정기에서 측정된 측정 정보라 가정

2.1 상태추정의 수학적 모델

상태추정은 상태변수 x 에 대한 잔류 편차(residual)을 최소화하는 문제로 아래와 같은 2차 목적함수 식으로 표현 할 수 있다.

$$J(x) = [z - h(x)] \cdot W \cdot [z - h(x)] \tag{1}$$

여기서 z 는 측정 벡터이고 x 는 상태변수이며 W 는 측정 오차에 대한 가중치(weighting)이다. 그리고 $h(x)$ 는 상태변수 x 에 관한 비선형 함수이다. 그리고 가중최소자승법의 정규방정식은 식 (2)와 같다.

$$\Delta x' = (H^T(x') \cdot W \cdot H(x'))^{-1} \cdot H^T(x') \cdot W \cdot [z - h(x')] \tag{2}$$

여기서 $\Delta x'$ 는 $x^{(i+1)} - x^{(i)}$ 이고 반복법에 의해 상태변수가 정해진 수렴오차 내에 들어오면 그 값을 최적 추정 값으로 결정한다.

2.2 측정함수와 자코비안 행렬

측정함수는 측정된 측정정보의 양을 전압 크기와 위상으로 표현한 방정식이다. 전력계통 상태추정에서 사용되는 자코비안 행렬은 이와 같은 측정함수를 전압과 위상으로 편미분하여 구성된 행렬이다. 하지만 측정된 선로전류는 식 (3)과 같이 제곱근 형태의 측정함수로 표현되어 상태추정 연산 시 많은 문제점을 가지고 있고 또한 직접 상태변수로 미분하여 자코비안 행렬을 구성하는 것이 어렵다. 식 (3)에서 $|I_{km}^{meas}|$ 은 모선 k 와 m 사이에 흐르는 측정된 선로전류이고 $I_{km,R}$ 과 $I_{km,X}$ 은 선로전류의 실수부와 허수부이다.

$$|I_{km}^{meas}| = \sqrt{I_{km,R}^2 + I_{km,X}^2} \tag{3}$$

참고문헌 [8]에서는 배전계통 상태추정을 위한 충분한 측정여유도를 확보하고 전력계통 상태추정에서 선로전류 측정 정보를 활용하기 위하여 조류계산 해와 측정된 선로전류를 이용하여 선로 전류를 복소화 하였다.

$$\hat{I}_{km}^{mea} = \left| \frac{I_{km}^{cal}}{I_{km}^{cal}} \right| \quad (4)$$

식 (4)에서 \hat{I}_{km}^{mea} 은 모선 k와 m사이에 흐르는 추정된 복소 선로전류이고 I_{km}^{cal} 은 조류계산의 결과를 이용하여 계산된 복소 선로 전류이다. 이때 추정된 선로전류는 식 (5)와 같이 복소 전류 형태로 표현할 수 있다.

$$\hat{I}_{km}^{mea} = \hat{I}_{km,R} - j\hat{I}_{km,X} \quad (5)$$

식 (5)와 같은 전류를 등가적 선로전류라하며 이때 등가적 선로전류의 분산은 식(6)과 같이 결정된다.

$$Var(\hat{I}_{km}^{mea}) = Var\left(\left| \frac{I_{km}^{cal}}{I_{km}^{cal}} \right|\right) \quad (6)$$

3. 의사측정치

전력계통 상태추정에서 실시간 정보만으로 측정정보를 구성하는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 부하의 통계적 성질을 이용하여 비실시간 정보를 구성하고 이를 실시간 정보처럼 사용하는데 이와 같은 비실시간 정보를 의사측정치라 한다[1]. 일반적으로 부하예측 자료가 의사측정치로 사용된다.

실시간 정보가 부족한 배전계통에서 의사측정치의 역할은 중요하지만 추측된 값이어서 정확도가 실측된 정보에 비해 많이 떨어진다. 그래서 의사측정치를 성능이 떨어지는 측정기에서 측정된 정보라 하여 가중치를 실측된 정보보다 작게 부여하여 실시간 정보처럼 사용한다[5]. 그러나 사용되는 부하들은 그 양이 시간, 요일, 계절마다 다르고 모선에 한가지 형태의 부하만이 달려있는 것이 아니기에 기존의 해법으로 의사측정치를 결정하는 것은 많은 문제점을 발생할 수 있다. 특히 의사측정치와 실시간 정보간의 정확도 차가 크면 추정된 해를 신뢰할 수 없거나 상태추정 연산이 수렴을 못할 수 있는 문제점이 있다[3].

본 논문에서는 부하예측 자료와 측정된 정보를 이용하여 의사측정치를 결정하였다. 각 수용가의 형태가 고려된 부하예측 자료에서 각 모선의 부하 구성패턴을 결정할 수 있다. 부하 구성패턴은 고려되고 있는 배전선로에서 임의의 모선이 차지하는 비를 표현한 값이다. 선로 구간 손실률은 수용가의 전기요금 영수증등 사전에 미리 알 수 있는 정보이므로 이 정보와 부하 구성패턴 그리고 측정기에서 측정된 정보를 이용하면 정확도가 높은 의사측정치를 결정할 수 있다.

3.2 의사측정치 결정 예

그림 1에서 보이는 예제 계통을 상태추정을 하기 위해서는 bus 3,4,7,8,11,12에 대한 의사측정치를 결정해야 한다. 이때 변압기 2차측에서 측정된 유효전력은 고려되고 있는 배전선로 전체에 걸리는 유효전력과 같고 손실이 없는 선로라면 각 모선에서 부하쪽으로 주입되는 유효전력들의 합과 같지만 이는 현실적으로 불가능한 일이다. 하지만 우리는 사전지식으로 고려되고 있는 배전선로의 손실률 P_{Loss} 를 추정할 수 있으므로 우리는 근사적으로 부하쪽으로 주입되는 유효전력의 합을 알 수 있다. 식 (7)은 추정된 시점에서 의사측정치를 결정해야 할 모선들의 유효전력 합을 표현한 수식이다.

$$\sum \tilde{P}_{bus i} = P_{S1}^{mea} \cdot (1 - P_{Loss, S1}) - \sum P_{bus m}^{mea} \quad (7)$$

여기서 bus i는 의사측정치를 결정해야 할 모선들이고 m은 주입전력 측정기가 설치된 모선들이다. 그리고 $\frac{P_{S1}^{mea}}{P_{bus m}^{mea}}$ 는 측정기 S1에서 측정된 유효전력이고 $\frac{P_{bus m}^{mea}}{P_{bus m}^{mea}}$ 은 측정된

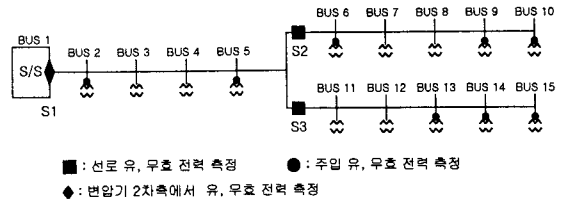


그림 1. 15모선 예제 계통 단선도

주입 유효전력이다. 식 (7)에서 의사측정치를 결정해야 할 모선들에서 부하쪽으로 주입되는 유효전력 합은 근사적으로 실제 사용되는 유효전력과 같다. 그러므로 이 값이 가지는 범위 내에서 의사측정치의 유효분은 결정되어야 한다. 이와 같이 고려되고 있는 선로에 흐르는 전력값과 손실률을 알고있으면 각 모선들에서 부하쪽으로 주입되는 전력들의 합을 알 수 있다.

전력계통 상태추정에서 측정된 전력정보에는 선로전력도 포함되는데 이 측정정보는 각 모선에서 부하쪽으로 주입되는 전력과 선로구간의 손실을 포함하게 된다. 그림 1에서 측정기 S2은 모선 6,7,8,9,10이 있는 선로에 흐르는 전력을 측정하고 측정기 S3는 모선 11,12,13,14,15가 있는 선로에 흐르는 전력을 측정한다. 그리고 측정기 S2과 S3에서 측정된 전력의 합과 S1에서 측정된 전력의 차는 모선 2,3,4,5가 있는 선로에 흐르는 전력이다. 즉 의사측정치를 결정해야 할 모선 3과 4는 S1과 S2, S3에서 측정된 전력의 합과 차에서 결정되고 모선 7과 8은 측정기 S2에서 그리고 모선 11과 12은 측정기 S3에서 측정된 전력에서 결정된다. 변압기 2차측에서 측정기 S2, S3 이전까지의 선로구역을 "A" 지역이라 할 때 모선 3의 의사측정치는 다음과 같이 결정된다.

단계 1. 모선 3의 부하 구성패턴을 부하예측 자료에서 결정한다. 여기서 P_{bus3} 와 P_{bus4} 는 모선 3과 4의 예측된 전력정보이다.

$$Kr_{bus3} = \frac{P_{bus3}}{P_{bus3} + P_{bus4}} \quad (8)$$

단계 2. 추정된 손실률 $P_{Loss,A}$ 와 측정된 선로 유효전력 그리고 모선에서 측정된 유효전력을 이용하여 모선 3과 4의 부하측에서 주입되는 유효전력의 합을 결정한다.

$$\tilde{P}_{bus3,4} = (P_{S1}^{mea} - P_{S2}^{mea} - P_{S3}^{mea}) \cdot (1 - P_{Loss,A}) - (P_{bus2}^{mea} + P_{bus5}^{mea}) \quad (9)$$

단계 3. 단계 2에서 구한 값에 단계 1에서 결정된 부하 구성패턴을 곱하여 모선 3의 의사측정치의 유효분을 결정한다.

$$\hat{P}_{bus3} = \tilde{P}_{bus3,4} \times Kr_{bus3} \quad (10)$$

단계 4. 선로구역 "A"에 흐르는 전력에 의해 역률을 결정하고 그 값으로 의사측정치의 무효분을 결정한다.

모선 7과 8 그리고 모선 11과 12의 의사측정치는 측정기 S1, S2의 측정정보를 위 단계에 적용하면 결정된다. 이때 손실률 $P_{Loss,S1}$, $P_{Loss,S2}$ 는 전기요금 영수증등과 같은 과거 자료에 의해 추정될 수 있다.

4. 사례 연구

제안된 해법의 우수성을 보이고자 참고문헌 [9]에서 제시된 31모선 예제 계통을 가지고 모의실험 하였다.

그리고 조류계산을 통하여 다른 형태 측정 정보의 참 값을 구하고 3%내에서 오차를 무작위로 발생을 하였다. 이때 오차는 가우시안 분포를 가진다고 가정하였고 또한 상태 값을 얻기 위한 모션 전압 크기와 위상의 허용오차 범위는 0.0001 p.u 로 정하였다. 그리고 상대추정을 위한 측정정보 집합 구성 시 선로전류의 측정정보는 참고문헌 [8]에서 제시된 해법을 이용하였다. 이때 전압은 단위법이며 전압 위상은 라디안(radian)으로 표시하였다.

첫 번째 모의실험에서는 측정정보 집합을 전압과 등가적 선로전류로만 구성하였다. 이 실험에서 전압과 등가적 전류만으로도 만족할 만한 추정 결과를 얻을 수 있다는 것을 표 2에 의해서 알 수 있다. 그리고 상대추정 결과에서 추정된 위상과 참 위상간의 차가 큰 것은 측정된 전압이 크기만 가지는 값이기 때문이다.

표1. 전압과 등가적 선로전류만으로 상대추정 - 수렴특성

반복 횟수	1	2	3	4
ΔX	0.09941378	0.01077738	0.00082340	0.00002585

표2. 전압과 등가적 선로전류만으로 상대추정 - 전압과 위상

모션번호	전압 크기		전압 위상	
	참값	추정된 값	참값	추정된 값
15	0.9091	0.9091	-0.1167	-0.1008
20	0.9353	0.9355	-0.0867	-0.0751
29	0.9786	0.9813	-0.0416	-0.0523

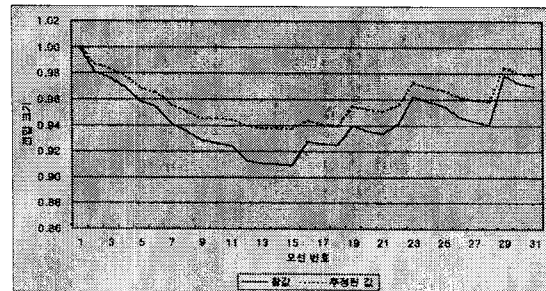


그림 2. 기존 해법에 의한 상대추정 결과 - 전압 크기

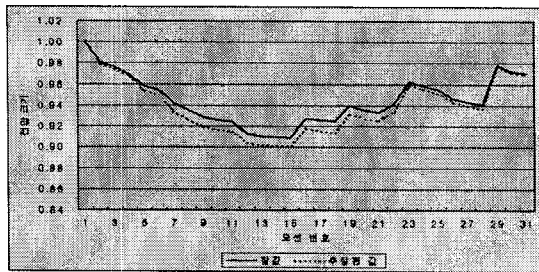


그림 3. 제안된 해법에 의한 상대추정 결과 - 전압 크기

두 번째 모의실험은 측정정보 집합에 의사측정치를 포함한 경우다. 그림 2와 그림 4는 부하예측 자료만으로 의사측정치를 적용한 결과이고 그림 3과 그림 5는 본 논문에서 제안한 해법에 의한 결과다. 결과에서 볼 수 있는 것처럼 제안된 의사측정치에 의한 상대추정 결과가 기존의 해법보다 정확한 추정 값을 구할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 배전계통 상태추정을 위한 의사측정치에 대하여 논의하였다. 배전계통에서는 상태추정을 위한 측정정보의 수가 적기 때문에 의사측정치의 역할이 매우 중요하다. 하지만 부하예측 자료에 의한 의사측정치와 측정된 정보와의 정확도 차가 크면 해를 신뢰할 수 없거나

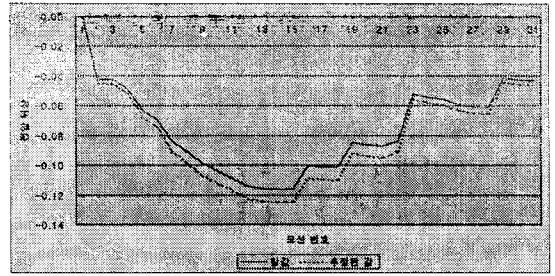


그림 4. 기존 해법에 의한 상대추정 결과 - 전압 위상

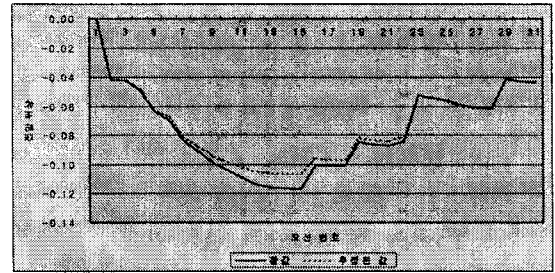


그림 5. 제안된 해법에 의한 상대추정 결과 - 전압 위상

수렴을 하지 못할 문제점을 가지고 있다. 그래서 본 논문에서는 측정된 정보와 부하예측 자료를 이용하여 의사 측정치를 결정하였다. 그 결과 부하예측 자료를 그대로 사용하는 것보다 측정 정보를 이용하여 결정된 의사측정치로 상태추정을 수행한 결과의 정확성이 좋음을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Fred C. Schweppe And J. Wildes, "Power System Static-State Estimation, Part : Exact Model", *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-89, No. 1, January 1970.
- [2] Robert E. Larson, et al, "State Estimation in Power Systems Part 1 : Theory and Feasibility", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No. 3, March 1970.
- [3] J.F.Dopazo, et al, "State Calculation of Power Systems from Line Flow Measurements", *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-89, No. 7, September / October 1970.
- [4] C. N. Lu and W. H. E. Liu, "Distibution System State Estimation", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 10, No. 1, February 1995.
- [5] Mesut E. Baran and Arthur W. Kelley, "A Branch-Current-Based State Estimation Method for Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 10, No. 1, February 1995.
- [6] Atish K. Ghosh, et al, "Distribution Circuit State Estimation Using a Probabilistic Approach", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 12, No. 1, February 1997.
- [7] 김홍래 외, "배전계통 상태추정기의 개발에 관한 연구", 대한전기학회 논문집, Vol. 47, No. 12, December 1998.
- [8] 김재철 외, "배전계통 상태추정에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회논문집, May 1999.
- [9] Jiryes J. Wakileh and Anil Pahwa, "Optimization of Distribution System Design to Accommodate Cold Load Pickup", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, January 1997.