

가중최소절대값을 이용한 변압기 탭 추정 알고리즘

김 홍래, 권 형석
순천대학교

An Algorithm for Transformer Tap Estimation by WLAV State Estimator

Hongrae Kim, Hyung-Seok Kwon
SoonChunHyang University

Abstract - This paper addresses the issues of the parameter error detection and identification in power system. The parameter error identification is carried out as part of the state estimation procedure. The weighted least absolute value(WLAV) estimation method is used for this procedure. The standard formulation of the state estimation problem is modified to include the effects of the parameter errors as well. A two step procedure for the detection and identification of faulted parameters is proposed. Supporting examples are given using IEEE 14 bus system.

1. 서 론

현대의 전력계통에서 안정적이고 경제적인 계통 운영을 위해 사용되는 응용 프로그램들의 성능 및 정확도 등은 계산에 사용되는 데이터의 질에 상당히 영향을 받게 된다. EMS(energy management system) 내에서 상태추정기는 여러 가지 계통 변수들에 대한 측정값과 계통 파라미터 값에 대한 정보를 이용하여 현재 계통의 정확한 상태 데이터를 제공하기 위해 사용된다. 세계적으로 전력산업의 구조개편이 이루어지고 있는 현재와 같은 상황에서는 지역적 한계비용(locational marginal price) 등의 계산을 위하여 상태추정기에 의한 정확한 실시간 전력조류 계산의 필요성이 더욱 크게 부각되고 있다[1].

전력계통에 파라미터 에러가 발생하면 그 에러가 상태추정의 결과에 미치는 영향은 불량데이터가 측정데이터에 포함된 것 이상으로 커질 수 있음에도 불구하고, 현재 이의 처리에 대한 연구는 매우 부진한 상태이다.

파라미터 에러의 처리에 관한 초기 연구는 Merrill과 Schweppe에 의해 이루어졌으며, 이들은 상태추정에서 사용하는 상태벡터에 계통 파라미터 전체를 새로운 상태벡터로 추가하여 상태추정을 수행함으로써 계통의 파라미터를 추정하였다[2]. 그러나, 이 방법은 추정하고자 하는 파라미터와 관련된 측정데이터의 여유도(redundancy)가 상당히 커야 하고, 새로운 상태벡터가 추가됨으로써 상태추정의 연산이 매우 복잡해지고 연산시간이 길어지는 큰 단점이 있다. 또한, 불량데이터가 측정데이터에 포함된 상황에서는 파라미터의 추정이 거의 불가능하다.

Debs는 Kalman filter를 이용한 순환 알고리즘(recursive algorithm)을 적용하여 계통 파라미터를

추정하는 방법을 제안하였다[3]. 이 방법에서는 계통의 파라미터를 상수로 취급하여 연산에 사용하였으나 실제 계통에서 계통의 파라미터는 시간에 따라 변할 수 있으므로 제안된 알고리즘에 타당성이 결여되어 있다고 할 수 있다. 더욱이 대형계통에 이 알고리즘을 적용할 경우, 상태추정의 연산과정에서 수렴성의 문제가 생길 가능성이 있다.

90년대에 들어서 Liu 등이 상태추정의 결과로부터 계산되는 측정 잉여오차(measurement residuals)에 근거한 파라미터 추정기법을 제안하였다. 이들은 상태추정과 파라미터 추정의 과정을 분리하여 계산하거나[4], 파라미터의 추종기법(tracking)을 사용하였으나[5], 두 가지 방법 모두 Merrill과 Schweppe의 방법과 마찬가지로 높은 측정여유도를 필요로 하기 때문에 계통의 가관측성(observability) 확보에 어려움이 예상된다.

본 논문에서는 변압기 탭의 상태에 대한 정보에 오차가 있어서 발생하는 파라미터 에러의 경우를 상정하여 그 에러를 판별하고 정확한 탭의 상태를 추정함으로써 정확한 상태추정이 이루어질 수 있는 기초를 마련한다.

2. 본 론

본 논문에서는 계통 내에 발생한 파라미터 에러를 판별하고, 그 정확한 값을 추정하기 위하여 2단계 방법을 사용한다. 먼저, 불량데이터에 영향을 받지 않는 특성을 가진 WLAV 상태추정기를 이용하여 상태추정을 수행한 후, 정규화 잉여오차(normalized residual)를 계산함으로써 파라미터 에러가 의심되는 변압기를 결정한다. 계통 내에 파라미터 에러가 발생하였다면 WLAV 상태추정의 결과는 오차를 포함하게 된다. 따라서, 상태추정에 이용한 측정데이터 중에는 의미 있는 정규화오차를 가진 데이터가 포함되며, 이 데이터들이 관련되어 있는 파라미터에 에러가 발생한 것으로 간주한다.

2.1 WLAV 상태추정 이론

WLAV 상태추정기의 목적함수는 다음과 같이 정의되며, 이 함수를 최소화하는 x 가 현재 계통의 상태를 나타낸다.

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i |z_i - h_i(x)| \quad (1)$$

식(1)의 목적함수는 다음의 선형계획 문제를 반복계산함으로써 최소화할 수 있다[6, 7].

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot (u_i + v_i) \quad (2)$$

$$s.t \Delta z^k = H(x^k) \cdot \Delta x^k + u - v \quad (3)$$

여기서, $\Delta z^k = z - h(x^k)$,

$H(x^k) = \partial h / \partial x$ at $x=x^k$,

$\omega_i = i$ 번째 측정값의 측정 가중치 (measurement weight),

$u, v =$ 음이 아닌 여유변수, $(u-v)$ 는 측정 오차.

WLAV 상태추정기는 그 특성상 계산결과에 대한 불량데이터의 영향은 식 (2)과 (3)의 계산과정에서 자동적으로 제거되고 정확한 측정데이터만으로 상태추정을 수행하게 된다. 따라서, 상태추정이 완료된 후 계산한 잉여오차가 허용한계보다 큰 측정데이터와 관련되어 있는 계통 파라미터에는 에러가 포함되었음을 의심할 수 있다.

2.2 상태추정 모델

2.2.1 변압기 모델

모선 k 와 m 간의 탭 절환 변압기(tap changing transformer)는 그림 1과 같이 모델링할 수 있다. 그림에서 y_{km} 은 두 모선간의 어드미턴스이고, t 는 탭비(tap ratio)이다.

그림 1과 같은 계통의 모선 어드미턴스 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \frac{y_{km}}{t} + \frac{1}{t} \cdot (\frac{1}{t} - 1)y_{km} & -\frac{y_{km}}{t} \\ -\frac{y_{km}}{t} & \frac{y_{km}}{t} + (1 - \frac{1}{t})y_{km} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{y_{km}}{t^2} & -\frac{y_{km}}{t} \\ -\frac{y_{km}}{t} & y_{km} \end{bmatrix}$$

2.2.2 측정함수(measurement functions)

(1) 모선 주입전력

n 개의 모선을 가진 계통에서 임의의 모선 k 에 주입되는 유효전력 및 무효전력에 대한 측정함수는 다음과 같다.

$$P_k = \sum_{m=1}^n V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}),$$

$$Q_k = \sum_{m=1}^n V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

여기서, V_k, V_m : 모선 k 와 m 의 전압의 크기,

θ_{km} : 모선 k 와 m 간의 전압 위상각의 차,

G_{km}, B_{km} : 모선 어드미턴스 행렬의 k 행과 m 열의 유효 및 무효 원소값.

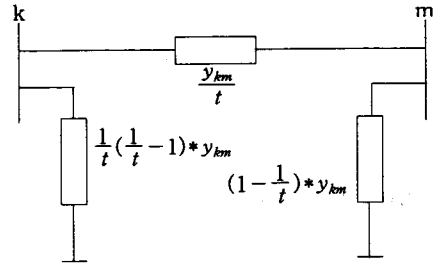


그림 1. 탭 절환 변압기의 모델

(2) 선로 조류전력

두 모선 k 와 m 사이를 흐르는 선로 조류전력의 측정함수는 다음과 같다.

$$P_{km} = V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) - V_k^2 (G_{km} - G_{km})$$

$$Q_{km} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) + V_k^2 (B_{km} - B_{km})$$

2.2.3 자코비안 행렬

자코비안 행렬 $H(x)$ 의 원소들은 측정함수를 전압의 크기와 그 위상각 그리고 변압기 탭에 대하여 편미분함으로써 구할 수 있으며, 그 개략적인 형태는 다음과 같다.

$$H(x) = \begin{bmatrix} 0 & \partial V_k / \partial V & \partial V_k / \partial t \\ \partial P_k / \partial \theta & \partial P_k / \partial V & \partial P_k / \partial t \\ \partial Q_k / \partial \theta & \partial Q_k / \partial V & \partial Q_k / \partial t \\ \partial P_{km} / \partial \theta & \partial P_{km} / \partial V & \partial P_{km} / \partial t \\ \partial Q_{km} / \partial \theta & \partial Q_{km} / \partial V & \partial Q_{km} / \partial t \end{bmatrix}$$

2.3 모의실험과 결과

상태추정은 반복연산법(iterative method)을 사용하므로 최초의 반복연산 단계에서 상태변수의 초기값을 지정해 주어야 하며, 모든 모선에서 전압의 크기와 전압 위상각에 대한 초기값으로 1.0 p.u.와 0° 를 각각 사용하였다. 파라미터 에러의 추정을 위한 두 번째 상태추정 연산에서는 탭 비에 대한 초기값이 필요하다. 본 논문을 통해 개발된 상태추정기는 이 탭 비의 초기값에 상당한 유연성을 가지고 있는 것이 모의실험 결과 확인되었으며, 0.99를 초기값으로 사용하였다.

개발된 파라미터 에러 추정 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 IEEE 14모선 계통에 파라미터 에러가 발생한 경우를 상정하여 모의실험을 실시하였다. 첫 번째는 변압기의 탭 비에 대한 정보가 오차가 발생한 경우이고, 두 번째는 변압기 탭 비 오차뿐만 아니라 불량 데이터가 동시에 발생한 경우이다.

2.3.1 모의실험 1 (변압기 탭 비 정보에 오차가 포함된 경우)

4번 모선과 9번 모선을 연결하는 변압기의 정확한 탭 비는 0.969인데 여기에 5%(0.92)와 10% (0.87)의 오차가 발생한 경우를 상정하고 모의실험을 수행하였다. 정규화 오차가 2.3이상인 측정데이터들을 찾아서 그들이 관련된 변압기를 결정하고 그 변압기의 탭 비를 새로운 상태변수로 추가하여 다시 한번 상태추정을 함으로써 정확한 탭 비를 추정하였다. 추정된 탭 비를 입력하여 상태추정을 수행하고 정규화오차를 검사함으로써 추정된 탭 비를 정확도를 검증하였다. 이 과정을 표 1에 정리하였다.

2.3.2 모의실험 2 (변압기 탭 비 오차와 불량데이터가 동시에 발생한 경우)

모의실험 1의 탭 비 오차 외에 선로 6-12의 조류 측정값도 오차를 포함한 경우를 모의하였다. 1단계 상태추정을 통해 표 2에 요약된 측정데이터들이 불량데이터로 검출되었으며, 4번과 9번 모선간의 변압기 탭 비에 오차가 있음이 확인되었다. 2단계 탭 추정과정에서 탭 비는 0.96892로 결정되었으며, 이 값은 실제의 탭 비와 비교하여 0.01%보다 작은 오차를 포함하는 정확한 값으로 개발된 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

3. 결론

계통의 현재 운용상태를 정확하게 추정하는 데에는 측정데이터와 파라미터 데이터의 정확도가 그 관건이 된다. 오차를 포함한 측정데이터 즉 불량데이터의 처리에 대해서는 그 동안 많은 연구가 이루어져 왔으나, 파라미터 데이터의 오차처리 문제는 몇몇 연구자에 의해서 한정적으로 수행된 것이 사실이다.

본 논문에서는 오차가 의심되는 탭 비를 새로운 상태변수로 지정하여 측정함수와 자코비안 행렬을 유도하고, 정확한 탭 비를 추정하는 알고리즘을 개발하였다. 완성된 상태추정기는 시험계통에 대한 모의실험을 통해 알고리즘의 타당성을 검증하였으며, 그 결과 탭의 오차뿐만 아니라 불량데이터가 포함된 경우에 있어서도 훌륭한 수렴특성과 정확도를 보여 주었다.

전력계통의 구조개편 또는 규제개혁이 세계적인 추세인 현 상황에서 계통의 운용상태를 정확하게 파악하는 일은 계통의 안정된 운용, 전력의 매매 및 가격의 결정, 운영의 효율화 등에 필수적인 일이며 따라서 상태추정기의 역할은 매우 중요하다. 본 논문의 결과로 오차를 포함한 탭 비를 정확하게 추정할 수 있게 됨으로써 좀 더 정확하고 신뢰도가 높은 상태추정이 가능하게 되었으며, 계통의 현재 운용상태에 대한 더욱 정확한 정보를 제공할 수 있는 기틀이 마련되었다.

변압기 탭 비의 추정뿐만 아니라 송전선로의 임피던스나 분로 리액터의 리액턴스 등과 같은 모든 계통 파라미터를 고려한 추정 알고리즘의 개발 등이 향후 연구과제이다.

표 1. 모의실험 1의 과정

	오차를 포함한 탭	
	0.92(5% 오차)	0.87(10% 오차)
$r_N > 2.3$	3.0278(Qflow 9-4) -2.645(Qflow 4-9)	9.462(Qflow 9-4) 8.056(Qinj 9) -7.887(Qflow 4-9)
tap _{est.}	0.96899	0.96899
탭 수정후 최대 r_N	-1.789(Qflow 14-13)	

표 2. 모의실험 2의 1단계 계산에 의한 r_N

측정데이터	계산된 r_N
Pflow 6-12	-13.208
Qflow 9-4	13.679
Qflow 4-9	-11.761
Qinj 9	3.597
Qflow 6-12	-3.490
Qinj 4	-2.340

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동 연구소 주관으로 수행되었음. (관리번호: 98-041)

(참고문헌)

- [1] PJM Interconnection, L.L.C., *PJM Open Access Transmission Tariff*, 1999.
- [2] H. Merrill and F. Schweppe, "On-line System Model Error Correction," *IEEE/PES Winter Meeting*, Paper No. C73 106-2, New York, New York, 1973.
- [3] A. Debs, "Estimation of Steady-State Power System Model Parameters," *IEEE Trans. on Power Appar. & Syst.*, Vol. PAS-93, pp. 1260-1268, 1974.
- [4] W. Liu, F. Wu and S. Lun, "Estimation of Parameter Errors from Measurement Residuals in State Estimation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 81-89, 1992.
- [5] W. Liu and S. Lim, "Parameter Error Identification and Estimation in Power System State Estimation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 200-209, 1995.
- [6] D. Luenberger, *Linear and Nonlinear Programming*, Addison and Wesley Publishing Co., 1984.
- [7] B. Kolman and R. Beck, *Elementary Linear Programming with Applications*, Academic Press, 1995.