

### 배전계통을 위한 분산형 상태추정 알고리즘

\*이상성 \*\*박종근 \*\*문승일 \*\*윤용태 \*\*\*문영현

\*차세대지역에너지연구소 및 전력시스템연구소(기초전력연구원), \*\*서울대학교 전기컴퓨터공학부, \*\*\*연세대

#### Distributed State Estimation Algorithm for Power Distribution System

\*S. S. Lee \*\*J. K. Park \*\*S. I. Moon \*\*Y. T. Yoon \*\*\*Y. H. Moon

\*RERI and PSRD (KESRI), \*\*Seoul National University, ShinLim-9Dong, KwanAk-Gu, Seoul, 151-742, Korea, \*\*\*Yons

**Abstract** - 배전계통 상태추정이란 배전계통을 운영하고 제어하기 위하여 모선전압, 선로조류, 모선부하와 같은 상태변수들의 측정된 값을 이용하여 여러가지 운영에 필요한 정보를 활용하고 배전계통으로부터 측정치에 기초하여 미지의 상태변수들을 추정하는 것이다. 변전소 제어센터에 있는 SCADA 시스템은 실시간으로 배전계통을 모니터링하고 제어하기 위하여 전력계통을 주기적으로 스캔하고 엄청난 양의 데이터를 획득하여 처리한다. 이들 측정값들은 유효전력, 무효전력, 전압, 전류, 스위치나 차단기의 상태들이다. 이들 데이터들은 중앙전력계통 제어센터나 지역제어센터로부터 산발되어 있는 정보를 대부분 RTU를 통하여 획득하게 된다. 이러한 이유로 배전계통의 상태추정은 송전계통과는 달리 배전계통 자체가 토폴로지상으로 산발되어 있을 뿐만 아니라 대규모이기 때문에 분산형으로 구성하여 처리하는 알고리즘을 필요로 한다. 본 논문에서는 배전계통에 대한 분산형 상태추정기의 알고리즘을 제안하고자 한다.

**Index Terms**-배전계통, 분산형 상태추정 알고리즘, 동기 분산형, 비동기 분산형, 분산형 불량 데이터 감지 및 추정

### 1. 서 론

오늘날 대규모 전력계통의 운영이나 제어에 있어, 운영자들은 계통망의 현재 상태를 모니터링하고 계통의 운영 목표와 맞추어 제어작용을 개시하고 모선전압크기, 선로조류, 그리고 모선부하와 투입과 같은 일련의 측정량에 의존하고 있다. 전력계통을 실시간으로 모니터링하고 제어하기 위한, 전력계통 제어센터의 SCADA 시스템은 전력계통을 주기적으로 스캔하여 수많은 측정데이터를 얻어야 한다. 이는 유효전력과 무효전력측정, 전압측정, 전류측정, 그리고 스위치와 차단기의 상태를 포함하고 있다. 이들 데이터들은 전체 전력계통을 통하여 산발되어 있는 RTU를 통하여 획득하고 있다. 그리고 긴 통신선로를 통하여 전력계통의 계통제어센터나 지역제어센터로 전달하게 된다.

전력계통 상태추정의 목표는 전력계통의 실시간 모니터링과 제어를 위하여 신뢰할 수 있고 정확하고 완전한 데이터 세트를 제공하는 것이다. 망의 토폴로지와 선로 모델 파라미터를 알고 가능한 측정을 진행하면 전력계통 상태추정은 모선 전압과 위상각을 포함하여 상태변수들의 정확한 추정을 할 수 있을 것이다. 복소모선전압, 정확한 망의 토폴로지, 선로 파라미터의 정확한 값, 모든 계통 정보의 정확한 값이 알려지면 계통의 정보는 전력 조류 방정식과 키르히호프 법칙으로 계산할 수 있을 것이다.

이상적인 상태추정 기법은 수치적 안정도, 계산 효율성, 수행의 복잡성에 대하여 좋은 성능을 나타내야 한다. 전력계통을 모니터링하고 제어하는 추정이론의 응용은 1970에 Schweppe와 Wildes에 의해 처음으로 제안되었

다[1]. 이는 현대 전력계통의 제어와 운영을 하는 데 있어 중요한 톨로서 동기를 수립한 이후에 전통적인 가중 최소자승(weighted least squares : WLS)에 기준한 상태추정기를 수식화하였다. 측정과 모델 오차로부터 발생하는 불확실성들은 또한 고려되었으며, 오차 감지와 추정 뒤의 필수적인 로직이 개발되었다. 이러한 기본적인 WLS 상태추정 기법은 정규방정식 상태추정기법으로 언급되었다[2,3]. Larson과 Tinney는 확장하여 WLS를 실 계통에 적용하여 실제 적용추진을 제시하였다. 단지 유효 및 무효 전력 조류로 이루어진 측정 집합을 가지고 Dopazo, et al은 계산산상의 이점과 추정상의 강인성 개선을 입증하였다. Merrill과 Schweppe는 장시간의 오차 분석 절차를 개선하기 위하여 불량데이터 억제(bad data suppression : BDS) 추정기로 알려진 개선된 WLS 추정기를 제시하였다. Schweppe와 Handschin은 실시간에 기준하여 구조의 모델링, 파라미터, 측정오차, 근원적인 오차 분석에 관한 근본적인 WLS 문제를 해결하는 다양한 시도로서 전력계통에 모든 측면의 WLS 추정에 대한 개념을 제시하였다[4]. Simoes-Costa와 Quintana는 Golub 기법으로 알려진 Householder 직교변환의 연속적인 응용으로 WLS 추정의 ill-conditioning 문제를 제거할 수 있는 절차를 제시하였다[5]. NE 상태추정기법의 불량조건을 없애기 위한 상태추정 방법은 직교변환 기법(Orthogonal transformation method), 혼합기법(Hybrid method), 정규방식의 제약기법(Normal equation with constraints method), Hachtel 증분행렬 기법(Hachtel augmented matrix method) 등이 있다. Irving, Owen과 Sterling은 선형프로그래밍(Linear programming : LP)을 도입하여 복잡함수가 잔류오차 모델의 합을 최소화하는 추정문제를 다루기 위하여 전력계통 상태추정에 가중 최소절대값(weighted least absolute value : WLAV) 기법을 도입하였다[6]. 다중지역의 LP 전력계통 상태추정을 위하여 El-Keib, et al은 Dantzig-Wolfe 분할알고리즘을 사용하였다[7].

### 2. 분산형 상태추정 기법 [8,9]

#### (1) 상태추정요소

그림 1과 같이, 비록 상태추정이 일반화된 조류계산과 비슷할지라도, 상태추정은 조류계산 보다도 훨씬 복잡하다. 상태추정을 계산하기 전에 측정 필터링, 망 토폴로지 해석, 그리고 관측성 분석과 같은 사전 작업들이 수행되어야 하며, 불량 데이터 감지와 추정은 상태추정의 정도를 더욱 개선하기 위하여 사용되어야 한다. 상태추정 프로그램은 일반적으로 그림 2에서 나타낸 바와 같이 4개의 요소들을 포함하고 있다. 불량 데이터 필터는 분명하게 한계를 벗어나는 불량 데이터를 없애기 위하여 SCADA 시스템에 추가되어야 한다. 망의 토폴로지 분석은 획득된 디지털 측정에 바탕을 두고 전력계통의 실시간 망 구조를 결정하는 데 사용한다. 망의 토폴로지 분

석은 실시간 전력계통 해석과 제어에 근본이 된다.

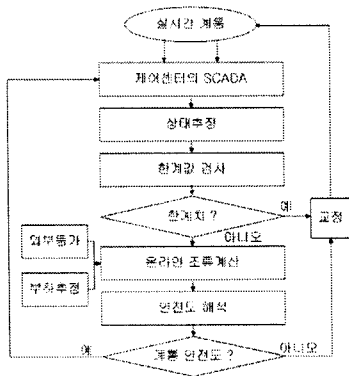


그림 1 전력계통의 상태추정

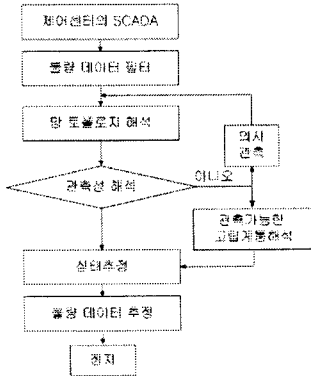


그림 2 상태추정의 주 요소

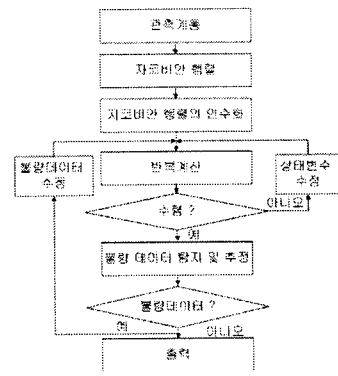


그림 3 상태추정의 신호흐름선도

관측성 분석은 계통의 망 토폴로지 분석에서 사용가능한 아날로그 추정과 결과물에 바탕을 두고 관측하는 것이다. 만일 전력계통을 관측할 수 없다면, 의사 측정을 통하여 계통을 관측할 수 있도록 분석이 추가되어야 할 것이다. 단지 시스템의 관측할 수 있는 부분들만이 추정될 수 있을 것이다. 관측성 분석방법은 위상구조적 방법과 수치해석적인 방법의 2가지가 있다. 위상구조적 방법은 계통을 통하여 물리적인 측정 분포상의 정보를 사용할 수 있지만, 수치적인 방법은 상태추정의 자코비안 행렬에 의해 제공되는 정보를 사용한다.

그림 3에서와 같이 상태추정 계산은 불량 데이터 탐지와 추정 과정을 포함하고 있다. 불량 데이터 탐지와 추정 은 측정 잔류오차의 분석에 바탕을 두고 측정 집합 내에서 불량 데이터를 탐지하고 추정하는데 사용한다. 만일 불량 데이터가 상태추정과정에서 탐지되었다면, 그 알고리즘은 불량 데이터 추정을 계속한다. 이러한 불량 데이터는 인단 추정을 심하게 손상시키고 상태추정에서 오차를 더욱 발생시키게 될 것이다. 그래서, 불량 데이터는 최종 상태추정 해가 얻어지기 전에 추정하여 제거할 필요가 있다.

정규방정식(Normal equation : NE)은 전력계통 상태 추정의 원리에 적용할 수 있는 가장 근본적인 상태추정 기법이다. NE 기법에 바탕을 둔 상태추정은 많은 상업용

EMS 패키지에서 폭넓게 수행되고 사용된다. 측정방정식은 다음 수식과 같다.

$$z = h(x) + v$$

(1)

가중 최소자승 상태추정은 다음 목적함수를 최소화한다.

$$J(x) = [z - h(x)]^T W [z - h(x)]$$

(2)

여기서  $W$ 는 가중치행렬( $m \times m$ ),  $z$ 는 측정벡터( $m$  차원),  $x$ 는 상태변수벡터( $2n-2$ 차원),  $v$ 는 요소들이 Gaussian 분포를 가진 랜덤변수인 측정오차벡터( $m$ 차원),  $h$ 는 측정  $z$ 와 상태변수  $x$ 의 관련 함수  $W = \text{diag}[1/\sigma_1^2, \dots, 1/\sigma_m^2]$ ,  $\sigma_i^2$ 는  $i$ 번째의 측정오차의 covariance이다. 측정 잔류오차벡터는 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta z(x) = z - h(x)$$

(3)

최소자승 상태추정은 다음의 정규 방정식을 반복하므로써 시스템 상태변수를 계산할 수 있다.

$$G(x)\Delta x = H^T(x)W\Delta z(x)$$

(4)

여기서  $G(x)$ 는 이득행렬,  $H = \partial h(x)/\partial x$ 는  $h(x)$ 의 자코비안이다. 그림 4에서 각각의 하위지역(subarea)에서는 subarea control center (SACC)에 의해 진행되도록 자신의 하위지역의 실시간 측정 데이터를 수집하는 자체의 SCADA 시스템을 가지고 있다.

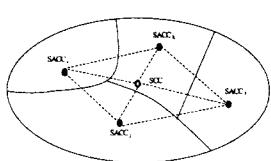


그림 4 전력계통 분할

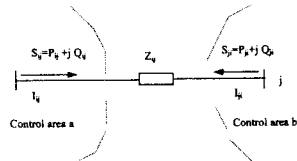


그림 5 경계 토폴로지 해석

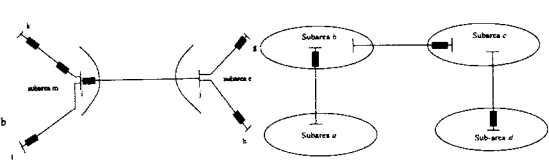


그림 6 비관측 측정 배열 그림 7 몇 개 경계추정 관측

그림 5는 두 인접 하위지역들의 위상학적 해석과정을 나타낸다. 그림 6은 분산형 상태추정이 경계모선과 타이 선로에서 측정배치를 위하여 요구조건이 더욱 엄격하다는 것을 나타내고 있다. 이러한 주된 이유는 분산형 상태 추정을 위하여 전체 계통내에 단지 하나의 기준모선이 있다는 것이다.

### (2) 분산형 상태추정

배전계통 조류계산과 유사하게 분산형 상태추정은 요소별 기법에 바탕을 두고 있다. 각각의 SACC는 분리하여 수집하여 하위지역에 상태추정을 계산할 수 있다. 요소해법을 이용하는데 어려움은 각 하위지역에 대하여 시

스템의 자코비안  $H$ 를 몇 개의  $H_i$ 로 나누기 위한 효율적인 방법을 찾는데 있다. 여기서, 분산형 조류계산과 유사한 절차를 선택하여 사용할 것이다. 첫째로, 자코비안 행렬  $H$ 의 원소들을 계산할 수 있기 때문에  $i$ 번째 하위지역의 외부 경계모선의 모든 상태변수를 포함하여 다른 하위지역의 모든 상태변수를 상수로 취급할 수 있다. 그래서 이들 상태변수들에 해당하는  $H_i$ 의 모든 원소들은 0으로 놓을 수 있다. 그래서, 부분 자코비안 행렬  $H_i$ 를 형성하기 위하여  $i$ 번째 하위지역의 타이 선로상의 측정을 포함하여  $i$ 번째 하위지역의 유효전력 및 무효전력을 측정하여 사용할 수 있다. 일단 SACCc간의 데이터 통신 지연이 고려되지만 하연 분산형 상태추정의 요소해법은 다음과 같은 반복 수식으로 표현할 수 있다.

$$G_i(x)(x^i(t))\Delta x_i = H_i^T(x^i(t))\Delta z_i(x^i(t)) \quad i=1, \dots, N \quad (5)$$

여기서  $x^i(t)$ 는  $(x_1(r_1(t)), \dots, x_N(r_N(t)))$ 이다. 병렬 상태추정 과 분산형 상태추정의 차이점은 SACCs간의 예측할 수 없는 통신 시간 지연을 고려할 수 있다는 것이다.

#### 1) 동기 분산형 상태추정

만일 어떤  $i$ 와  $j$ 에 대하여  $r_j(t)=t$ 가 존재한다면 (5)는 동기 분산형 상태추정을 나타낸다. 동기 분산형 상태추정 계산에 있어, 컴퓨터들은 같은 프로세싱 단계로 동기화될 것이다. 그러므로, 더 빠른 컴퓨터는 더 느린 기기에 대해 기다려야 할 것이다. 이러한 해의 처리과정에서는 경계 모션들의 상태변수들만이 교환되어야 할 것이다. 각각의 SACC에서 컴퓨터는 인근 SACCs로부터 경계 변수 정보를 받은 이후에 즉시 다음의 반복시간으로 진행해야 할 것이다.

#### 2) 비동기 분산형 상태추정

SACCs 중에 데이터 통신지연  $r_j(t)$ 가 부분적으로 비동기로 될 경우에 (5)는 부분적 비동기 분산형 상태추정으로 될 것이다. 유사하게, 데이터 통신 지연  $r_j(t)$ 가 전체적으로 비동기로 될 때 (5)는 전체적으로 비동기 분산형 상태추정으로 될 것이다.

#### 3) 분산형 불량 데이터 감지 및 추정

불량 데이터 감지 및 추정은 분산형 상태추정이 완료된 이후에 진행된다. 이 과정은 병렬 상태추정과 비슷하다. 여기서 단지 차이점은 잔류서브벡터가 프로세스 보다 실제된 컴퓨터로 보내진다는 것이다. 이 컴퓨터는 이들 서브벡터들을 요약하여 분산형 상태추정에 사용하고 측정집합 안에 어떤 불량 데이터가 있는지를 판단한다.

#### 4) 분산형 상태추정의 수렴 분석

광의적으로, 상태추정은 특별한 종류의 조류계산이라 할 수 있다. 그러므로, 분산형 조류계산의 수렴 분석에 기준하여  $\phi = (\phi_1, \dots, \phi_n)$ 인 반복맵핑함수  $\phi: R^n \rightarrow R^n$ 이고,  $n$ 는 반복맵핑함수  $\phi$ 의 차원이라 가정한다. 역시,  $\phi_i: R^n \rightarrow R^n$  ( $i=1, \dots, n$ )는 분산형 상태추정의 요소 반복맵핑함수이고,  $n_i$ 는 반복맵핑함수  $\phi_i$ 이다. 분산형 상태추정은 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$\phi(x) = x + H^T(x)W(z-h(x)) \quad (6)$$

(6)에 따라, 분산형 상태추정을 더욱 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$\phi_i(x) = x_i + G_i^{-1}(x)H_i^T(x)W_i\Delta z_i(x) \quad i=1, \dots, N \quad (7)$$

다음에 분산형 조류와 유사한 절차를 사용하여, 분산형 상태추정의 수렴을 분석한다. 먼저, 다음과 같이 나타낸다.

$$g(x) = H^T(x)W(z-h(x)) \quad (8)$$

가중치 최소자승상태추정은 조류계산과 비슷한 형태를 갖는다. 분산형 조류계산의 수렴 조건에 따라, 부분적인 비동기 분산형 상태추정은 만일  $\phi$ 가 저가의 맵핑함수라면 수렴하게 될 것이다. 전체적으로 비동기 분산형 상태추정은 만일 맵핑함수가 블록 최대 정규 수축맵핑이라면 수렴하게 될 것이다. 그래서, 분산형 상태추정은 다음과 같은 수렴정리를 가지게 될 것이다.

만일 분산형 상태추정함수 반복 맵핑함수  $\phi$ 가 블록 최대 노름 수축맵핑이라면, 전체적인 비동기 분산형 상태추정은  $\phi$ 의 고정점으로 수렴할 것이다. 그러나, 만일 반복 맵핑함수  $\phi$ 가 블록 최대 정규수축맵핑이라는 것을 보장하기가 어려우면 다음의 정리가 필요할 것이다.

만일 요소반복 맵핑함수  $\phi$ 가 지역상태변수  $x_i$  ( $i=1, \dots, N$ )에 대하여 블록 최대노름 수축맵핑이라면, 전체적인 비동기 분산형 상태추정은  $\phi$ 의 고정점으로 수렴할 것이다. 부분적인 비동기 분산형 상태추정을 위한 수렴정리는 다음

과 같이 정의할 수 있다. 상태추정 반복 맵핑함수  $\phi: X \rightarrow R^n$ 은 만일 부분적으로 비동기 가정을 유지할 수 있다면 non-expansive하다고 할 수 있다. 그래서 부분 비동기 상태추정에 의해 발생하는 수열  $\{x(t)\}$ 는 고정점  $x^* \in X^*$ 으로 수렴할 수 있을 것이다. (6)은 다음형태로 변화시킬 수 있다.

$$\phi_i(x) = x_i - G_i^{-1}(x)H_i^T(x)W_i(h_i(x) - z_i) \quad (9)$$

다음에서 (7)의 수렴조건을 분석한다. 만일  $h(x)$ 와  $H(x)$ 의 2차도함수를 무시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(x) = G_i^{-1}(x)H_i^T(x)W_i(h_i(x) - z_i) \quad (10)$$

$$\partial s(x)/\partial x_i = G_i^{-1}(x)H_i^T(x)W_iH_i(x) = E \quad (11)$$

그래서, 만일  $D = \partial s(x)/\partial x_i$ 로 놓으면,  $D$ 는 대각상 우월하다.  $D$ 의 대각요소의 최대값이  $\kappa$ 라면, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 만일  $D$ 가 대각상으로 우월하고  $\gamma$ 가  $(0, 1/\kappa)$  내에 있다면, 전체적인 비동기 상태추정은  $\phi(x)=0$ 의 고정점으로 수렴할 것이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 배전계통을 위한 분산형 상태추정기의 알고리즘을 분류하였다. 배전계통의 상태추정은 송전계통과는 달리 배전계통 자체가 토폴로지상으로 산발되어 있을 뿐만 아니라 대규모이기 때문에 분산형으로 구성하여야 하며 동기 분산형 상태추정, 비동기 분산형 상태추정, 분산형 불량 데이터 감지 및 추정을 기본 이론을 필요로 한다. 불량 데이터 감지 및 추정은 분산형 상태추정이 완료된 이후에 진행된다. 마지막으로 분산형 상태추정의 수렴 분석을 논의하였다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제이며 관계 기관에 감사드립니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] F. C. Schweppe and J. Wildes, "Power system static-state estimation, Part I: Exact Model", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 89, No. 1, pp. 120-125, Jan., 1970.
- [2] R. Larson, W. Tinney, and J. Peschon, "State estimation in power systems, Part I: Theory and Feasibility", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS 89, No. 3, pp. 345-352, Mar., 1970.
- [3] R. Larson, W. Tinney, L. Hajdu, D. Piercy, "State estimation in power systems, Part II: Implementation and Applications", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS 89, No. 3, pp. 352-363, Mar., 1970.
- [4] F. C. Schweppe and E. Handschin, "Static state estimation in electric power systems", *Proceedings of IEEE*, Vol. 62, No. 7, pp. 972-982, July, 1974.
- [5] A. Simoes Costa and V. H. Quintana, "A robust numerical technique for power system estimation", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 2, pp. 691-698, Feb., 1981.
- [6] M. Irving, R. Owen, and M. Sterling, "Power system estimation using linear programming", *Proceedings of IEE*, Vol. 125, No. 9, pp. 879-885, Sep., 1978.
- [7] A. El-Keib, et. al, "A decomposed state estimation technique suitable for parallel processor implementation", *Proceedings of IEEE/PES Summer Meeting*, San Diego, CA, July, 1991.
- [8] A. Monticelli, "State estimation in electric power systems: A Generalized Approach", *Kluwer Academic Publishers*, 1999.
- [9] M. Shahidehpour, Y. Wang, "Communication and Control in Electric Power Systems", *Wiley Inter Science*, 2003.