

## 스마트 마이크로그리드 실시간 상태 추정에 관한 연구

배준형\*, 이상우\*\*, 박태준\*, 이동하\*\*\*, 강진규\*\*

\*대구경북과학기술원 정보통신융합공학전공(tjpark@dgist.ac.kr),

\*\*대구경북과학기술원 차세대융합센터, \*\*\*대구경북과학기술원 로봇시스템연구부

### A Study on Real-time State Estimation for Smart Microgrids

Bae, Junhyung\* Lee, Sangwoo\*\* Park, Taejoon\*  
Lee, Dong-Ha\*\*\* Kang, Jinkyu\*\*

\*Dept. of Information & Communication Engineering, DGIST

\*\*Advanced Convergence Research Center, DGIST

\*\*\*Robotics System Division, DGIST

#### Abstract

---

This paper discusses the state-of-the-art techniques in real-time state estimation for the Smart Microgrids. The most popular method used in traditional power system state estimation is a Weighted Least Square(WLS) algorithm which is based on Maximum Likelihood(ML) estimation under the assumption of static system state being a set of deterministic variables.

In this paper, we present a survey of dynamic state estimation techniques for Smart Microgrids based on Belief Propagation (BP) when the system state is a set of stochastic variables. The measurements are often too sparse to fulfill the system observability in the distribution network of microgrids. The BP algorithm calculates posterior distributions of the state variables for real-time sparse measurements. Smart Microgrids are modeled as a factor graph suitable for characterizing the linear correlations among the state variables. The state estimator performs the BP algorithm on the factor graph based the stochastic model. The factor graph model can integrate new models for solar and wind correlation. It provides the Smart Microgrids with a way of integrating the distributed renewable energy generation. Our study on Smart Microgrid state estimation can be extended to the estimation of unbalanced three phase distribution systems as well as the optimal placement of smart meters.

Keywords : 스마트 마이크로그리드(Smart Microgrids), 배전 계통(Distribution System), 상태 추정(State Estimation), 신재생 에너지 분산 전원(Distributed Renewable Energy Generation), 부하 조절(Load Balancing), 신뢰 전파(Belief Propagation), AMI(Advanced Metering Infrastructure), PMU(Phasor Measurement Unit)

---

## 1. 서 론

1969년 Fred Schweppe에 의해 처음으로 시도된 전력 계통의 상태 추정은 측정값으로부터 오차를 필터링하는 동시에 상태를 추정함으로써 정확한 데이터베이스를 구축하는 기법이다[1]. 상태 추정 기술은 스마트 마이크로그리드 최적화를 위한 모니터링을 제공한다. 실시간 전압 및 전류의 추정으로 모션 또는 지선에서의 이상 현상을 예측하고 이를 제거할 수 있다. 또한, 신재생 에너지 분산 전원의 실시간 전력을 추정함으로써 그리드의 안정도 및 분산전원 간의 결합 문제에 대한 영향을 해석할 수 있다.

지금까지 상태 추정 기술은 주로 송전 계통에 응용되어 왔으며 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)에 의해 수집된 측정값들을 이용하여 다양한 해석과 제어를 수행하였다[2]. 최근 그리드 모니터링, 전력 급전 및 부하 차단 문제가 대두되면서 배전 계통 상태 추정이 중요한 이슈로 부각되고 있다. 배전 계통 상태 추정은 전력 계통의 일부분인 변전소에서부터 급전선 부분을 다룬다. 일반적인 상태 추정은 3상 계통이 평형 상태에 있다고 가정하고 단상에 대한 상태 추정을 수행하지만 배전 계통의 경우 3상간에 균등한 부하 배분이 어려워 3상간 전력이 평행 상태가 되는 것이 사실상 불가능하다. 그러므로 배전 계통 운용을 위한 강인한 상태 추정 연구가 필요하다.

배전 계통 상태 추정이 중요한 이슈임에도 불구하고 수요자 부하 특성을 추정하기 위한 국내의 연구는 현재 미흡한 실정이다. 특히 스마트 빌딩에서의 실시간 부하 특성의 연구가 필요하다. 미래의 스마트 마이크로그리드는 수요자와 에너지 관리 센터 간 양방향 정보 교환으로 개별 수요자 관리 및 계량이 이루어 질 것이다. 실시간 급전 운용은 변전자동화 및 부하 관리를 용이하게 할 것이다.

스마트 마이크로그리드의 효율적인 모니터

링과 제어를 위하여 시스템의 상태를 추정할 뿐만 아니라 부하 변동 및 날씨의 상태를 예측할 수 있는 전력 계통 해석이 요구된다. 또한, 동적 네트워크 토폴로지와 실시간 계측 기술을 요구한다. 현재 SCADA가 제공하는 측정값은 측정과정이나 전송과정에서 오차를 포함할 수 있으며 이 측정값을 이용한 실시간 조류(Power Flow) 계산은 부정확할 가능성이 있다. 또한 배전 계통에서 실시간으로 수집할 수 있는 측정값들은 변전소에서 급전기로 공급되는 전압과 전력뿐이므로 가관측성을 확보할 수 없다. 스마트 마이크로그리드는 양방향 실시간 계측, 원격 검침, 부하 제어 등을 위한 스마트 계량기를 제공한다. 그러므로 스마트 계량기가 도입되면 정확도가 높은 측정값을 제공받을 것이다. 스마트 계량기가 적합한 위치에 설치되면, 측정값의 노이즈 감소뿐만 아니라 데이터 손실 문제도 해결할 수 있다.

한편으로, 그리드 안정도와 부하 분산 문제와 같은 이슈가 신재생 에너지 분산 전원 도입의 증가로 대두되고 있다. 스마트 마이크로그리드 상태 추정은 신재생 에너지 분산 전원과 부하가 결합된 배전 계통 상태 추정으로 볼 수 있다.

본 논문에서는 스마트 마이크로그리드의 신뢰도를 평가하고 신재생 에너지 전원의 결합에 따른 영향을 분석하기 위한 확률 기반의 상태 추정 기법을 소개한다. 스마트 마이크로그리드의 상태를 추정하기 위해서 그래프 기반의 확률 모델(Stochastic Model)로 시스템을 표현하고 효율적인 신호 처리 알고리즘을 이용하여 통계 추론을 수행하였다.

## 2. 스마트 마이크로그리드 모델링

배전 계통 해석을 단순화하기 위해서 3상 계통이 정상 상태이고 완전한 평형 상태에 있다고 가정한다. 향후 불평형 상태의 3상 배전 계통 해석을 수행할 예정이다. 배전 계

통의 단선 다이어그램은 토폴로지 프로세서를 통해 모선-지선 모델(Bus-Branch Model)로 변환된다. 토폴로지 프로세서는 스위치와 차단기의 상태 변화를 추적할 수 있어야 한다. 추적하는 방법은 회로의 스위치가 열려 있을 때 전류 흐름이 0이고 스위치가 닫혀 있을 때 전압이 0인 점을 이용한다. 자연 재해로 인해 고장이 발생하였을 때, 토폴로지 프로세서는 회로 상태의 변화를 추적할 수 있다. 그림 1은 마이크로그리드 모선-지선 모델의 예이다. 변전소는 변압기를 통해 급전선으로 연결되어 있다. 개별 수요자 부하(B1, B2, B3, B4)는 파란색 정사각형 모양으로 나타내었고, 신재생 에너지 분산 전원은 붉은색 원형 모양으로 나타내었다.

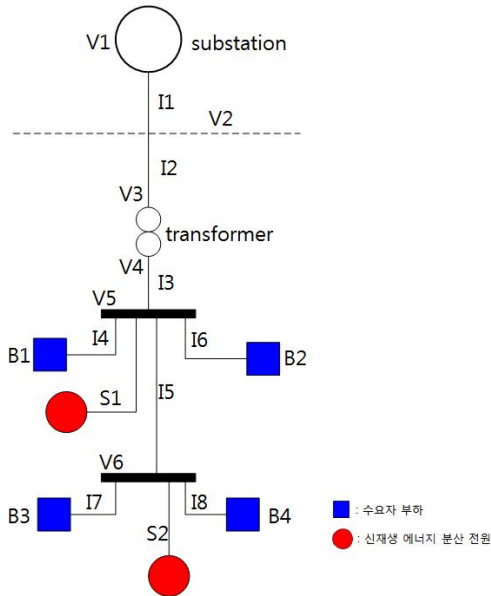


그림 1. 마이크로그리드의 모선-지선 모델 예제

팩터 그래프(Factor Graph)는 모선-지선 모델로부터 구할 수 있다. 모든 변수 노드는 모선 전압 페이지나 지선 전류 페이지의 확률 분포로 나타내어진다. 전압과 전류의 상관 관계는 팩터 노드에 의해 정해진다.

그림 2는 그림 1을 팩터 그래프로 나타낸 것이다. 팩터 그래프는 거동 계층과 관측 계

층으로 구성된다.

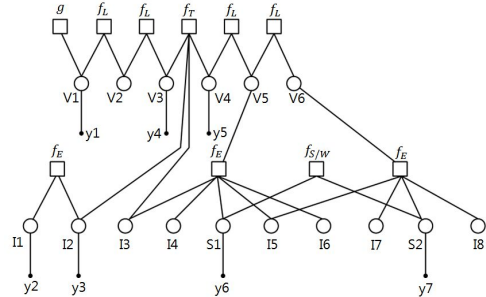


그림 2. 그림 1의 팩터 그래프

거동 계층은 모선 전압이나 지선 전류에 해당하는 변수 노드이다. 팩터의 의미와 같이 정의하였다.

- 1)  $g$  : 전압 제어 모선 파라미터를 나타내는 팩터 함수
- 2)  $f_E$  : 모선과의 전기적 관련을 나타내는 팩터 함수
- 3)  $f_L, f_T$  : 배전선로와 변압기에 대한 팩터 함수
- 4)  $f_{S/W}$  : 시간-공간적 상관 관계에 의한 태양광/풍력의 팩터 함수

관측 계층은 변수를 표현하는 노드이다. 노이즈는 백색 가우시안 잡음 분포를 적용한다. 시간  $t$ 에서 실제 상태  $x_t$ 의 측정  $y_t$ 는 다음 식 (1)과 같다[2].

$$y_t = x_t + e_t \quad (1)$$

$e_t$ 는  $e_t \sim N(0, R)$ 인 측정 잡음이다. 분산  $R$ 은 측정값의 신뢰도를 나타낸다.

### 3. 스마트 마이크로그리드 상태 변수

스마트 마이크로그리드 상태 추정은 확률 모델을 사용하기 때문에 상태 변수는 확률 분포를 따르는 랜덤 변수이다. 계통 상태 추정을 위한 전기적 파라미터에는 모선 전압,

지선 전류, 유효·무효 전력 등이 있다. 선형 상태 추정을 하기 위한 상태 변수로 모선 전압 페이지와 지선 전류 페이지를 고려한다. 복소 전압 및 전류는 다음 식 (2)와 같다.

$$V_i = \text{Re}\{V_i\} + j\text{Im}\{V_i\} \quad (2)$$

$$I_i = \text{Re}\{I_i\} + j\text{Im}\{I_i\}$$

신재생 에너지 분산 전원은 보통 유효·무효 주입 전력을 측정값으로 사용한다. 상태 변수는 상위 모선 전압과 지선 복소 전력으로 정의한다. 다음 식 (3)은 복소 전력을 나타낸다.

$$S_i = P + jQ \quad (3)$$

신재생 에너지 분산 전원의 상태 변수 중 하나로 복소 전력을 정의하였기 때문에 분산 전원 간의 상관 관계는 팩터 함수인  $f_{S/W}$ 로 나타낼 수 있다. 상태 변수가 전압 및 전류 페이지이면 팩터 함수는 선형이지만 분산 전원 간 상관 관계 함수는 비선형이다. 상관 관계 함수는 선형 상태 추정을 하기 전에 선형화할 필요가 있다. 모든 팩터 함수들을 선형화한 후에 그림 3과 같이 덧셈, 등가, 곱셈의 3가지 선형 빌딩 블록으로 나타낼 수 있다[2].

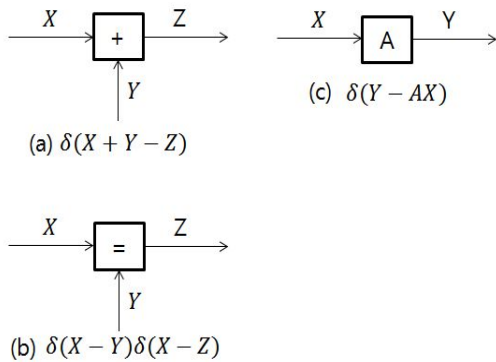


그림 3. 선형 빌딩 블록

#### 4. 상관 관계 함수

변전소에 연결된 모선은 전압 제어 모선으로 볼 수 있다. 전압과 유효 전력을 각각  $V_g$ 와  $P_g$ 로 나타내면 팩터  $g$ 는 다음 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_1 &= V_g \\ \text{Re}\{V_1 I_1^*\} &= P_g \end{aligned} \quad (4)$$

그림 1에서 두 번째 모선의  $f_E$  함수는 다음 식 (5)와 같이 정의된다.

$$I_5 = I_7 + \left(\frac{S_2}{V_6}\right)^* + I_8 \quad (5)$$

$f_E$  함수는 상태 변수 간 비선형 상관 관계를 포함하고 있다. 이 함수는 선형 상태 추정을 하기 전에 다음 식 (6)과 같이 선형화를 한다.

$$\begin{aligned} S_2 &= (\overline{I_5^*} - \overline{I_7^*} - \overline{I_8^*})V_6 - (\overline{I_5^*} - \overline{I_5^*})\overline{V_6} \\ &+ (\overline{I_7^*} - \overline{I_7^*})\overline{V_6} + (\overline{I_8^*} - \overline{I_8^*})\overline{V_6} \end{aligned} \quad (6)$$

$\overline{I_5^*}$ ,  $\overline{I_7^*}$ ,  $\overline{I_8^*}$ ,  $\overline{V_6}$ 는 각각  $I_5^*$ ,  $I_7^*$ ,  $I_8^*$ ,  $V_6$ 의 예측값이다.

$f_L$ 은 옴의 법칙(Ohm's Law)로 표현할 수 있으며 선로 임피던스는 선로 길이와 도체의 특성으로 계산된다. 그림 1에서 선로  $I_5$ 의  $f_L$  함수는 다음 식 (7)과 같이 정의된다.

$$V_5 - V_6 = I_5 \times (R_5 + jX_5) \quad (7)$$

여기서,  $R_5 + jX_5$ 는 선로 임피던스이다.

이상적인 변압기인 경우, 팩터 함수  $f_T$ 는 다음 식 (8)과 같이 정의된다.

$$V_2 = V_1 a e^{j\theta} \quad (8)$$

$$V_2 I_2 = \rho V_1 I_1 \quad (9)$$

식 (8)에서  $a$ 는 권수비 크기,  $\theta$ 는 위상 변이 각이다. 식 (9)에서  $\rho$ 는 변환 효율이다.

팩터 함수  $f_{S/W}$ 는 태양광과 풍력 발전 사이의 상관 관계이다. 스마트 마이크로그리드 상태 추정에서는 벡터 자기회귀(Vector Autoregressive, VAR) 시간-공간적 모델이 필요하다[2]. 신재생 에너지 분산 전원 간의 상관 관계가 팩터 함수로 고려되지 않는다면, 분산 전원의 변동으로 인하여 상태 추정의 정확도가 떨어지게 된다.

선형 상태 추정을 위해 신재생 에너지 분산 전원들의 시계열 선형 상관 관계를 정의하여야 한다. 이웃한 분산 전원들의 위치가  $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$  이고 상관 관계가 선형이라고 가정하고  $n \times 1$  벡터인  $X(t)$ 를 시간  $t$ 에서 각 위치에서의 태양광 전원의 일사량으로 간주하면

$$X(t) = \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ \dots \\ X_n(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

이다[2]. 예측  $p$ 차 VAR 모델은 다음 식 (11)과 같다.

$$X(t) = c + \sum_{i=1}^p A_i X(t-i) + \varepsilon(t) \quad (11)$$

$c$ 는 상수,  $A_i$  행렬은 모델 파라미터,  $\varepsilon$ 는 백색 잡음이다. 동일 시간대  $t$ 에서 분산 전원의 위치  $i$ 와  $j$ 간 상관 계수  $\eta$ 는

$$\eta \propto e^{-d_{ij}/L} \quad (12)$$

이다.  $d_{ij}$ 는 위치  $i$ 와  $j$ 간 거리,  $L$ 은 날씨 조

건에 따른 스케일링 파라미터이다.

## 5. 신뢰 전파 알고리즘을 적용한 상태 추정

기존의 전력 계통 상태 추정에서 추정할 상태 변수는 모선 전압이다. 그러나 스마트 마이크로그리드에서는 신재생 에너지 분산 전원도 고려하여야 하며 이에 대한 유효·무효 전력과 관련된 식은 비선형이다. 비선형 방정식을 풀기 위하여 Newton-Raphson 방법을 주로 적용하여 수렴된 상태 변수를 얻는다. 일반적인 전력 계통 상태 추정에 가중최소자승(Weighted Least Square, WLS) 알고리즘이 주로 사용된다[1]. WLS 알고리즘은 측정값의 부족 문제를 처리하기 위해서 과거 부하 데이터로부터 모델링에 의한 의사-측정값을 사용한다.

현재 마이크로그리드의 상태 추정을 위해서 수용자 단의 제한된 실시간 측정값을 수집할 수 밖에 없는 실정이다. 이런 문제를 해결하기 위하여 통신 및 신호 처리 분야에서 많이 응용되는 신뢰 전파(Belief Propagation, BP) 알고리즘이 적용되었다[2]. 또한, 추정 정확도를 향상시키기 위하여 지능형 원격 검침(Advanced Metering Infrastructure, AMI)이나 위상 측정 장치(Phasor Measurement Unit, PMU) 데이터를 사용한 상태 추정의 연구가 현재 활발히 진행되고 있다.

BP 알고리즘은 팩터 그래프 모델을 적용한 모든 전역 변수에 대해 Marginalization하기 위한 분산 메시지 전달 알고리즘이다[3]. 관측되지 않는 노드에 대한 주변 분포(Marginal Distribution)는 관측된 노드의 측정값에 대한 사후 확률이다. 이 알고리즘은 상태 변수 간의 상관 관계를 정의함으로써 실시간 상태 추정에 유용하다. 먼저 모든 변수 노드로부터 초기 확률 분포를 구한다. 특정 시간 간격 동안 에너지 관리 센터는 분산된 계량기로부터 데이터를 수집한다. 수집된 데이터를 토대로 BP 알고리즘은 현재 상태에 기반한 모

든 노드에 대한 전역 추론을 수행한다.

메시지 흐름은 다음 그림 4와 같다. 메시지  $m_{is}$ 는 변수  $i$ 가 이웃 노드에서 받은 메시지를 포함한 증거 가능성(Evidence Potential)  $\psi_i(x_i)$ 의 곱으로 표현된다.

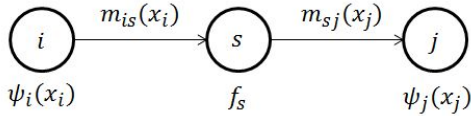


그림 4. 팩터 그래프의 메시지 갱신

팩터  $s$ 에서 변수  $j$ 로의 메시지 흐름은 다음 식 (13)과 같다.

$$m_{sj}(x_j) = \alpha \sum_{x_{N(s) \setminus j}} \left( f_s(x_{N(s)}) \prod_{i \in N(s) \setminus j} m_{is}(x_i) \right) \quad (13)$$

위 식 (13)의 자세한 설명은 참고문헌을 참조하기 바란다[3].

스마트 마이크로그리드 상태 추정기는 다음의 사항을 입력으로 받는다.

- 1) 선로, 변압기, 캐패시터, 발전기, 분산 전원, 부하를 포함한 모션-지선 모델
  - 2) 변전소의 SCADA로부터 수집한 실시간 전압, 유효·무효 전력 측정값
  - 3) 실시간 급전기 전압 및 전류 측정값
  - 4) 스마트 계량기의 실시간 측정값
  - 5) 분산 전원의 유효·무효 전력 측정값
- 측정값은 인터넷이나 전력선 통신을 통해 지역 상태 추정기로 전송된다. BP 알고리즘의 수렴 시간은 네트워크 토폴로지와 측정정밀도에 의존한다.

실시간 측정값은 AMI, PMU와 같은 계량기로부터 수집된다. 계량기들은 동적 계통 해석을 위해 시간동기가 되어야 한다.

## 6. 결론

본 논문에서는 기존의 상태 추정 방법과는

다른 확률 기반의 실시간 상태 추정 방법에 대해 소개하였다. 미래의 스마트 그리드에서는 부하의 수요 반응이 고려될 것이므로 부하의 확률 모델은 스마트 마이크로그리드에 대한 모델의 정확도를 향상시켜줄 것이다.

향후 연구 계획으로 계통의 불균형 상태를 고려할 수 있는 3상 상태 추정과 스마트 계량기의 최적 배치 및 신재생 에너지 분산 전원 간의 시간-공간적 상관 관계에 관한 연구 등이 있다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부에서 지원하는 대구경북과학기술원 일반사업에 의해 수행되었습니다(11-BD-0502). 본 연구는 또한 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2011-0004437).

## 참 고 문 헌

1. F. Schweppe and J. Wildes, "Power System Static State Estimation, Part I: Exact Model", IEEE Trans. on Power Appar. & Syst., Vol. PAS-89, No.1, pp.120-125, 1970.
2. Y. Hu, A. Kuh, A. Kavcic and D. Nakafuji, "Real-time State Estimation on Microgrids", in Proc. IJCNN, San Jose, CA, 2011.
3. Y. Hu, A. Kuh, A. Kavcic and D. Nakafuji, "Microgrid State Estimation using Belief Propagation on Factor Graphs", in Proc. APSIPA Annu. Summit and Conf., Singapore, 2010.