

확장된 전력 상태추정 알고리즘 개발

손형수\*<sup>o</sup> 하연관\* 류현수\* 문영현\* 송경빈\*\* 박정도\*\*\*  
 연세대학교 전기공학과\* 계명대학교 전자공학과\*\* 위덕대학교 전기공학과\*\*\*

Extended State Estimation Algorithm in Power Systems

H.S. Shon\*<sup>o</sup> Y.K. Ha\* H.S. Ryu\* Y.H. Moon\* K.B. Song\*\* J.D. Park\*\*\*  
 Dept.of Electrical Eng. Yonsei Univ.\* Dept.of Electrical Eng. Keimyung Univ.\*\* Dept.of Electrical Eng. Uiduk Univ.\*\*\*

**Abstract** - State estimation in power system is to estimate state variable value which minimizes the error from the real state measured by the gauge and connection state of the circuit breaker. In the past, it was difficult to determine measure function considering the correlation of the measured values. In this paper, an extended state estimation is proposed to process easily various kinds of estimation variable. The proposed algorithm is developed by expanding state variable concept based on many measured values and treating correlation between estimation variable and state variable, it is considered that the state variable satisfy some limitations named "Equality Limitation Conditions".

2. 확장된 전력 상태추정 알고리즘 개발

과거의 전력계통에서의 상태추정은 모선 전압(V)과 모선 주입 유, 무효 전력(P, Q), 유, 무효 선로 조류(P<sub>ij</sub>, Q<sub>ij</sub>)의 측정값만을 이용하여 이들의 상관관계를 통해 상태변수를 V, θ 로 설정하여 상태추정을 수행하였으나 현재에는 P, Q, V, I, θ 등의 많은 부분들을 측정할 수 있게 되었다.

이를 바탕으로 상태변수를 확장시켜 추정변수 개념을 도입하여 추정변수와와 상관관계를 등식 제약조건으로 취급함으로써 다양한 종류의 추정변수를 쉽게 처리할 수 있다.

수학적으로 상태추정의 일반식은 다음의 식 (2.1)과 같이 나타내어진다.

$$z = h(x) + e \tag{2.1}$$

여기서, m : 측정점의 수

n : 상태변수의 수

z : m×1 측정벡터

x : n×1 상태벡터

h(x) : 상태벡터에 의해 계산된 추정값

e : m×1 측정값의 오차벡터

1. 서 론

산업의 발달로 공급전력의 고급화가 요망되고 있고 전력 감시 설비들의 무인화 감시 제어와 최소 정전시간으로 소비자에게 양질의 전력을 공급하는 것 등을 보장하기 위하여 EMS(Energy Management System)를 사용함으로써 효과적으로 에너지 시스템이 제어되고 있다. 이러한 에너지 관리 시스템이 계통의 경제운용에 미치는 영향은 매우 크므로 계통의 제어능력을 향상시키기 위해서는 에너지 시스템의 실제 운전상태를 정확하게 추정하는 것이 필수적이다. 따라서 시스템의 상태추정은 안전운전을 위한 필수적인 요건이 되었다.

전력 계통에서 상태추정은 측정계기에서의 측정치들과 선로의 차단기의 연결상태들로 이루어진 redundant 데이터 군에서 추출한 정보를 가지고 실제 상태와의 오차를 최소가 되도록 계통의 상태변수를 추정한다.

과거의 전력 계통에서의 상태추정은 모선 전압(P)과 모선 주입 유, 무효 전력(P<sub>i</sub>, Q<sub>i</sub>), 유, 무효 선로 조류(P<sub>ij</sub>, Q<sub>ij</sub>)의 측정값만을 이용하여 이들의 상관관계를 통해 상태변수를 V, θ 로 설정하여 상태추정을 수행하였으나 현재에는 P, Q, V, I, θ 등의 많은 부분들을 측정할 수 있게 되어 더욱 많은 상태변수를 설정하여 추정할 수 있게 되었다. 또한, 과거에는 이들의 상관관계를 고려한 측정함수의 설정이 어려웠으나 본 연구에서는 많은 측정값들을 바탕으로 상태변수 개념을 확장시켜서 추정변수 개념을 도입하고 추정변수와 상태변수와와의 상관관계를 등식 제약 조건으로 취급함으로써 다양한 종류의 추정변수를 쉽게 처리할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

본 연구에서는 현재 추세에 따라 대규 지하철 노선의 상인 역사 전력 배전 시스템을 모델로 하여 차단기 상태에 따른 측정점 선정 알고리즘을 적용해 보고, 제안된 확장 전력 상태추정 알고리즘을 적용시켜 그 결과와 측정치와의 오차가 크게 발생하지 않음을 확인하였다.

그러나, 측정치가 위상각 θ<sub>i</sub> 나 전류 I<sub>i</sub> 등으로 주어진 경우에는 측정치에 관한 함수 h(x)를 끌어내기 곤란한 경우가 많다.

따라서 본 연구에서는 이러한 측정치에 대해서는 그 자체를 새로운 상태변수로 도입하고, 기존 상태변수와 새로운 상태변수와와의 상관관계는 등식 제약 조건으로 추가하였다.

기존 상태변수를 x라 하고 새로운 상태변수를 y라 하면 식 (2.1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} z_x &= h(x) + e_x \\ z_y &= y + e_y \end{aligned} \tag{2.2}$$

여기서, x와 y와의 관계를 나타내는 등식 제약 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_1(x) = 0, \quad g_2(x, y) = 0$$

이러한 등식 제약조건은 다음 조건에 따라 구해진다.

※ 등식 제약 조건 : 키르히호프의 전류, 전압 법칙(KCL, KVL), 옴의 법칙(Ohm's Law), 유효 전력식 등 계통의 P, V, I, θ, R, X 의 상관관계를 나타내는 관계식을 제약조건으로 나타냄으로써 추정값을 더욱 정확하게 구해낼 수 있으며 계통의 구성에 따라 달라질 수 있다.

상태추정의 목적함수에 등식 제약 조건  $g(x) = 0$  을 고려하면 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{2} [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (2.3)$$

subject to  $g(x) = 0$

$f(x)$  와  $g(x)$  를 이용하여 라그랑제 함수 (Lagrangean function)를 구성하면 다음과 같다.

$$L = f(x) + \lambda^T g(x) \quad (2.4)$$

상태추정의 목적함수를 최소화 시키기 위해 식(2.4)의 라그랑제 함수를 최적화 시킨다.

이를 최적화 하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} + \left( \frac{\partial g}{\partial x} \right)^T \lambda = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = g(x) = 0 \quad (2.6)$$

여기서,  $\frac{\partial f(x)}{\partial x} = -H^T(x)R^{-1}[z - h(x)]$

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$$

이를 선형 근사화시켜  $\Delta x$  에 대하여 정리하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta x = - \left[ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \lambda^T \frac{\partial^2 g(x)}{\partial x^2} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \left( \frac{\partial g(x)}{\partial x} \right)^T \lambda + \left( \frac{\partial g(x)}{\partial x} \right)^T \Delta \lambda \right] \quad (2.7)$$

이를  $\Delta \lambda$ 에 관하여 정리하면 다음과 같이 정리된다.

$$\Delta \lambda = \left\{ \frac{\partial g(x)}{\partial x} \left[ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \lambda^T \frac{\partial^2 g(x)}{\partial x^2} \right]^{-1} \left( \frac{\partial g(x)}{\partial x} \right)^T \right\}^{-1} \left\{ g(x) - \frac{\partial g(x)}{\partial x} \left[ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \lambda^T \frac{\partial^2 g(x)}{\partial x^2} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \left( \frac{\partial g(x)}{\partial x} \right)^T \lambda \right] \right\} \quad (2.8)$$

식 (2.8)에서 계산된  $\Delta \lambda$  와 식 (2.7)에서 계산된  $\Delta x$  를 가지고 다음 단계의  $\lambda$  와  $x$  를 구해보면 다음과 같다.

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \Delta \lambda \quad (2.9)$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x \quad (2.10)$$

식 (2.9)과 식 (2.10)에서 구해진  $\lambda$  와  $x$  를 가지고 위의 단계를 반복 수행한다.

다음은 제안된 확장 전력 상태추정의 알고리즘을 나타낸 순서도이다.

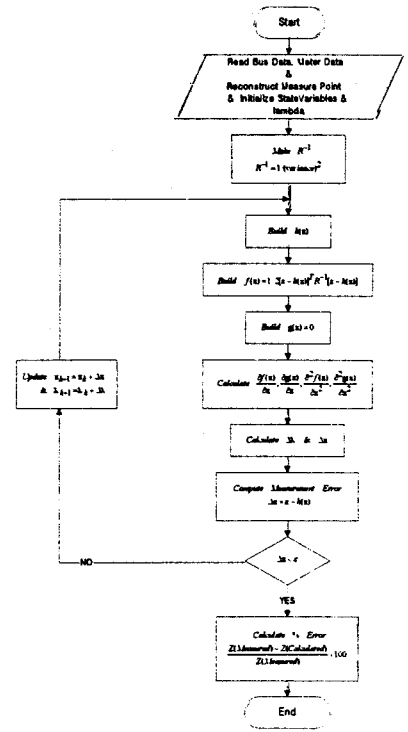


그림 2.1 제안된 상태추정 알고리즘의 흐름도

### 3. 사례 연구 및 결과 고찰

본 장에서는 대구 지하철 1 호선의 상인 역사의 전력 배전 시스템을 모델로 하여 2장에서 제안된 차단기 상태에 따른 측정점 선정 알고리즘을 적용해 보고, 유도된 확장 전력 상태추정 알고리즘을 적용시켜 그 결과와 측정치와의 오차를 정리하였다. 대구 지하철 1 호선 상인 역사의 전력 배전 시스템은 그림 3.1에 주어졌다.

이 시스템에서 교류 모선의 기준 전압은 22900[V], 기준 전력은 3,000[kw], 직류 모선의 기준 전압은 1500[V]로 설정하였고, 3상, 단상 변압기 이후의 역률은 0.9라 가정하였다. 각 측정점 MP(Measure Point)에서는 P, I, V의 값을 모두 측정한다.

상인 역사의 전력 시스템의 각 측정 위치에 설치된 측정계기로부터의 유효 전력(P), 전압(V), 전류(I), 계통의 상태를 나타내는 차단기 정보를 입력값으로 하고, 계통의 유효 전력, 전압, 전압의 위상각, 전류, 전류의 위상각을 출력으로 하였다.

이 시스템에서 3상, 단상 변압기 이후의 역률을 0.9라 가정하여 입력시의 역률은 0.8922, 모선의 3상 변압기 이전의 역률은 0.8913, 단상 변압기 이전의 역률은 0.8956으로 적용하였다.

여기서 계통에 입력되는 전압의 위상각은 0°로 가정하였고 단위는 pu 단위로 나타내었다.

이 계통에 적용되는 등식 제약 조건  $g(x) = 0$  는 다음과 같다.

$$-I_1 + (I_2 + I_3) + I_5 = 0 \quad (3.1)$$

$$I_2 - I_7 = 0 \quad (3.2)$$

$$I_3 - I_8 = 0 \quad (3.3)$$

$$I_5 - I_{10} = 0 \quad (3.4)$$

$$I_{12} + I_{13} - I_{15} = 0 \quad (3.5)$$

$$V_1 - V_2 = 0 \quad (3.6)$$

$$V_1 - V_3 = 0 \quad (3.7)$$

$$V_1 - V_5 = 0 \quad (3.8)$$

$$P_1 - V_1 I_1 \cos(0 - \phi_1) = 0 \quad (3.9)$$

$$P_2 - V_2 I_2 \cos(0 - \phi_2) = 0 \quad (3.10)$$

$$P_3 - V_3 I_3 \cos(0 - \phi_2) = 0 \quad (3.11)$$

$$P_5 - V_5 I_5 \cos(0 - \phi_3) = 0 \quad (3.12)$$

$$P_7 - V_7 I_7 \cos(\theta_1 - \phi_2) = 0 \quad (3.13)$$

$$P_8 - V_8 I_8 \cos(\theta_1 - \phi_2) = 0 \quad (3.14)$$

$$P_{10} - V_{10} I_{10} \cos(\theta_2 - \phi_3) = 0 \quad (3.15)$$

$$P_{12} - V_{12} I_{12} = 0 \quad (3.16)$$

$$P_{13} - V_{13} I_{13} = 0 \quad (3.17)$$

$$P_{15} - V_{15} I_{15} = 0 \quad (3.18)$$

$$X_{17}^2 I_7^2 - [V_2 - V_7] = 0 \quad (3.19)$$

$$X_{28}^2 I_8^2 - [V_3 - V_8] = 0 \quad (3.20)$$

$$X_{410}^2 I_{10}^2 - [V_5 - V_{10}] = 0 \quad (3.21)$$

여기에서  $\theta_1, \theta_2$  는 각각 3상 변압기와 단상 변압기를 통과한 후의 전압의 위상각이고,  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  은 각각 입력, 3상, 단상 전류의 위상각을 나타낸다. 또한  $X_n$  은 각 변압기의 임피던스를 나타낸다. 정유기를 통과한 이후의 측정점인 12번 이후는 직류값이다.

위 사례의 시스템은 그림 3.1에 주어진 바와 같다.

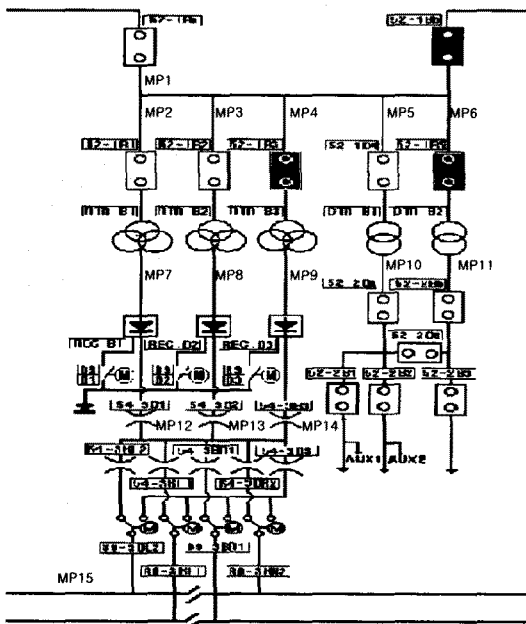


그림 3.1 사례 : 2개의 차단기가 차단된 배전 계통도

사례의 결과는 다음의 표와 같이 정리된다.

추정 결과 반복 회수는 9회로 수렴하였으며, 측정값과 추정값과의 오차가 최대 4.67% ~ 최소 0.10% 정도가 발생됨을 확인하였다.

반복 회수가 커진 이유는 시스템의 규모가 커짐으로써 추정되어야 할 변수의 개수와 제한 조건의 양이 많아졌기 때문이다.

측정지점	측정값(pu)	추정값(pu)	% 오차(%)
P <sub>1</sub>	0.816000	0.814453	0.1896
P <sub>2</sub>	0.326400	0.325491	0.2785
P <sub>3</sub>	0.316800	0.325491	-2.7434
P <sub>5</sub>	0.158400	0.150997	4.6736
P <sub>7</sub>	0.326400	0.327638	-0.3793
P <sub>8</sub>	0.316800	0.327638	-3.4210
P <sub>10</sub>	0.158400	0.153987	2.7860
P <sub>12</sub>	0.326500	0.320004	1.9896
P <sub>13</sub>	0.316800	0.320004	-1.0113
P <sub>15</sub>	0.643300	0.640008	0.5117
I <sub>1</sub>	0.930600	0.955097	-2.6323
I <sub>2</sub>	0.372240	0.361468	2.8938
I <sub>3</sub>	0.376000	0.361468	3.8648
I <sub>5</sub>	0.189880	0.188400	0.7794
I <sub>7</sub>	0.373500	0.360203	3.5601
I <sub>8</sub>	0.376035	0.360203	4.2102
I <sub>10</sub>	0.187221	0.193765	-3.4953
I <sub>12</sub>	0.301598	0.301896	-0.0988
I <sub>13</sub>	0.301500	0.301896	-0.1313
I <sub>15</sub>	0.603098	0.603791	-0.1149
V <sub>1</sub>	0.954167	0.948952	0.5465
V <sub>2</sub>	0.954167	0.950597	0.3741
V <sub>3</sub>	0.954167	0.950597	0.3741
V <sub>5</sub>	0.954167	0.953070	0.1149
V <sub>7</sub>	0.953213	0.951448	0.1851
V <sub>8</sub>	0.953213	0.951448	0.1851
V <sub>10</sub>	0.953200	0.956335	-0.3289
V <sub>12</sub>	1.058940	1.059999	-0.1000
V <sub>13</sub>	1.058940	1.059999	-0.1000
V <sub>15</sub>	1.069529	1.059999	0.8910

표 3.1 상태추정의 결과 및 오차

#### 4. 결 론

본 논문에서는 많은 측정값을 이용하여 이들의 상관관계를 고려한 등식 제약 조건을 제안하였으며, 이 제약 조건을 이용한 상태추정치 갱신식을 유도하였고, 이를 이용하여 확장된 전력 상태추정 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘에 따라 대구 지하철 상인역사의 전력 시스템에 적용하여 상태추정을 수행해 본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기존의 상태추정 알고리즘에서는 모선 전압(V)과 모선 주입 유, 무효 전력(P<sub>i</sub>, Q<sub>i</sub>), 유, 무효 선로 조류(P<sub>ij</sub>, Q<sub>ij</sub>)의 측정값만을 이용하여 이들의 상관관계를 통해 상태변수를 V, θ 로 설정하여 상태추정을 수행하였으나 본 알고리즘을 적용하면 P, Q, V, I, θ 등의 많은 측정치들의 상태를 추정할 수 있게 되었다.
- 2) 상태변수들의 상관관계를 등식 제약 조건으로 취급하여 상태추정을 함으로써, 다양한 종류의 상태변수를 쉽게 처리할 수 있게 되었다.
- 3) 본 알고리즘을 배전 계통에 적용하여 실증함으로써 송전 계통 뿐만 아니라 배전 계통에서의 이용 가능성을 확인하였다.

#### (참 고 문 헌)

[1] F. C. Schweppe, J. Wildes and D. P. Rom "Power System Static State Estimation", part 1, 2 and 3, IEEE Tran. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, pp. 120-135, January 1970

[2] J. F. Dopazo, O. A. Klitkin, G. W. Stagg and L. S. Van Slyck, "State Calculation of Power System from Line Flow Measurements", IEEE Tran. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, pp. 1698-1708, November 1970

[3] R. E. Larson, W. F. Tinney, L. P. Hajdu, and D. S. Piercy, "State estimation in power systems. Part II : Implementations and Application", IEEE Tran. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, pp. 353-363, November 1970