

교직 연계계통을 포함한 전력계통에서의 상태추정에 관한 연구

김 준 현 * 박 건 수 ** 이 종 범 ***
 한 양 대 * 동양전문대 ** 한국전기연구소 ***

State Estimation in Power System with Interconnected AC/DC System

Joon-Hyun Kim Kun-Su Park Jong-Bum Lee
 Hanyang Univ. Dongyang T. College KERI

1. 서론

전력계통의 운용 및 제어의 자동화가 계속 이루어짐에 따라 그 기본정보로서의 계통운용 및 구성상태에 대한 정확한 파악이 절실히 요구되고 있으며, 특히, 근래 직류송전 방식의 잇점을 감안하여 복잡한 교류계통에 직류계통을 연계시킨 교직 혼합 계통이 외국 여러나라에서는 이미 구성되어 있어 이러한 교직혼합계통에서의 상태치에 대한 정확한 파악은 더욱 중요한 의미를 갖고 있다. 따라서 발표수는 적지만 지금까지 M.Shei-koleslami, D.M.Falcão 등으로 부터 이러한 계통에서의 상태 추정법이 발표되었으며, 아울러 여기서는 상태벡터의 선정에 제한을 두고 있으므로 이에 대한 확장이 요구되고 있다.

직류송전의 장점으로서는 안정도의 문제가 없이 대전력을 장거리로 송전하기가 가능하고, 조류제어 및 저렴한 건설비 뿐만 아니라 계통의 연계특성이 좋아 케이블 송전으로서 많이 이루어지고 있다. 우리나라에서는 아직 실현되지 않고 있으나 장차 제주도의 해저 케이블을 통한 직류송전도 계획 및 실시 예정에 있으므로 교류계통뿐만 아니라 직류계통 및 교직연계 부분의 상태를 측정 정보를 통해 얻음으로써 전반적인 계통 운용 및 제어의 향상을 기할 수가 있을 것이다.

본 연구에서는 전계통을 교류계통, 직류계통 및 교직 연계계통으로 구분한 후 각 계통에서의 상태 벡터를 정의하였으며, 특히 교직연계 계통에서는 상태벡터를 순변환기와 역변환기측 양쪽에서 순역변환기 브릿지에 인가되는 전압 및 이 전압과 이곳에 흐르는 전류와의 위상차, 제어각 및 여유각과 양측 변압기의 권선비로 정의하여 계통운용 및 제어의 정보를 증가시켰다.

또한 대규모 전력계통에서의 효율적 추정을 위하여 계통을 분할하되 부분계통사이에는 중점모선을 만들도록 분할하였다 따라서 연계선 및 이에 따른 연계계통이 발생하지 않아 부분 계통들에서만 추정치로 계통협조를 하여 추정함으로써 전 계통의 상태치를 보다 효율적으로 추정하였으며, 사례연구를 통하여 얻은 결과를 실제치와 비교, 검토함으로써 제시한 기법에 대한 효율성을 평가하였다.

2. 측정모델 및 목적함수에 의한 상태치

(1) 측정모델

t 시점에서의 측정벡터 Z_t 는 이 측정치의 측정 오차가 Gauss 분포에 따른다고 할 때 다음과 같이 구성된다.

$$Z_t = h_t(X_t) + v_t$$

$$E\{v_t v_t^T\} = R_t$$

여기서, Z_t : $m \times 1$ 측정벡터

X_t : $N \times 1$ 상태벡터

v_t : $m \times 1$, $N(0, \sigma_v^2)$ 의 측정오차 벡터

$h_t(X_t)$: $m \times 1$ 비선형 벡터함수

$E\{\cdot\}$: 기대치 연산자

R_t : v_t 의 공분산행렬

(2) 목적 함수

$$J(X_t) = [Z_t - h_t(X_t)]^T R_t^{-1} [Z_t - h_t(X_t)]$$

$$J(X_t) = J(X_{At}) + J(X_{Bt}) + J(X_{Ct})$$

(3) 상태치

$$X_t(l+1) = X_t(l) + [G_t(X_t(l))]^T H_t(X_t(l))^{-1} R_t^{-1} [Z_t - h_t(X_t(l))]$$

$$[Z_t - h_t(X_t(l))]$$

$$G_t(X_t(l)) = [H_t(X_t(l))]^T R_t^{-1} H_t(X_t(l))$$

(4) 허용오차

$$\max |X_t(l+1) - X_t(l)| \leq \epsilon$$

3. 교류계통에서의 상태추정

상태벡터 X_a 는

$$X_A = [E_{A1}, E_{A2}, \dots, E_{Am}, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T$$

4. 직류계통에서의 상태추정

(1) 상태 벡터

$$X_d = [E_{d1}, E_{d2}, \dots, E_{dk}]^T$$

(2) 측정벡터의 방정식

(i) 모선 i의 주입전력, 전류 및 전압

$$P_{di} = E_{di} \sum_{j=1}^k G_{ij} E_{dj}$$

$$I_{di} = \sum_{j=1}^k G_{ij} E_{dj}$$

$$E_{di} = E_{di}$$

(ii) 모선 i, j 간의 선로조류 및 전류

$$P_{dij} = E_{di} G_{ij} (E_{dj} - E_{di})$$

$$I_{dij} = G_{ij} (E_{dj} - E_{di})$$

(ii) 역변환기측

$$h_{A/B}(X_{A/B})_{i1} : E_{doz} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{bz} \cos \phi_i$$

$$h_{A/B}(X_{A/B})_{i2} : (I_{d12} X_i)^2 = \frac{\pi^2}{54} (\eta_i^2 E_i^2 - E_{bz}^2 - \frac{6\sqrt{6}}{\pi} E_{bz} I_{d12} X_i \sin \phi_i)$$

$$h_{A/B}(X_{A/B})_{i3} : (I_{d12} X_i)^2 = \cos^2 \tau (2E_{bz}^2 + \frac{3b}{\pi} (I_{d12} X_i)^2 + \frac{12\sqrt{6}}{\pi} E_{bz} I_{d12} X_i \sin \phi_i) - 2E_{bz} \cos \phi_i (E_{bz} \cos \phi_i + \sqrt{2} I_{d12} X_i)$$

$$h_{A/B}(X_{A/B})_{i4} : P_i = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{d12} E_{bz} \cos \phi_i$$

$$h_{A/B}(X_{A/B})_{i5} : Q_i = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{d12} E_{bz} \sin \phi_i + \frac{1b}{\pi} X_i I_{d12}^2$$

여기서, E_{di}, E_{doz} : 순, 역변환기의 직류 발생전압

X_i, X_i : 순, 역변환기의 전류 리액터스

I_{d12} : 직류선로 전류

P_i, P_i : 변환기용 변압기의 1차측 유효전력

Q_i, Q_i : 변환기용 변압기의 1차측 무효전력

5. 교직연계계통에서의 상태 추정

(1) 상태 벡터

$$X_{iA/B} = [E_{bi}, \phi_i, \alpha, \eta_i]^T$$

$$X_{jA/B} = [E_{bj}, \phi_j, \tau, \eta_j]^T$$

여기서, E_{bi}, E_{bj} : 순, 역변환기 브릿지에 인가 되는 전압

ϕ_i, ϕ_j : E_{bi}, E_{bj} 및 이곳에 흐르는 전류의 위상차

α, τ : 순, 역변환기의 제어각 및 여유각

η_i, η_j : 순, 역변환기 변압기의 권선비

(2) 측정벡터의 방정식

(i) 순변환기측

$$h_{A/B}(X_{A/B})_{i1} : E_{do1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{bi} \cos \phi_i$$

$$h_{A/B}(X_{A/B})_{i2} : (I_{d12} X_i)^2 = \frac{\pi^2}{54} (\eta_i^2 E_i^2 - E_{bi}^2 - \frac{6\sqrt{6}}{\pi} E_{bi} I_{d12} X_i \sin \phi_i)$$

$$h_{A/B}(X_{A/B})_{i3} : (I_{d12} X_i)^2 = \cos^2 \tau (2E_{bi}^2 + \frac{3b}{\pi} (I_{d12} X_i)^2 + \frac{12\sqrt{6}}{\pi} E_{bi} I_{d12} X_i \sin \phi_i) - 2E_{bi} \cos \phi_i (E_{bi} \cos \phi_i + \sqrt{2} I_{d12} X_i)$$

$$h_{A/B}(X_{A/B})_{i4} : P_i = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{d12} E_{bi} \cos \phi_i$$

$$h_{A/B}(X_{A/B})_{i5} : Q_i = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{d12} E_{bi} \sin \phi_i + \frac{1b}{\pi} X_i I_{d12}^2$$

6. 계통분할에 의한 교류계통에서의 상태 추정

(1) 부분계통 A와 i (i = B, C, ... P, ... S)와 의 기준모선간의 전압위상차

$$\theta = [\theta^{A/A}, \theta^{A/B}, \dots, \theta^{A/P}, \dots, \theta^{A/S}]^T$$

(2) 목적함수

$$J(X_A) = [Z_A - h_A(X_A)]^T R_A^{-1} [Z_A - h_A(X_A)]$$

$$J(X_B) = [Z_B - h_B(X_B)]^T R_B^{-1} [Z_B - h_B(X_B)]$$

$$J(X) = J(X_A) + J(X_B)$$

(3) 각 중첩 모선의 전압위상차

$$\theta_{gi}^0 = (\theta_{gi}^A - \theta_{gi}^B) \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

여기서, θ_{gi}^A : 부분계통 A에서 추정된 중첩모선의 위상각

θ_{gi}^B : 부분계통 B에서 추정된 중첩모선의 위상각

(4) 부분계통 A, B간의 기준모선간의 전압위상차

$$\theta_{A(B)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{gi}^0$$

(5) 전 모선으로 볼때의 부분계통 B의 각모선 전압위상차

$$\theta_{K(B)} = \theta_{A(B)} + \delta_{K(B)}$$

여기서, $\delta_{K(B)}$: 부분계통 B에서의 K모선 전압위상차

7. 결론

전력계통의 운용 및 제어에 필수적인 상태 추정을 모델 계통인 교직 혼합계통에 제안한 기법을 적용시켜 실시 해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 계통을 분할한 후 추정정도를 유지하며 보다 신속하게 상태치를 추정하였으며, 분할시는 연계계통을 형성하지 않고 중첩모선만 만들므로써 연계계통의 상태 추정이 필요없이 간단한 계통합조에 의하여 전계통의 상태치를 추정하도록 하였다.
- (2) 교직혼합 계통에서의 상태치를 각 계통별로 구분하여 실시하였으며, DC 계통에서는 간결한 추정기법으로 DC 계통의 모선전압만을 추정하였다.
- (3) AC/DC 연계 계통에서는 상태치의 선정을 확장시킨 후 가상측정치를 이용함으로써 적은 전송측정치로 상태추정을 실시하여 계통제어를 위한 정보로서 이용토록 하였다.

8. 참고문헌

- (1) F. Zhuang, et al. : "A Transformation Decoupled Estimator for Power System Estimation.", IEEE Trans., Vol. PAS-104, pp. 1738 - 1744, No.7, July 1985.
- (2) J.W.Wang, V.H.Quintana : "A Decoupled Orthogonal Row Processing Algorithm for Power System Estimation.", IEEE Trans., Vol. PAS-103, pp.2337 - 2344, No.8, Aug. 1984.

- (3) N.D.Rao, L.Roy : "A Cartesian Algorithm for Power System State Estimation.", IEEE Trans., Vol. PAS-102, pp.1070 - 1082, No. 5, May 1983.
- (4) Th. Van Cutsem, et al. : "A Two-Level State Estimator for Electric Power System.", IEEE Trans., Vol. PAS-100, pp.3722 - 3731, No.8, Aug. 1981.
- (5) Y.H.El-Fattain, et al. : "Hierarchical State Estimation", Int. Journal of Electrical Power Energy Systems, Vol. 2, pp.70 - 80, April 1980.
- (6) M.Sheikoleslami, et al. : "State Estimation of Interconnected HVDC/AC System.", IEEE Trans., Vol. PAS-102, pp.1805 - 1810, No.6, June 1983.
- (7) D.H.Falcao, et al. : "State Estimation for Integrated Multi-Terminal DC/AC Systems.", IEEE Trans., PAS-104, No.9, Sep. 1985.
- (8) H.R.Sirisena, et al. : "Inclusion of HVDC links in AC Power System State Estimation.", IEE Proc., Vol. 128, Pt. C, No.3, May 1981.
- (9) H.M. El-Marsafawy, et al. : "A New Fast Technique for Load-Flow Solution of Integrated Multi-Terminal DC/AC System." IEEE Trans., Vol. PAS-99, No.1, Jan./Feb. 1980.
- (10) 關根泰次 : 電力系統過渡解析論, 1984.