

전력계통에서의 측정설비 최적투자기법에 관한 연구

A Study on Optimal Investment Technique of
Measuring Equipments for Power System

박	영	문	서울대 전기공학과
노	영	수*	"
문	영	현	연세대 전기공학과

1. 서 론

전력계통의 효율적인 운영을 위해서 계통의 상태를 정확히 아는 것이 무엇보다도 중요하다. 상태추정을 위해서 측정설비의 설계가 요구되고 있으며, 측정설비는 신속한 실시간 제어를 위해 많은 비용이 드는 컴퓨터 설치를 필요로 하므로 경제적 측면을 무시할 수 없다. 측정설비가 많을수록 상태추정의 정확도가 높기 때문에 이의 설치비용과 상태추정 정확도 사이의 경제적 타협점을 찾는 것이 필요하다.

최적 측정설비 선정기준으로서는 다음사항을 고려하여야 한다.

- (1) 측정시스템에 대한 상태추정 오차의 최소화
- (2) 측정설비 고장에 따른 상태추정 신뢰도 고려
- (3) 측정설비의 고장확률 고려
- (4) 측정설비의 설치비용 고려

측정시스템에서 RTU(Remote Terminal Unit) 설치비용이 측정계기(meter)에 비하여 상당

한 비중을 차지하므로 RTU 설치개수를 줄여야 할 필요성이 널리 인식되고 있으나 아직까지 RTU 설치방안에 관한 연구가 이루어지고 있지 않다. 그리고, 하나의 RTU에 고장이 생기면 다량의 정보상실을 초래하기 때문에 RTU 하나의 고장에 대해서도 관측성이 보장되는 측정시스템 설계가 필요하다.

이에 본 연구의 목적은 현재까지 연구되지 않은 RTU 설치개수를 고려하여 설비투자비 최소화에 기여하며, 또한 하나의 RTU 고장에 대해서도 관측성이 보장되는 측정시스템을 설계하여 높은 신뢰도를 얻는 데 있다.

2. 문제의 정식화

가. 평가함수

상태추정을 위한 측정데이터는 모선주입 유효/무효 전력, 유효/무효 선로조류 그리고 모선전압 크기등으로 구성된다. 측정값들이 서로 독립이라고 가정하면 측정방정식은 다음과 같다.

$$z = h(x) + v \quad (1)$$

단, $E\{v\} = 0$

$$E\{v v^t\} = R : \text{측정오차 공분산 행렬 (대각행렬)}$$

(1)식의 측정시스템에 대한 평가함수는 다음의 상태추정 오차에 의해 구해진다.

$$J = E\{(x-\hat{x})^t (x-\hat{x})\} = \text{Trace}(P) \quad (2)$$

단, $P = (H^t R^{-1} H)^{-1}$: 상태추정 오차 공분산행렬

$$H = \partial h / \partial x$$

나. 상태추정 오차 공분산행렬의 순환공식

주어진 측정시스템에서 u 개의 측정치 $\{z_{e1}, z_{e2}, \dots, z_{eu}\}$ 를 제거할 경우 행렬 부명제(matrix inversion lemma)를 적용하여 다음과 같이 새로운 상태추정 오차 공분산행렬이 구해진다.

$$P' = (H'^t R'^{-1} H')^{-1} = P - P H_e^t (H_e P H_e^t - R_e)^{-1} H_e P \quad (3)$$

단, $z_e = h_e(x) + v_e$
 $E\{v_e v_e^t\} = R_e : (u \times u)$ 대각행렬
 $P', H' : u$ 개의 측정치를 제거한 후의 상태추정오차 공분산행렬 및 자코비안행렬

$$H_e = \partial h_e / \partial x$$

(3)식의 순환공식은 상태추정 오차와 측정감도 계산에 이용된다.

다. 측정감도(measurement sensitivity)

측정시스템에서 n 개의 측정치 $\{z_{e1},$

$z_{e2}, \dots, z_{en}\}$ 를 제거하는 경우 평가함수의 변화 즉, 측정치의 감도는 다음과 같다.

$$K_e = \frac{\Delta J}{\Delta C} = \frac{J' - J}{\sum C_i} \quad (4)$$

$J' : n$ 개의 측정치를 제거한 후의 시스템 평가함수

$\sum C_i : n$ 개의 측정기기 설치비용

(4)식의 측정감도는 측정설비 단위의 투자비용에 대한 상태추정 오차의 효과를 나타내는 것으로 어느 측정치를 제거할 것인지 결정하는 요소이다.

라. 문제의 표기

이상의 고려사항을 이용하여 최적 측정설비 선정문제는 다음과 같은 최적화 문제로 정리된다.

$$\text{minimize } \sum^M C_i \quad (5)$$

s.t. $J \leq J_{sp}$

단, $M : \text{측정 세트수}$

$C_i : i - \text{측정설비의 설치비용}$

$J_{sp} : \text{상태추정 오차의 한계치}$

3. 최적 측정설비 선정 알고리즘

위에 제기된 최적화 문제를 직접 풀지 않고 감도를 이용하여 손차적인 제거 알고리즘을 채택한다.

최적 RTU 혹은 측정기기의 위치를 선정하는데 있어서 상태추정에 미치는 이들의 영향을 고려하여 본 연구에서는 계층적인 접근방법을 적용한다.

(1) RTU는 모든 모선에 설치되어 있다고

가정하고, 측정계기는 설치가능한 모든 위치에 설치되어 있다고 가정하여 다음의 방법에 의해 차례로 제거해 나간다.

- (2) 측정계기가 모두 유용한 가운데 하나의 RTU 고장에 대해서도 관측성이 보장되는 최적 RTU 위치를 설계하여 RTU 설치갯수를 줄인다.
- (3) (2) 단계에서 선정된 RTU 세트를 가지고 RTU 고장을 고려하여 주어진 상태추정 오차 범위내에서 최적 측정계기의 갯수를 결정한다.

가. 최적 RTU 선정 알고리즘

알고리즘 전체에 앞서 다음을 가정한 다.

- 모든 모선에 대한 RTU 설치비용은 거의 같다.
- 하나의 RTU 에 대한 고장은 그 모선에 있는 모든 데이터의 상실을 뜻한다.
- 한꺼번에 두 개 이상의 RTU 고장은 확률이 매우 낮아 무시한다.

최적 RTU 선정 알고리즘의 흐름은 다음과 같다.

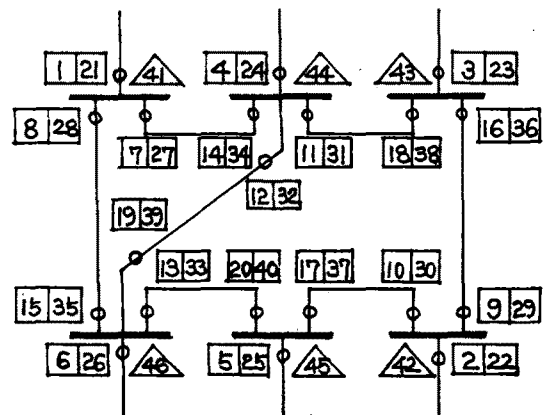
- (1) 각 RTU 제거시 하나의 RTU 고장에 대해서도 관측성이 보장되는 RTU 에 대해 감도를 계산한다.
- (2) 최소의 감도를 가지는 RTU 를 제거시킨다.
- (3) RTU 갯수를 더 줄일수 있는지를 검사하여 '예' 이면 (1) 단계로 돌아가고

'아니오' 이면 최적 측정계기 선정 알고리즘으로 넘어간다.

나. 최적 측정계기 선정 알고리즘

앞에서 선정된 RTU 세트를 가지고 주어진 상태추정 오차의 한계치까지 계기를 제거하여 최적 측정계기 위치를 결정한다.

- (1) 각 계기 제거시 하나의 RTU 고장에 대해서도 관측성이 보장되는 측정계기에 대해 감도를 계산한다.
- (2) 최소의 감도를 가지는 계기를 골라서 제거시킨다.
- (3) 시스템 평가함수를 계산하여 주어진 한계치보다 작으면 (1) 단계로 돌아간다.
- (4) 주어진 한계치보다 크면 그 전까지 남은 측정계기 세트를 최적 측정세트로 결정하고 끝낸다.



- : 측정가능 후보지
- : 유효/무효 전압측정번호
- △ : 전압크기 측정번호

그림 1. 6-모선 측정 계통도

4. 사례연구

본 연구에서 제시한 알고리즘의 효율성을 알아보기 위하여 그림 1. 의 6-모선 계통에 적용시켜 보았다. 이때의 가정사항은 다음과 같다.

각 측정오차의 분산 : $\sigma_i^2 = 0.01$

설비투자비 : $C_i = 1.$

RTU 고장확률 : 연간 5 %

결과는 그림 2.에 나타나 있으며 상태추정 오차는 1.179×10^{-3} 이다. ①번과 ②번 모선에는 RTU 를 설치할 필요가 없기 때문에 측정설비 설치비용면에서 유리하다.

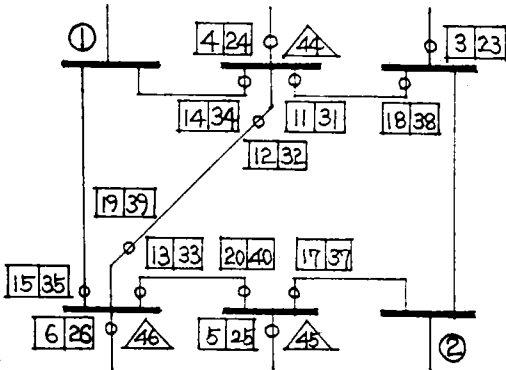


그림 2. 알고리즘 적용 결과 최종 측정세트

5. 결 론

본 연구 결과의 특징은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 매 단계마다 순환공식을 사용하기 때문에 계산이 용이하여 쉽게 가관측성 시스템을 구성할 수 있었다.
- (2) 하나의 RTU 고장에 대해서도 관측성

을 보장하기 때문에 신뢰도 향상에 크게 기여하였다.

- (3) 측정계기에 비하여 설치비용이 상당한 RTU 의 설치갯수를 고려함으로써 설비투자비를 크게 줄일 수 있었다.

또한 미래에 세 측정설비를 추가할 경우 최적의 위치를 산출하여 상태추정을 위한 최적시스템을 제시할 수 있을 것이다.

6. 참 고 문 헌

- (1) Schweppe, F.C., Wildes, J.(1970), Power System Static-State Estimation --- Part I, II and III, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-89, January, 1970 pp.120-135.
- (2) Koglin, H.J.(1975), Optimal Measuring System for State Estimation, Proc. PSCC Conference, paper 2.3/12, Cambridge, Sept. 1975.
- (3) Fetzter, E.E., Anderson, P.M.(1975), Observability in the State Estimation of Power System, IEEE Trans.on PAS, Vol. PAS-94, Nov./Dec, 1975, pp.1981-1988.
- (4) Phua, K., Dillon, T.S.(1977), Optimal Choice of Measurements for State Estimation, PICA Conference 1977.
- (5) Clements, K.A., Krumpolz, G.R., Davis, P.W.(1982), State Estimator Measurement System Reliability Evaluation---An Efficient Algorithm Based on Topological Observability Theory, IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-101, No.4, April, 1982, pp.997-1004.
- (6) Aam, S., Holten, L., Gjerde, O.(1983), Design of the Measurement System for State Estimation in the Norwegian High-Voltage Transmission Network, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-102, No.12, Dec. 1983, pp.3769-3777.