

계통분할에 의한 최적측정 시스템설계  
( optimal measurement system design by  
diakoptic approach )

문 영 현                    연 세 대 전 기 공 학 과  
권 태 원                    한 국 전 력 기 술 연 구 원  
최 상 봉\*                   연 세 대 전 기 공 학 과

1. 서    론

계통의 원활한 운용을 위하여 bad data를 억제하고 측정오차를 최소로 하는 상태추정법이 널리 사용되고 있으며 이상태 추정의 결과는 사용한 data의 질과 양에 좌우된다. data의 양을 늘리면 상태추정의 정확도는 개선되나 계산시간의 증가와 설비투자 비용이 증가되므로 적정량의 양질의 data를 수집하는 것이 요망되며 이를 위하여서는 system의 topology를 고려한 적절한 측정점을 선정하여야 한다.

또한 전 계통 중에서 측정기기하나가 고장날 확률은 매우 높기 때문에 측정기기 고장시 계통의 가관측성(observability)를 고려해야 하며 특히 단일미터사고(single meter outage)에 대해서는 어떠한 경우에도 계통이 가관측(observable)하여야 한다.

일반적으로 측정점 선정 알고리즘은 최소, 설비투자비로서 단일 meter outage 또는 측정치 유실에 대해서 항상(observability)를 보장할 수 있고 계통운용에 요망되는 상태추정 정확도를 만족시킬 수 있는 해를 구하는 것을 목적으로 한다. 그러나 이 알고리즘을 실제계에 적용시킬 경우 정보행렬의 dimension이 커짐으로 계산시간이 오래 걸릴뿐만 아니라 이것의 역행렬을 정확히 구해내기 어려운 문제점이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 계통을 분할하여 분할된 경계측정점을 증가적으로 변환시켜 대치함으로써 분할된 지역에

서 따로 따로 측정점을 선정, 정보행렬의 dimension을 줄여 계산시간을 단축시키고 역행렬을 보다 정확히 구해내어 실제계 적용에서 보다 효율적인 측정점을 선정하는데 그 목적을 둔다.

2. 계통분할에 의한 등가측정점 선정

최적 측정점 선정을 위한 평가함수는 측정점 선정 기준에 의해 정식화된다.

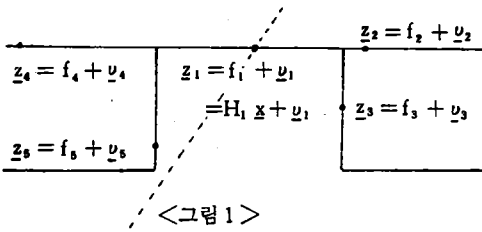
상태추정의 평가함수는 현재 널리 사용되고 있는 하중최소자승오차 공분산 행렬을 계산한다. 계통측정 방정식은 측정벡타가 상태변수의 비선형 함수로 주어진다.

$$z = h(x) + u \dots\dots\dots (1)$$

- 단,  $z$  ;  $(m \times 1)$  측정벡타
- $x$  ;  $(2m-1) \times 1$  상태변수 벡타
- $u$  ;  $(m \times 1)$  측정오차 벡타
- $E(u) = 0$
- $E(uu^t) = R$  ; 측정오차공분산행렬  
(대각선 행렬)

모든 측정오차는 상호 독립이며 정규분포를 갖는 것으로 가정한다.

아래 그림(1)과 같은 계통에서 분할된 경계측정점을  $z_1$  이라 하면



측정점  $z_1$  은 flow 상  $z_2, z_3$  두 개의 측정점으로 부터 알아낼 수 있으므로, 측정점  $z_1$  을  $z_2, z_3$  을 대신한 등가측정점  $z_1'$  로 변환시킬 수 있다.

이때  $z_1'$  은  $z_1$  과 Jacobian은 같고 분산값만 달라진 식(2)와 같이 쓸수 있다.

$$z_1' = h_1' x + v_1' \quad \dots\dots\dots (2)$$

noise 을 영으로 보고  $z_1'$  을 구하면,

$$\hat{z}_1' = h_1' x$$

$$v_1' = z_1' - \hat{z}_1'$$

여기서  $z_1'$  의 새로운 분산치를 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} R &= E(v_1' v_1'^t) = E((z_1' - \hat{z}_1') (z_1' - \hat{z}_1')^t) \\ &= h_1' E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^t] h_1 \\ &= h_1' P h_1 \end{aligned}$$

이 등가측정점을 포함하여 경계선 좌측지역에서 최적측정점을 선정하고, 다시 측정점  $z_4, z_5$  로 부터 등가측정점  $z_4', z_5'$  을 구하여 경계선 우측지역에서 최적측정점을 선정하는 방식이다.

### 3. 측정점 선정문제의 정식화

전력계통 운용상 계통상태변수 값뿐 아니라, 어떤 선로조류 등이 중요한 의미를 가질경우 이들을 관심량 (interesting quantities) 으로 취급하여, 관심량에 대한 효과가 상태추정오차에 반영되도록 하였으며 또한 상태추정신뢰도를 고려하기 위해 측정점의 고장확률을 평가함수에 반영하고 두개 이상의 측정점이 동시에 고장나지 않는다고 가정하여 고장발생 확률과 관심량을 적용한 평균상태추정오차 즉 평가함수  $J_{av}$  는 식(3)와 같이 유도된다.

$$J_{av} = E(\text{trace GPG}') \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$= \sum_{E_k \in \Omega} \text{prob}(E_k) \text{Trace Gp}_k G' \quad \dots\dots (4)$$

$$\text{단, } P = (H_e k R_e k H_e k)^{-1} \quad G = W^{\frac{1}{2}} F$$

$$F = \frac{\partial f}{\partial x}$$

$W$ : 하중행렬

$E_k$ : 측정설비고장

$\Omega$ : 모든  $E_k$  의 전체집합

$\text{prob}(E_k)$ : 고장  $E_k$  의 발생확률

$H_e k = \partial h / \partial x$  고장  $E_k$  발생때 측정 가능 세트에 해당하는 Jacobi 행렬

$R_e k$ ; 고장  $E_k$  발생때, 측정가능세트에 해당하는 측정오차 공분산 행렬.

식(4)에서 고장발생률  $\text{prob}(E_k)$  는 측정점이 추가 혹은 제거됨에 따라 재계산되고, 두개이상 고장발생확률의 무시에 의해 파생된 확률불균형을 정규화 한다.

측정설비 투자비는 측정세트 ( $M$ ) 의 함수로 주어지며 식(5)와 같다.

그리고 최적측정점선정문제는 식(3)을 사용하여 측정점선정을 위한 평가함수로 식(6)과 같이 정식화 된다.

$$C = C(M) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$= \sum_{i=1}^m C_i$$

단,  $C_i$  = 측정점  $i$  의 설비설치 투자비

$C_i$  = 총설비 투자비

$m$ : 측정점수

$$\text{Minimize } C(M) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{Constraint: } J_{av} = E(\text{trace GpG}') \quad \dots\dots\dots$$

최적측정점선정 평가함수인 식(6)을 최소화하는 과정에서 측정방정식(1)은 측정세트  $M$  에 의해 결정되며 측정세트의 구성에 따라 목적함수 및 설비 투자비가 서로 다르게 산출되어 최적해가 존재한다.

측정감도는 최적측정점 선정을 위해 어떤 측정점을 추가 혹은 제거할 것인가를 결정하는 요소로서 측정세트 상호간의 관계, 고장발생확률, 설비

투자비등이 종합적으로 고려되어 계산된다.

또한 측정감도 계산치에 의해 구성되는 측정점 선정 순위표는 한개 측정점의 고장 발생에 대해 항상 계통이 가관측하도록 구성된다.

$$\text{Sensitivity} = \Delta J_{av} / \left( \sum_{i=1}^a C_i \right) \dots\dots\dots (7)$$

단, a : 추가 혹은 제거될 측정점수  
 J<sub>av</sub> : 측정점추가 혹은 제거전, 후 평균상태 추정오차의 차

측정점을 추가하여 측정감도치가 가장 적은 값 (절대치 최대)을 나타내는 측정점은 평가함수값을 최대로 감소시키며, 반면 측정점을 제거하는 경우는 측정감도치가 가장 적은 값에서 평가함수에 미치는 영향을 최소로 한다.

#### 4. 최적측정점 선정 알고리즘

선정기법은 분할된 지역의 측정시스템에 대하여 경계측정점에서의 등가측정을 계산하고, 측정감도 분석법을 도입하였으며, 측정감도 및 상태추정 오차계산을 용이하게 하도록 역행렬 정리(matrix inversion lemma)에 의한 순환공식(recursive formula)을 유도하여 사용한다.

본 연구에서 개발한 알고리즘은 측정점추가 알고리즘, 측정점제거 알고리즘, 결합알고리즘의 3개 알고리즘으로 구성된다.

##### 가. 측정점 추가알고리즘

주어진 관측 가능한 측정세트를 구성하거나 혹은 기존측정계통을 중심으로 하여 평가함수에 미치는 영향이 가장 큰 측정점을 순차적으로 추가하여 측정세트를 결정한다.

##### 나. 측정점제거 알고리즘

측정가능한 모든 측정점으로부터 이미 미터가 설치된 것으로 가정하여 순차적으로 측정점을 제거하는 과정에서 가장 효과가 적은 측정점을 측정세트 구성에서 제외시킨다.

##### 다. 결합알고리즘

측정점 추가과정과 제거과정을 교차수행하여 최종측정세트를 선정하는 것으로 측정점 추가-제거과정과 측정점제거-추가과정을 거치는 두가지 선정방법이었다.

#### 5. 결 론

정밀산업의 발달로 공급전력의 고급화가 요망되고 수요의 증가와 더불어 전력계통은 대규모화 복잡화되어 고도의 계통운전 기술의 필요성은 날로 증가되어 가고 있다.

본 연구에서 행할 계통분할에 의한 측정점 선정기법은 측정위치 뿐만아니라, 설치해야할 미터의 종류 그리고 동일종류의 미터일지라도 측정정도에 따른 가격의 차등이 동시에 고려되어 있으므로 중요변전소와 벽지의 소용량변전소에 설치될 측정미터사양을 각각 다르게 선택함으로써 보다 경제적 측정설비 운용을 기할수 있고 계통을 분할하여 분할된 지역에서 측정점을 선정함으로써 설계통에 직접 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 【참고문헌】

1. Koglin, H. J., Optimal Measuring System for State Estimation, Proc, Psc Conference, paper 2,3/12 Cambridge, Sept. 1975.
2. Phua, K., Dillon, T. S., Optimal Choice of Measurements for State Estimation, PICA, 1977.
3. Aam, s., Holten, L., Gjerde, o., Design of the Measurement System for State Estimation in the Norwegian High-Voltage NO. 12, Dec, 1983, pp. 3769-3777.
4. Stagg and El-Abiad, Computer Methods in Power System Analysis.