

전철 급전계통에서 상태추정기법 적용에 관한 연구
A Study on the Application of State Estimation Method
to the Electric Railway Feeding Systems

김백, 홍효식, 노성찬*
Baik Kim, Hyo Sik Hong, Sung Chan Rho

안영훈**
Young Hoon Ahn

ABSTRACT

State estimation is to estimate the values of the states that minimize the error between the real states and the measured states, which are usually hampered by noise. It exploits the redundant data and the equality constraints achieved from the power systems. In the electric railway feeding systems, especially, the measured states may have significant level of noise in comparison with the commercial power systems. Since the meters - the sources of the data that include vehicles - are distributed in the long distance along the railroad, they are vulnerable to the signal interference. In this paper we have studied the application of state estimation method to the AT feeding systems and shown that this method can increase the reliability of the measured data.

1. 서 론

급전계통의 상태추정이라 함은 급전계통 내에서 계측기로 측정된 상태변수의 값을 실제 값에 가깝도록 추정해 내는 작업을 의미한다. 일반적으로 계통에서 측정된 상태변수의 값에는 측정계기의 오차와 함께 데이터 전송 및 변환 과정에서의 노이즈도 포함하고 있기 마련이다. 따라서 보정되지 않은 이러한 원시데이터를 SCADA 등의 중앙관리시스템에 이용하면 시스템 자체의 신뢰도 하락과 급전계통의 안정성을 손상시키는 원인이 될 수 있다. 대부분의 상업전력회사에서 사용하는 EMS(Energy Management System)에서는 상태추정이 필수적인 과정으로 인식되고 있으며 배전계통에 까지 확장 적용되고 있는 실정이다.[1][2] 한편 전철 급전계통은 특성상 데이터의 발생원, 즉 계측기들이 전차선로를 따라 지리적으로 광대한 범위에 분포되어 있고 대부분의 계측기들이 야외에 설치되어 있으므로 전자기적 노이즈에 극히 취약하며, 특히 주요 데이터의 원천이 되는 차량의 소비전력, 전압 및 전류 등은 차량이 이동하고 있는 관계로 RF 모바일 네트워크를 통한 전송 외에는 적절한 매체가 없으며 이럴 경우 유무선 통신망의 인터페이스에서 발생하는 절삭(truncation)등에 의하여 오차가 확대되므로 상태추정은 급전계통을 정확하게 파악하기 위하여 필수적이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 전철 AT급전계통을 대상으로 상태추정 기법을 적용하여 측정 데이터의 신뢰성을 증가시키는 방안에 대하여 연구 하였다. AT급전계통 내에서 측정점 선정의 문제 즉, 상태변수와 잉여(redundant) 데이터 군의 선정에 관한 문제와 함께 상태추정을 통한 원시 데이터 보정의 유효성을 표본 계통을 통하여 검증하였다.

* 저자1 한국철도대학, 전기제어과, 회원

E-mail :whitek@krc.ac.kr

TEL : (031)460-4279 FAX : (031)462-2944

** (주)세종기술

2. 상태추정 알고리즘

상태추정은 잡음이 섞여있는 측정 데이터로부터 계통 상태변수의 값을 실제 상태에 가깝도록 추정해 내는 수학적 알고리즘이다. 일반적으로 관찰 대상이 되는 계통에서 계측기를 통하여 측정되는 데이터의 개수는 그 계통에서의 상태변수의 숫자보다는 많게 되며 이렇게 남은 잉여의 측정 데이터들은 상태변수의 함수로 표현할 수 있다. 상태추정의 과정에서는 이들 잉여의 측정 데이터를 통하여 상태변수의 값을 실제 상태에 가깝도록 추정해 나가게 되며, 만약 어떤 계통에서 상태변수의 값만을 측정하였다고 하면 우리는 그들 측정값으로부터 실제 상태에 가까운 상태변수 값을 추정해 낼 수는 없게 된다. 이제 $h(X)$ 를 계통 상태변수 X 의 함수로 표현되는 측정 데이터의 계산된 추정값이라 한다면, 우리가 실제로 측정하는 측정 데이터의 측정값 Z_M 에는 오차 ζ 가 포함되게 될 것이다.

즉,

$$Z_M = h(X) + \zeta \quad (1)$$

여기서 상태변수의 수를 n , 측정 데이터의 수를 m 이라 할 때,

X : $n \times 1$ 상태벡터

Z_M : $m \times 1$ 측정벡터

$h(X)$: 상태변수에 의해 추정된 계산값 $m \times 1$

ζ : $m \times 1$ 오차벡터

만약 계통이 정상상태에 있고 측정을 여러번에 걸쳐 충분히 시행하였다면, 오차의 평균은 0이 되고 Z_M 은 실제값에 접근할 것이다. 다시 말하면 측정오차 ζ 는 일반적으로 평균값이 0인 가우시안 (Gaussian) 통계분포를 가지며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P(\zeta_i) = \frac{e^{-\zeta_i^2/2\sigma_i^2}}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \quad (2)$$

여기서 오차의 분산 σ_i^2 이 클수록 오차 ζ_i 가 큰 값으로 나타날 확률이 커짐을 알 수 있다. 한편 모든 측정오차가 상호 독립적이라면 측정오차 공분산 행렬 R 은 다음과 같은 대각행렬로 표시된다.

$$R = E[\zeta \zeta^T] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이제 상태추정은 다음과 같은 목적함수를 최소화하는 상태변수 X 를 구하는 과정으로서 WLS(Weighted Least Square) 문제로 귀결된다.

$$J(X) = [Z_M - h(X)]^T W [Z_M - h(X)] \quad (4)$$

여기서 W 는 측정 데이터의 가중치(측정계기의 정확도)를 나타내는 대각행렬로서, 식(2)를 통하여 알

수 있는 바와 같이 분산이 큰 측정계기 일수록 가중치를 작게 설정하여야 하므로 $W = R^{-1}$ 로 대체할 수 있다. 측정오차의 분산은 실험적으로 구해질 수 있다.[3]

$$J(X) = [Z_M - h(X)]^T R^{-1} [Z_M - h(X)] \quad (5)$$

이 식의 최적해 \hat{X} 는 식(5)의 기울기가 0으로 되는 조건으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial J(\hat{X})}{\partial X} = -2 \left[\frac{\partial h(\hat{X})}{\partial X} \right]^T R^{-1} [Z_M - h(\hat{X})] = 0 \quad (6)$$

이 식은 n 개의 상태변수로 표현되는 m 개의 비선형연립방정식으로서 Newton-Raphson 반복법으로 해를 구할 수 있다. 이 때 자코비안(Jacobian)은 1계 항만을 고려하면 다음과 같이 근사화 된다.

$$J_a(X) = \frac{\partial^2 J(X)}{\partial X^2} \simeq - \left[\frac{\partial h}{\partial X} \right]^T R^{-1} \left[\frac{\partial h}{\partial X} \right] \quad (7)$$

그러면 Newton-Raphson 반복법의 반복계산식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X^{k+1} = X^k + \left\{ \left[\frac{\partial h}{\partial X} \right]^T R^{-1} \left[\frac{\partial h}{\partial X} \right] \right\}^{-1} \left[\frac{\partial h}{\partial X} \right]^T R^{-1} [Z_M - h(X)] \quad (8)$$

이제 (8)식에 의해 (5)식의 목적함수를 최소화하는 해를 구하였다면

$$J(\hat{X}) = [Z_M - h(\hat{X})]^T R^{-1} [Z_M - h(\hat{X})] = \text{Residual} \quad (9)$$

이 된다. 이제 다음 시간대에 측정기들로부터 받아들인 $Z_{M,new}$ 를 다시 상태추정 하여 새로운 추정값 \hat{X}_{new} 를 구하였다면,

$$J(\hat{X}_{new}) = [Z_{M,new} - h(\hat{X}_{new})]^T R^{-1} [Z_{M,new} - h(\hat{X}_{new})] = \text{Residual}_{new} \quad (10)$$

과 같이 목적함수의 새로운 잔존값(residual)을 얻을 수 있다. 매 시간대에 받아들인 측정치와 상태추정치와의 잔존값을 구하여 이 값이 우리가 통계적으로 설정한 문턱값 이상이 나오게 되면 그것은 측정치에 불량정보가 섞여 있다는 것을 의미하는 것으로 해석할 수 있으며 이런 경우에는 불량정보를 유발시킨 측정기를 제거하여야 상태추정의 신뢰성을 유지할 수 있게 된다. 그림 1은 AT급전계통을 포함한 SCADA시스템에서 상태변수의 획득과 전달 방법에 대한 설명을 나타내고 있다.

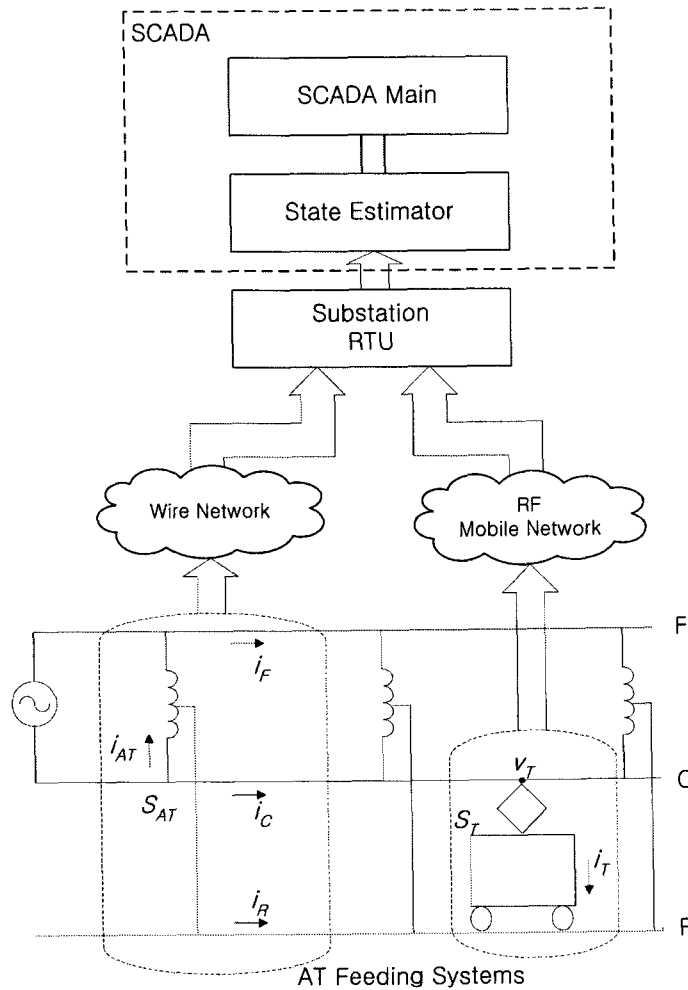


그림 1. AT급전계통에서의 상태추정

3. AT급전계통에서의 측정점 선정과 상태추정

열차는 시간에 따라 위치가 변경되는 이동 부하로서 회로 해석적인 측면에서 보면 급전 시스템내의 열차 위치에 따라 시스템의 위상(topology)을 변경시키게 되며 이에 따라 회로 변수 및 관련 방정식이 바뀌게 된다. 우선적으로는 회로망 해석이 가능하게 계통의 상태변수를 선정하는 문제가 있는데 어떤 계통의 상태변수 셋트는 유일하게 주어지는 것이 아니므로 실제 계통에서는 측정이 가능한 부분에서 얻을 수 있는 상태들로 상태변수를 선정해야 할 것이다. 본 논문에서는 AT급전계통에서의 다양한 상태변수 셋트를 검토하여 그 중에서 각각의 AT에 흐르는 전류와 AT전압 및 차량의 부하전류와 팬타그래프 전압을 상태변수 셋트로 선정하였다. (그림 2 참조) 전차선 전류(i_{C_i})를 상태변수로 선정해도 무방하기는 하나 이럴 경우에는 열차가 속해 있는 AT구간에서는 전차선 전류를 열차의 좌우 양측에서 측정하여야 하므로 전체적으로 측정기 설치점이 증가하여 비효율적이 된다. 또한 차량은 정전력 부하이므로 어떠한 경우에도 차량의 전류와 전압을 상태변수에서 제외시킬 수는 없다. 그러나 상태변수 셋트에 포함된 열차관련 변수들은 변전소 RTU까지는 RF 모바일 네트워크를 통한 전송 외에는 달리 방법이 없으므로 AT급전계통을 포함한 상태추정의 실용화에서 가장 큰 제약 요소가 될 수 있다. 잉여 데이터로는 상태변수 측정지점에서의 유효 및 무효전력을 선정하기로 하며 일반적으로 이 지점에서 설치되어 있는 유무효 전력계를 이용하므로 현실적으로 어려움이 없다고 본다. 이제 그림 2와 같은 표본 AT급전계통을 대상으로 상태추정을 시행해 보기로 한다.

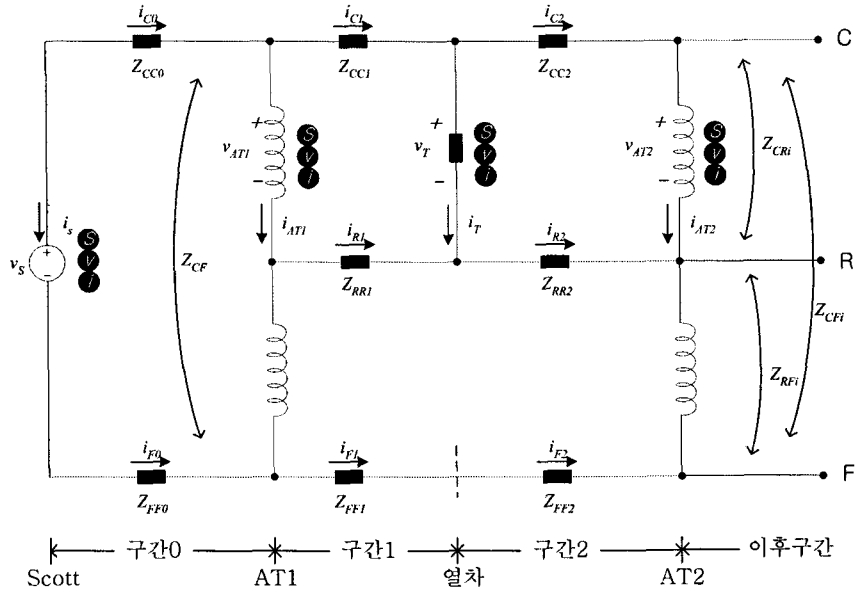


그림 2. 표본 AT급전계통과 측정점 선정

①전원 및 열차부하

전원전압 : $v_s = 55(\text{kV}) \angle 0^\circ$

열차부하 : 역행시 : $S_T = 10.0(\text{MVA})$ 역률각 40°

②구간 거리(단위 : km)

구간 0	구간 1	구간 2
0.3	8.0	4.0

③선로 임피던스(단위 : Ω/km)

Z_{CC}	$0.13 + j0.82$	Z_{RR}	$0.19 + j0.72$	Z_{FF}	$0.21 + j0.95$
Z_{CR}	$0.06 + j0.38$	Z_{RF}	$0.06 + j0.39$	Z_{CF}	$0.07 + j0.38$

우선 상태변수를 위의 설명과 같이 선정하면, 회로방정식은 다음과 같이 쓰여 진다.

구간 0에서

$$v_s = \frac{1}{2} (Z_{C0} + Z_{F0})i_T + 2v_{AT1} \tag{11}$$

구간 1의 상부 메쉬에서

$$v_{AT1} = (Z_{C1} + Z_{R1})i_T + (Z_{C1} + 2Z_{R1})i_{AT2} + v_T \tag{12}$$

구간 2의 상부 메쉬에서

$$v_T = (Z_{C2} + 2Z_{R2})i_{AT2} + v_{AT2} \tag{13}$$

구간 1, 2의 하부 메쉬에서

$$v_{AT1} = -Z_{R1}i_T - (2Z_{R1} + 2Z_{R2} + Z_{F1} + Z_{F2})i_{AT2} + v_{AT2} \tag{14}$$

열차부하 S_T 에 대해서

$$S_T = v_T \times i_T^* \tag{15}$$

여가서, 위 식에 표현된 선로 임피던스들은 2선구간인 구간 0에 대해서는

$$Z_{00} = Z_{C00} - Z_{C00}, \quad Z_{F0} = Z_{FF0} - Z_{C00} \quad (16)$$

이 되고, 3선 구간인 구간 1, 2에 대해서는

$$\begin{aligned} Z_{Ck} &= Z_{CCK} + Z_{RFk} - Z_{CRk} - Z_{CFk} \\ Z_{Rk} &= Z_{RRk} + Z_{CFk} - Z_{RFk} - Z_{CRk} \end{aligned} \quad (17)$$

$$Z_{Fk} = Z_{FFk} + Z_{CRk} - Z_{CFk} - Z_{RFk}$$

(k 는 구간 번호 $k \neq 0$)

이 된다.[4]

이제 그림 2에 나타난 바와 같이 전원(Scott변압기), 각각의 AT 및 차량에서 전압(v), 전류(i) 그리고 복소전력(S)를 측정하기로 한다. 측정지점에는 위상계(Phase angle meter)와 역률계(Power factor meter)가 설치되어 있어 전압 및 전류의 위상을 측정할 수 있다고 본다 그러면 상태추정을 위한 상태벡터 X 와 측정벡터 Z_M 은 각각 다음과 같이 된다.

$$X = [i_T \ i_{AT2} \ v_T \ v_{AT1} \ v_{AT2}]^T$$

$$Z_M = [i_T \ i_{AT2} \ v_T \ v_{AT1} \ v_{AT2} \ S_S \ S_{AT1} \ S_T \ S_{AT2}]^T$$

표 1. 계통해석 및 상태추정 결과

측정변수	계통 해석치(PU)	계측기 측정치(PU)	상태추정치(PU)
$i_{T,re}$	0.518410	0.533962	0.515683
$i_{T,im}$	-0.461966	-0.475824	-0.459591
$i_{AT2,re}$	-0.166316	-0.161326	-0.162624
$i_{AT2,im}$	0.142902	0.138614	0.139543
$v_{T,re}$	0.959665	0.988455	0.972727
$v_{T,im}$	-0.028560	-0.029416	-0.028959
$v_{AT1,re}$	0.999152	0.969177	0.969725
$v_{AT1,im}$	-0.000641	-0.000622	-0.000621
$v_{AT2,re}$	0.976736	1.006038	1.007237
$v_{AT2,im}$	-0.017768	-0.018301	-0.018307
P_S	-0.259205	-0.251429	-0.257842
Q_S	0.230983	0.224053	0.229796
P_{AT1}	-0.092867	-0.098439	-0.092391
Q_{AT1}	-0.087947	-0.093224	-0.087461
P_T	0.510693	0.480052	0.514928
Q_T	0.428527	0.402815	0.432124
P_{AT2}	-0.164986	-0.174885	-0.166356
Q_{AT2}	-0.136622	-0.144819	-0.137576
가중치 잔존값		0.008169	0.04117

1. 15 MVA, 27.5 kV 기준

2. 측정 변수에서 하첨자 re 는 실효치, 하첨자 im 은 무효치를 나타냄.

표 1은 계통해석을 통한 실제값과 계측기 측정치(측정벡터 Z_M) 그리고 상태추정치들 각각 나타내고 있다. 계측기 측정치는 전압 및 전류계의 오차가 $\pm 3\%$, 전력계의 오차가 $\pm 6\%$ 로 보고 이 범위 내에서 임의로 작성한 값이며 측정 데이터의 가중치는 전압 및 전류의 경우가 2.0 그리고 전력의 경우는 1.0으로 선정하였다. 상태추정치를 살펴보면 실제값인 계통 해석치에 많이 근접하여 초기의 계측기 측정치 보다는 상당히 보정되었음을 알 수 있는데, 이는 계측기 측정치와 계통 해석치 간의 가중치 잔존값이 0.08169임에 반해, 계측기 측정치와 상태추정치 간의 가중치 잔존값은 0.04117이 되었음으로도 알 수 있다. 여기서 한 가지 주목해야 할 사항은 표 1의 결과는 (9)식으로 표현되는 측정치 가중 오차를 최소화하는 해라는 점이며 잉여 데이터를 제외한 상태치 가중 오차에 대해서도 최적화 해라는 보장은 없다는 점이다. 이는 본 연구를 진행하는 과정에서 다양한 표본으로 시뮬레이션 한 결과로도 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 전철 AT급전계통을 대상으로 상태추정 기법을 적용하여 측정 데이터의 신뢰성을 증가시키는 방안에 대해 연구 하였다. 실제의 AT급전계통에 적용할 수 있는 상태변수 셋트로는 AT와 차량에서의 전압 및 전류를 선정하였고, 잉여 데이터로는 이들 지점에 일반적으로 설치되어 있는 유효 및 무효전력계의 데이터를 이용하여 표본 AT급전계통에 대한 상태추정을 시행해 본 결과 상당한 데이터 보정이 이루어 질 수 있음을 알게 되었다. 한편, 현재 운용되고 있는 전철 급전계통에서 상태추정기법을 적용하기 위해서는 몇가지 선결조건이 필요한데, 우선은 현재 전철변전소에 한정되어 있는 SCADA의 관제범위는 AT를 포함한 급전계통 하단부 까지 확장되어야 하며 또한 계통에서 가장 중요한 부하인 차량과 관련한 전압, 전류 등의 변수 값을 측정하여 적절한 수단으로 전송되어야 한다는 점이다. 한편 상태추정 자체의 신뢰성을 증가시키기 위해서는 불량정보가 검출되어 이를 제거 시키는 경우에도 충분한 잉여 데이터가 확보되어야 한다는 점에서 SCADA등의 신증설시에 측정점 선정에 관한 면밀한 검토가 있어야 할 것을 본다.

참고문헌

1. A. P. Sakis, Fan Zhang(1996), "Multiphase Power Flow and State Estimation for Power Distribution Systems", IEEE Tran. on PWRs, Vol. 11, No. 2, pp. 939~946
2. Ke Li(1996), "State Estimation for Power Distribution System and Measurement Impact", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 11, No. 2, pp. 911~916
3. G. L. Kusic(1986), "Computer Aided Power Systems Analysis", Prentice-Hall, pp. 350~359
4. B. Kim, Y. H. Moon(2006), "Analysis of AT Feeding Systems considering the Voltage Constraint Conditions of the Pantagraph", Journal of the KSR, Vol. 9, No. 6, pp. 652~653