

주성분 분석에 의한 터빈 사이클 측정 데이터의 검증 Verification for the Measurement Data of Turbine Cycle Using Principal Component Analysis

*양학진¹, #김성근²

* H.J. Yang¹, # S.K. Kim(kimskun@hoseo.edu)²

¹ 호서대학교 대학원, ² 호서대학교 자동차공학과

Key words : Turbine Cycle, Measurement Verification, Correlation, Principal Component Analysis

1. 서론

발전소 전력 생산의 경제성을 위해서는, 정확한 성능 파악 및 개선을 통한 발전소 효율의 증대를 기하며 향상된 경제성을 확보하는 것이 발전소의 운전 및 관리 목표가 되어야 한다. 이러한 성능 분석의 가장 기본이 되는 운전성능 입력 측정 데이터 검증이란, ASME PTC(Performance Test Code)⁽¹⁻⁴⁾ 등에 의하여 표준화가 되어 있는 성능 분석 계산 절차에 사용되는 약 450여개의 온도, 압력 및 유량등의 측정 데이터를 정확히 검증하여, 성능 계산 결과의 신뢰성을 보장하는 것이다. 본 연구에서는 상관관계에 따른 검증 연구를 토대⁽⁵⁾로 하나의 측정 데이터가 잘못된 수치를 갖고 있을 때, 이 잘못된 수치를 나타내는 정보가 사이클의 다른 측정 데이터에서 발견될 수 있다고 가정하였으며, 발전소 설계 데이터, 인수 성능 데이터 및 기타 정상 운전에서의 데이터를 오류 없는 성능 데이터로 보고 이 정상 데이터를 기반으로 하여 오류가 있는 측정 데이터의 정확한 추정 값을 제시하는 알고리즘을 개발하여, 입력 측정 데이터를 검증하였다. 이러한 상관관계 모델을 기반으로 주성분 분석을 사용하여 온라인 성능 분석에 적용할 수 있는 선형 관계를 도출하여 단순화된 검증 모델을 구성하였으며, 커널 회귀 모델을 적용하여 운전 조건의 변화에도 적용할 수 있도록 모델의 일반성을 증대시켰다.

2. 입력 검증 알고리즘

발전소 정밀 시험 때의 운전 성능 계산을 위해서 발전소 당 450개 정도에 해당하는 각 사이클 지점의 온도, 압력, 유량 및 발전기 출력 등의 데이터 항목이 측정된다. 측정 데이터는 발전소 정밀 성능 분석을 위해서 특별히 설치한 계측기에서 측정되는 데이터와, 이미 발전소 운전을 위해 상시 설치되어 있는 계측기로부터 온라인으로 연결되어 플랜트 컴퓨터로 입력되는 성능관련 측정 데이터로 나눌 수 있다.

이 데이터는 수일에 걸쳐서 많은 분량의 샘플링이 이루어지며, 이 샘플링된 데이터에 대한 평균화 작업, 필터링 및 순간 측정 오류가 분명한 데이터에 대한 처리가 이루어져서 한 개의 측정값으로 구성된다. 본 연구는 이러한 샘플링 및 필터링에 의한 센싱 검증이 아니라, 정상 측정되고, 평균화 및 필터링된 데이터 측정값에 대하여 발전소 전체 사이클 데이터의 상관관계 정보를 사용하여, 유효화하고 검증하는 것이다. 본 연구에서 구성한 입력 검증 알고리즘을 요약하면 다음과 같다(Fig. 1).

(1) 발전소 성능 설계 데이터, 인수 데이터 및 정밀 측정 데이터를 기준으로 정확성이 인정되는 정상 데이터를 구성하였으며, Table 1은 정상 데이터 중 일부를 나타낸 것이다.

(2) 상관분석(Correlation Analysis)을 통하여 정상 데이터들 사이에 상관관계를 구하고, 데이터셋을 구성한다.

(3) 주성분분석(Principal Component Analysis)을 통하여, 각각의 데이터셋에 대한 고유벡터 및 주성분 벡터를 구한다.

(4) 이 정상 데이터를 사용하여 해당 측정 변수를 종속 변수, 상관 변수들을 독립 변수로 하는 커널 회귀 모델을 만들고, 이 모델의 출력을 유효 데이터로 사용한다.

2.1 상관분석(Correlation Analysis)

운전 성능 계산에 필요한 모든 정상 데이터에 대하여 각 변수와의 Pearson Correlation을 구하고, 상관 계수의 값이 0.80 이상인 변수들의 집합을 데이터셋으로 구성하였다. Fig. 2는 M001 발전기 출력에 대한 상관 계수들을 보여준 것이다.

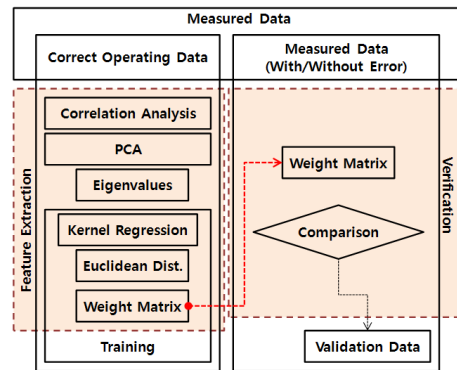


Fig. 1 Verification Algorithm of the Measured Input Data

Table 1. Normalized Sample of the Measurement Data.

Item	M-001	A-001	A-002	A-006	A-007	A-210W	A-310W	A-410W
1	1039.71	3.09	2.48	17.37	26.86	25.84	2.66	2.09
2	1029.15	2.61	2.71	18.96	26.48	25.46	2.47	2.57
3	1031.17	2.84	2.57	17.52	27.75	26.41	2.66	2.38
4	1042.38	2.79	2.25	16.64	27.77	26.89	2.66	2.47
5	1043.56	2.77	2.97	16.07	28.15	27.08	2.57	2.76
6	1043.60	2.84	2.75	18.31	26.50	25.56	2.66	2.76
7	1045.71	2.83	2.49	18.39	26.50	25.08	2.66	2.38
8	1034.15	2.85	2.62	20.05	26.24	25.37	2.57	2.19
9	1037.27	2.95	2.49	19.03	28.60	27.17	2.76	2.66
10	1036.90	2.93	2.53	18.55	27.58	26.32	2.66	2.38

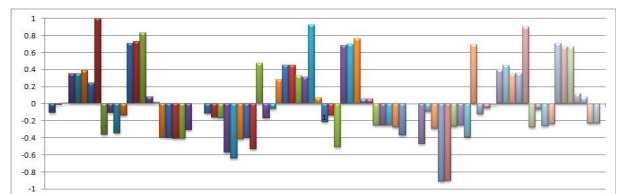


Fig. 2 Correlation Analysis of 'M-001' parameter

2.2 주성분 분석 (Principal Component Analysis)

어느 하나의 측정 데이터와 관련성이 높은 성능 변수를 설정하는 방법은 정상 운전에서의 데이터를 기반으로 아래의 절차에 의하여 이루어진다.

(1) 정상 데이터를 이용하여 아래 식에 의해 전체 정상 데이터의 평균을 구한다(식(1)).

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

(2) 정상 데이터에 대한 공분산행렬을 구한다(식(2)).

$$\begin{aligned} \Omega &= \overline{XX^T} \\ \overline{X} &= [x_1, x_2, \dots, x_n] \\ \overline{x_i} &= x_i - m \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 앞에서 계산된 공분산에 대한 고유값과 고유벡터를 구한다(식(3)). Table 3, 4는 하나의 데이터셋('M-001' DataSet)에 대한 고유값 및 고유벡터 v_j 를 나타낸 것이다.

$$\Omega = \lambda v_j \quad (3)$$

Table 3. Eigenvalues of the Covariance Matrix

	Eigenvalue	Difference	Proportion	Cumulative
1	484.585282	433.314758	0.9034	0.9034
2	51.270525	50.832367	0.0956	0.9989
3	0.438158	0.367643	0.0008	0.9998
4	0.070515	0.025847	0.0001	0.9999
5	0.044668	0.025847	0.0001	1.0000
6	0.017809		0.000	1.0000

Table 4. Eigenvectors

	Principal1	Principal2	Principal3	Principal4	Principal5	Principal6
M-001	0.043098	0.998623	0.005285	0.005972	0.016635	-0.023547
E-063	0.001356	0.023084	0.106405	0.090142	-0.056453	0.988347
F-03C	-0.001544	0.004092	0.768995	-0.504063	-0.388656	-0.059109
F-07A	-0.001348	-0.013400	0.260447	-0.312162	0.912003	0.052839
F-07B	-0.000396	-0.012771	0.573987	0.800196	0.117190	-0.127784
C-0PB	0.999068	-0.043127	0.001395	-0.001263	0.000035	-0.000397

(4) 주성분 벡터 p_i 는 고유벡터 v_j 와 정산 데이터 x_i 로 표현할 수 있으며, 이를 표본 데이터로 구성한다(식(4)).

$$p_i = v_i^{-1} x_i \quad (4)$$

2.3 커널 회귀 모델 (Kernel Regression Model)

커널 회귀 모델은 표본 데이터 쌍이 주어졌을 때, 이를 가지고 함수의 근사치를 구하는 방법으로서, 입력 데이터와의 유클리디안 거리(Euclidean Distance)를 계산하여 최소 에러(E_{min})를 찾는다.

커널 회귀 모델을 이용한 학습은 다음과 같다.

(1) 표본 데이터를 구성한 정상 데이터 중에 임의로 추출한 $n/2$ 개의 표본 데이터를 학습용 측정 데이터 x_j 를 산출하고, 이에 따른 주성분 벡터 p_j 를 구한다(식(5)).

$$p_j = v_i^{-1} x_j \quad (5)$$

(2) 학습용 측정 데이터 x_j 의 주성분 벡터 p_j 에서 정상 데이터 x_i 의 주성분 벡터 p_i 에 대한 유클리드 거리를 계산한다(식(6)).

$$d_{ij} = \| p_i - p_j \|^2 = \sqrt{\sum_{j=1}^{n/2} (p_i - p_j)^2} \quad (6)$$

(2) 가우시안 커널을 이용하여 가중치 및 커널 폭을 구하였으며, h_0 는 0.01, Δh 는 0.01로 설정하였다(식(7)).

$$w_j = K_h(d_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi h^2}} e^{-d_{ij}/2h^2} \quad (7)$$

$$h = h_0 + \Delta h \leq h_{max}$$

$$y = \frac{\sum_{j=1}^{n/2} x_j * w_j}{\sum_{j=1}^{n/2} w_j}$$

$$E_d = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_{n/2}^2}$$

$$\sum E_d < \epsilon$$

(3) $w_j, x_j * w_j$ 의 합을 이용하여 y 를 구한다. 모든 값들에 대한 오차를 구하고 설정 오차(ϵ)와 비교하여, 만족하지 못하면 커널 폭 h 을 조절하면서 (1)에서 (3)까지를 계속 반복한다. 최종적으로 최소 오차에 대한 커널 폭 h 을 구함으로써 학습을 완료한다.

이렇게 하여 학습이 완료된 커널 회귀 모델을 구성한 후, 미리 계산된 가중치 w , 커널 폭 h 을 이용하여 터빈 사이클의 측정 데이터를 검증한다.

3. 비교

Table 5에서 보이는 바와 같이 실제 측정 데이터와 커널 회귀 모델을 이용하여 계산한 값을 비교하였다.

Table 5. Comparison of the Measured Data and Kernel Regression

Parameter (M-001)	Measured	Calculated (h=0.18)	Parameter (M-001)	Measured	Calculated (h=0.18)
1	1030.3960	1031.1058	2	1028.5000	1030.3194
3	1030.0333	1030.3192	4	1029.2290	1029.9393
5	1030.0100	1030.1989	6	1030.6880	1030.1667
7	1030.9790	1031.3408	8	1031.3540	1031.3420
9	1032.6250	1031.3460	10	1029.4790	1030.6675

4. 결론

터빈 사이클의 열성능 계산에 있어서 정확성을 결정하는 요소는 발전소 성능 분석용 측정 데이터를 유효화하여 검증을 한 후에 성능 계산을 하는데 있다. 계산 절차 등은 이미 ASME PTC 등에 의하여 확립되어 있으므로, 유효화 및 검증은 성능 계산에 있어서 핵심적인 요소가 된다.

본 연구에서는, 주성분 분석을 통하여, 어느 하나의 측정 데이터와 관련된 성능 데이터를 찾고, 이를 기반으로 커널 회귀 모델을 만들어서, 측정 입력 데이터를 검증 할 수 있는 모델을 구성하였다. 또한 측정 오류 값에 대하여 일반성이 증대된 커널 회귀 모델을 기반으로 측정 보정 모델을 제시할 수 있었다.

참고문헌

1. American Society of Mechanical Engineers Performance Test Code 6, "Steam Trubies", 1976.
2. American Society of Mechanical Engineers Performance Test Code 6A, "Appendix A to Test Code for Steam Turbines", 1982.
3. American Society of Mechanical Engineers Performance Test Code 12.1, "Closed Feed Water Heaters", 1978.
4. American Society of Mechanical Engineers Performance Test Code 12.2, "Steam Condensing Apparatus", 1983.
5. 최광희, 김영호, 김성근, "원자력 발전 터빈 사이클 열성능 분석 시스템", 대한기계학회 추계 학술대회논문집 B, pp. 19~24, 1999.