

추정모델에 의한 화력발전 플랜트 계측데이터의 검증 및 유효화

김성근*, 윤문철**, 최영석***

Estimation Model-based Verification and Validation of Fossil Power Plant Performance Measurement Data

Seong Kun Kim*, Moon Chul Yoon**, and Young Suk Choi***

ABSTRACT

Fossil power plant availability is significantly affected by gradual degradations of equipment as operation of the plant continues. It is quite important to determine whether or not to replace some equipment and when to replace the equipment. Performance calculation and analysis can provide the information. Robustness in the performance calculation can be increased by using verification & validation of measured input data. We suggest new algorithm in which estimation relation for validated measurement can be obtained using correlation between measurements. Input estimation model is obtained using design data and acceptance measurement data of domestic 16 fossil power plant. The model consists of finding mostly correlated state variable in plant state and mapping relation based on the model and current state of power plant.

Key Words : Measurement validation(측정 유효화), Model-based verification(모델 기반 검증), Plant performance(플랜트 성능)

1. 서 론

1.1 발전소 성능 분석 절차

화력 발전소 플랜트의 전체 효율, 열성능 및 기기 효율을 파악하기 위해서 터빈 사이클의 열평형(heat balance)에 대한 계산이 이루어지게 되는데, ASME PTC (Performance Test Code) 6, PTC 6A^[1-4]를 토대로 하여 터빈사이클 열평형 계산 및 보정 계산을 하게 된다. 터빈사이클의 열평형 계산은 사이클 유동 플로우내의 각 노드에서의 유체들의 유량, 온도, 엔탈피, 엔트로피 등의 상태량과 각 기

기 효율, 터빈 출력, 열소비율(heat rate)을 결정하기 위하여 행한다. 이러한 열평형 계산에 있어서 수렴 문제는 터빈 팽창선 끝점을 독립 변수로 하고 열평형 오차 또는 습분 오차를 목적 함수로 하는 최적화 문제가 된다. PTC에서 제공하는 열평형 수렴의 방법은 몰리에르 차트 상에서 팽창선의 곡률을 이용한 근사해법을 제공하고 있다. 계산 과정은 다음의 순서^[10]로 열평형 오차가 최소화되도록 이루어진다.

보일러 급수 입구에서 고압급수가열기를 거쳐 저압급수가열기로의 열평형 계산을 끝낸 이후, 여

* 호서대학교 기계설계전공
** 부경대학교 기계자동차공학부
*** 인덕대학 메카트로닉스학과

기에서 결정된 각 급수가열기의 추기 단의 유량을 기초로 하여 터빈축의 추기유량 및 상태량을 파악한다. 보일러 입구 급수량, 재열 증기량 및 기타 유량으로부터 주증기 유량을 계산하며, 교축, 재열 밸브 및 글랜드 누설 증기량 계산을 위해 누설 증기량에 대한 PTC의 계산절차에 따라 누설계수와 비례식을 사용하여 누설 유량을 결정한다. 습분 분리단이 있는 경우에는 추기 단의 건 기준 효율과 습분 보정에 의한 팽창선 계산과 반복 계산 절차를 통해 각 추기 단에서의 상태량을 계산한다.

이를 바탕으로 저압 터빈 ELEP(Expansion Line End Point) 계산이 이루어지며, 새로운 터빈 팽창선에서 계산된 ELEP 와 추정된 ELEP의 차가 허용편차 0.1 Btu/lb를 초과하면 추정 ELEP 대신 계산된 ELEP를 이용하여 몰리에르 차트 상의 터빈 팽창선을 재구성하고 반복 열평형 계산 과정에 들어가게 된다.^{15,6,91} 이 계산 과정을 통해 발전소 열평형 정보를 본 연구에서 개발된 프로토타입 프로그램에서 제공하는 Fig.1과 같이 데이터와 그래픽 결과를 제공하게 되는데 약 700개 정도의 온도, 압력, 유량, 엔탈피 및 효율 관련 데이터가 결정되어 출력된다. Fig.1의 경우는 보령 화력의 데이터이다.

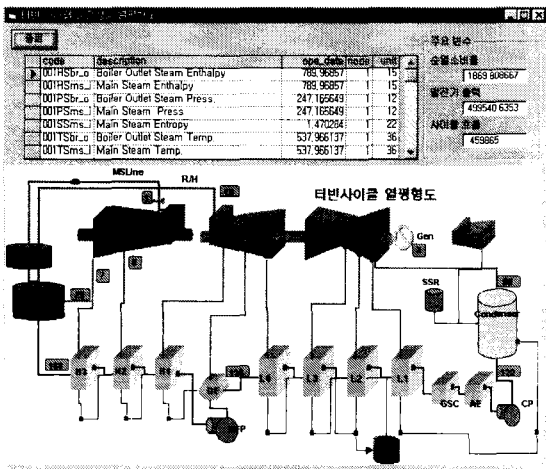


Fig. 1 Heat balance diagram of fossil power plant performance

1.2 검증 방법의 구성 배경

현재 이러한 성능 분석 계산 절차와 방법에 대해서는 이미 ASME PTC 등에 의하여 표준화가 많이 되어 있으므로 성능 분석에 있어서 현재 가

장 중요한 요소는 성능 계산에 사용되는 약 80개 정도의 온도, 압력, 발전 출력 및 유량 측정 데이터에 대하여 검증 및 유효화(verification and validation)를 하고 이를 바탕으로 정확한 성능 분석을 하는 문제이다.

성능 계산용 입력 데이터의 검증 및 유효화에 있어서는 측정 항목인 유량, 온도 및 압력 데이터를 정확히 측정하는 샘플링 자체에 대한 검증과정과 터빈 사이클의 현재 및 인수 성능 데이터(acceptance data), 벤더 제공 설계 데이터와 엔지니어링 모델을 사용하여 측정 데이터의 정확도를 역으로 추정하여 유효화하는 과정으로 구분 할 수 있다. 첫 번째 과정에서는 측정 샘플에 의한 계측기 자체의 검증에 관심이 주어지므로 통계 처리 방식에 의한 평균 값 처리, 표준 편차와 측정 데이터 분포 처리 및 필터링 기법에 기반을 두고 있으며 발전소 성능 엔지니어링 모델과 상관없이 측정기기 자체에 대한 검증을 위주로 한다. 두 번째 과정에서는 발전소 기기 및 전체 사이클에 대한 엔지니어링 모델과 인수 데이터, 설계 데이터, 현재 측정 데이터 및 발전소 운전 정보를 가지고 시스템 상태를 정확히 파악하고 이 정보를 피드백 과정으로 활용하여 측정된 입력 데이터를 검증하고 유효화하는 과정이다. 본 연구는 이러한 두 번째 과정에서의 유효화를 위한 효율적인 방법 개발에 관한 것이다.

발전소 정밀 시험 측정 데이터에 대해서는 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 정보를 사용하여, 유효화하고 검증하는 것이다. 그러나 발전소 터빈 사이클 자체가 Fig.1에서와 같이 상호 연결된 사이클 유동 네트워크이기 때문에 이 80-90 개의 측정 데이터 중 어느 하나 데이터가 잘못된 수치를 가지고 있는 것인지를 파악하는 것은 쉽지 않은 문제가 된다.

본 연구에서는 어느 하나의 측정 데이터가 잘못된 수치를 가지고 있을 때, 이 잘못된 수치를 나타내는 정보가 사이클의 다른 측정 데이터에서 발견될 수 있다고 가정하였으며, 이를 기반으로

오류 메트릭을 정의하였다. 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 추정 값을 제시하는 모델과 알고리즘을 개발하였으며, 이를 바탕으로 입력 검증 시스템을 국내 화력 발전소의 설계 및 인수 성능 측정 데이터를 사용하여 개발하였다.

2. 입력 유효화 방법

2.1 프로세스 모델의 구성

일반적으로 입력 유효화를 위해서는 사이클 및 기기에 대한 현재 운전 프로세스 데이터를 기반으로 추정 모델을 구하여야 한다. 터빈 사이클을 구성하고 있는 고압(HP), 중압(IP), 저압(LP) 터빈과 복수기, 급수 가열기, 펌프류의 열성능 설계를 위한 수학적 모델과 사이클 연결 모델, General Electric 등의 터빈 제작사 벤더에서 제공한 제작 데이터 및 계산 절차⁸⁾는 설계 및 인수 성능 시험 시에만 의미가 있을 뿐, 인수 후 운전과정이 진행된 현재 운전 상태에서는 정확하지 않은 모델이 되며, 같은 설계에 의한 사이트라도 운전 과정에 따라 달라지게 된다. 현재의 사이클 상태에 대한 추정 프로세스 모델을 구성하기 위해서는 Fig.2 와 같은 역 추정(Inverse Estimation Procedure) 모델이 필요하게 되며, 계층구조¹¹⁾에 의한 측정 시스템 진단의 요소로 사용될 수도 있으므로 이와 같은 구성이 필요하게 된다.

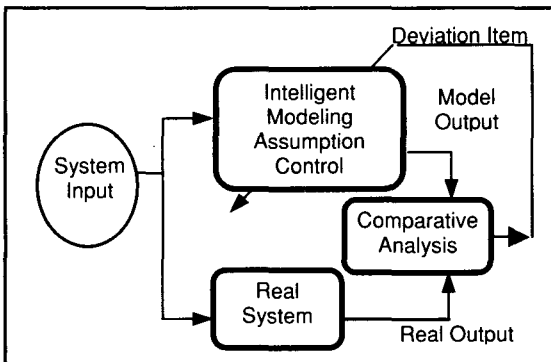


Fig. 2 Inverse model for process parameter estimation

이런 역 추정 모델을 위해서는 실제 출력과

모델 출력과의 비교해석을 통하여 모델의 가정들을 관리하고 조정하여 실제 출력과 모델 출력이 일치할 때까지 조정작업을 하게 된다. 또한 이 운전 상태 모델은 HP, IP, LP 터빈과 복수기, 급수 가열기, 펌프류의 기기별 모델과 이 단위 모델을 결합한 터빈 사이클 모델이 되어야 한다. 그러나 이러한 모델을 구하기 위해서는 현재 상태로 변환된 벤더의 설계 데이터를 구할 수 있어야 하며, 운전 중에 있는 기기를 빼낸 후 독립시켜서 위의 조정작업을 수행해야 하므로 현재 운전 중인 상태에서 실질적으로 이와 같은 방식의 역 추정 모델을 구하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 국내 16 개 화력 발전소의 초기 설계 및 인수 성능 데이터를 사용하여 입력 측정 데이터 간의 상관관계를 찾을 수 있다고 가정하였으며, 또한 매핑 모델을 사용하여 입력 데이터에 대한 추정값을 찾는 모델을 사용하여 역 추정 모델을 구성하였다. 이러한 매핑 관계를 실현하기 위한 방법으로 연관 메모리(Associative memory)나 다층 퍼셉트론 신경회로망을 사용하여 이 매핑 관계를 구성할 수 있으나¹²⁾ 터빈 사이클 프로세스 변수 간의 비선형 관계에 의한 특이성이 심하지 않으므로 실용성이 높은 선형 회귀 모델을 사용하여 역 추정 모델을 구성하였다.

2.2 입력 검증 절차 구성

전 장에서 설명한 역 추정 모델의 개념을 바탕으로 본 연구에서 구성한 입력 검증 방법을 요약하면 다음과 같다.

- 해당 센싱 데이터와 가장 관련성이 높은 성능 변수를 4 개로 설정한다.
- 발전소 성능 설계 데이터, 인수 데이터 및 정밀 측정 데이터를 기준으로 정확성이 인정되는 상관 관계 데이터를 구성한다.
- 이 상관관계 데이터를 사용하여 해당 측정 변수를 종속 변수, 상관 변수들을 독립 변수로 하는 선형 회귀 모델을 만들고 이 모델의 출력을 유효 데이터로 사용한다.

본 연구에서 구성된 알고리즘의 배경을 설명하면 다음과 같다. 예를 들어, 고압 터빈 #1 추기 측정 압력이 실제로는 29.67 kg/cm²a 인데 계측기 드리프트 등에 의하여 26 kg/cm²a 으로 평균 측정 결과가 나온 상황을 가정하면, 이 잘못된 26 kg/cm²a 이 아닌 29.67 kg/cm²a 값에 대한 정확한 정보가

파악될 수 있는 단서는 사이클 유동 네트워크의 각 상태량 중에서도 고압 터빈 #1 추기 측정 압력에 가장 연관이 큰 상태량으로 판단된다. 예를 들어 이 추기를 받아들이는 급수 가열기 증기 입구 부분이라든지, 또는 다음 추기단 유량 및 기타 상태량 등으로 파악될 수 있다. 그리고 이렇게 연관된 상태량들은 실제 29.67 kg/cm²a 의 고압 터빈 #1 추기 압력에 의하여 각 상태량이 결정된 것이고 또한 측정이 되었다고 파악될 수 있다.

따라서 발전소 설계 데이터, 인수 성능 데이터 및 기타 정상 운전에서의 데이터를 오류 없는 성능 데이터를 기준으로 삼천포 1,2 호기, 보령 1,2,4,5 호기, 서천 1,2 호기, 인천 1,2 호기, 울산 4,6 호기, 평택 1,2 호기, 호남 1,2 호기에서 측정된 16 세트의 인수 성능 측정 데이터로 구성하였다. 이러한 80-90 개의 측정 항목들에 대한 상관 매트릭스를 정의하고 각 측정 항목 별로 가장 상관도가 높은 4 개의 항목들을 연관 항목으로 정의하였다.

3. 입력 검증 알고리즘

사이클의 유동 네트워크에서의 상관 매트릭스는 각 입력 항목간의 선형적인 관계의 강도를 나타내는 다음의 식과 같은 Pearson product-moment 상관 계수를 사용하여 정의하였다.

$$r_{ij} = \frac{s_{ij}^2}{\sqrt{s_{iis} s_{jj}}} \quad \text{where} \quad s_{ij}^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j)}{N - 1} \quad (1)$$

한 예로서 고압 터빈 입구 증기 압력과 고압 터빈 #1 추기 압력의 측정 데이터에 대한 터빈 사이클 입력 데이터 항목들의 상관 계수가 Fig. 3 과 같이 얻어진다. 유동 네트워크를 구성하는 관계로 각 측정 항목에 대한 상관 관계 정도의 분포는 유사한 구조를 갖으나 각 측정 항목 별로 다른 상관 관계와 상관 변수를 가지게 된다.

3.1 상관관계 모델의 구성

중복이 적용되는 경우를 제외하고 상관 계수의 절대값으로 소팅하여 가장 큰 순서로부터 4 개의 가장 연관 있는 데이터 항목을 선정하게 된다. Fig. 4 에는 주요 압력 데이터에 대하여 식(1)에 의하여 가장 상관 관계가 높은 변수들이 해당 항목

별로 나와 있다.

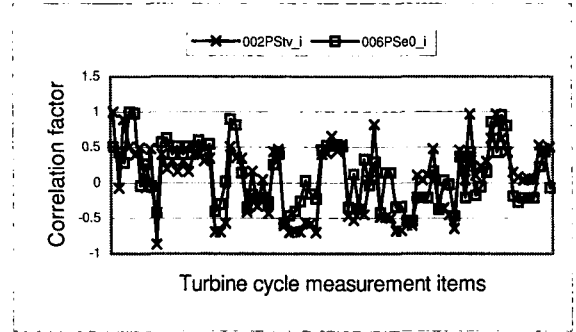


Fig. 3 Correlation factor related to HP inlet and HP #1 extraction pressure

002PStv_i	Throttle Steam Press.	
	HP1 FWH Inlet Feedwater Press.	0.96867
	HP TBN 1st Stage Shell Press.	0.893527
	CRH Line Inlet Steam Temp.	0.866518
010PShr_i	LP1 FWH Inlet Condensate Press	0.827748
	Reheated Steam Press.	
	CRH Line Inlet Steam Press.	0.996834
	Generator H2 Press.	0.850691
055PSIt_i	HP1 FWH Inlet Ext. Steam Press	0.816941
	HP2 FWH Inlet Feedwater Temp.	0.790801
	LP TBN Inlet Steam Press.	
	IP #2 Ext. Steam Press. at TBN	0.962344
139PSmc	IP #1 Ext. Steam Temp. at TBN	0.897365
	LP #4 Ext. Steam Press. at TBN	0.893126
	BFP-T Inlet Steam Press.	0.889316
	Condenser Steam Press.	
002TStv_i	SJAE Inlet Condensate Temp.	0.994183
	GSC Inlet Condensate Temp.	0.966726
	LP1 FWH Inlet Condensate Temp.	0.887798
	LP #2 Ext. Steam Press. at TBN	0.656159
002TStv_i	Throttle Steam Temp.	
	LP1 FWH Drain Temp.	0.513863
	HP #2 Ext. Steam Temp. at TBN	0.489101
	HP3 FWH Inlet Ext. Steam Temp.	0.463963
	BFP-T Rotational Speed	0.446501

Fig. 4 Correlation factor related to important measurement variable

주증기 압력 측정 데이터에 대해서는 고압급수 가열기 #1 입구 압력, 고압 터빈 1 단 셸 압력, 재열라인 입구 온도, 저압 급수가열기 #1 응축수 압력등으로 결정되었으며, 성능에 민감한 영향을 갖고 있는 복수기 압력에 대해서는 SJAE, GSC 응축수 온도, 저압 급수가열기 #1 응축수 온도, 저압 터빈 #2 추기압력의 순으로 결정되었다.

그러나 Fig.4 에서 주증기 온도의 결과는 최대 상관된 변수의 상관 값이 0.5138 이라는 매우 작은 값으로 나타나진다. 따라서 위에서 제시한 검증 방법은 이러한 측정 변수에는 적용할 수가 없다고 판단된다. 83 개 항목중 8 개가 0.85 이하의 상관 값을 가지고 있었으며, 주로 온도 측정 항목에서 이러한 항목이 여러 개가 발견되었다. 이러한 경우의 주요 항목과 최대 상관값은 다음과 같으며 이러한 변수에 대한 검증 방법은 차후 개발되어야 한다고 본다.

SJAE Inlet Steam Flow : 0.796
 Reheated Steam Temp. : 0.581
 LP1 FWH Drain Temp. : 0.6480

유량에 대한 결과를 보면 온도나 압력에 비해 상대적으로 적은 상관도를 나타내는 변수가 있다. 주로 드레인 유량의 경우가 해당되며, 본 논문의 방법에 의한 유효화의 신뢰도가 상대적으로 적다고 볼 수 있다. 이는 드레인 과정의 특성상에 기인한다고 파악된다.

이러한 상관 항목을 가지고 측정항목에 대한 선형 회귀 모델(Linear Regression Model)을 다음과 같이 구성하게 된다.

$$y(x_1, x_2, x_3, x_4) = \Phi(x_1, x_2, x_3, x_4)^T \theta \quad (2)$$

여기서

$$\Phi(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (3)$$

$$= (1x_1 x_2 x_3 x_4 x_1x_2 x_1x_3 x_1x_4 x_2x_3 x_2x_4 x_3x_4)$$

$$\theta = (a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7 a_8 a_9 a_{10}) \quad (4)$$

이다.

y 는 유효화하고자 하는 해당 측정 항목이며, (x₁,x₂,x₃,x₄)는 위의 상관 매트릭스 데이터에 의하여 얻어진 y 에 가장 상관도가 높은 측정 항목으로 추정 모델의 독립변수로 사용한다. 모델 정확도가 이러한 선형 모델을 사용하여도 유용하다고 판단되므로, Φ에 대하여 단일 독립 변수의 2 차수 이상의 항목은 생략하였다. 식 (4)의 계수는 각 상관 변수의 일차곱(product term)에 대한 가중치를 의미하게 된다. 본 시스템에서는 3 개 내지 4 개의 상관 관련 변수를 선택 할 수 있다. 오류 매트릭

은 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon = y(x_1, x_2, x_3, x_4) - \Phi(x_1, x_2, x_3, x_4)^T \theta \quad (5)$$

Table 1 Estimation result of main steam pressure

PS tv_I 측정값	PS tv_I 추정값	추정 오류(%)	PW h1_i	PS gs_o	TS cr_i	PW ll_i
170.0	168.1	1.10	213.9	119.0	333.1	15.0
247.1	247.1	0.02	308.9	162.3	281.7	28.1
166.0	166.3	0.19	188.7	116.0	317.1	9.7
170.0	167.3	1.58	195.0	116.9	344.1	10.0
166.0	165.7	0.18	192.3	126.3	327.7	13.5
170.0	172.1	1.21	195.9	117.2	331.5	8.0
171.0	170.3	0.41	213.8	123.5	312.3	8.4
127.6	128.4	0.60	159.5	98.7	351.8	8.4
170.0	168.1	1.10	213.9	119.0	333.1	15.0
169.8	172.1	1.36	212.2	119.1	329.2	14.1
169.8	172.2	1.42	212.2	118.5	328.1	14.1
247.1	247.1	0.02	308.9	162.3	281.7	28.1
179.0	179.5	0.29	235.6	135.0	342.5	20.4
128.0	127.9	0.10	148.0	74.9	346.8	9.5
170.0	169.2	0.47	180.0	108.8	307.1	8.0
181.0	181.1	0.06	221.8	154.0	316.4	8.0

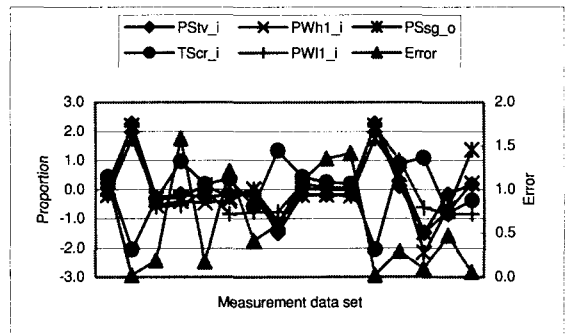


Fig. 5 Distribution of estimation result of main steam pressure

추정 결과의 한 예로서 주증기 압력(PStv_I)의 상관 변수는 고압 급수 가열기 #1 급수 입구 압력(PWh1_I), governing stage 압력(PSgs_o), 재열 증기 온도(TScr_I), 저압급수 가열기 #1 급수 입구 압력(PWll_i)이 결정되었으며, 이를 사용하여 추정 주증기 압력을 구하여 원래 값과 비교한 결과가 Table 1.에 나와있다. 추정 오류가 최대 1.6%가 나

오는 것으로 볼 때, 식 (2)를 사용한 선형 모델의 근사 정확도와 모델 신뢰도는 유용 범위 내에 들 수 있다고 판단된다. Fig.5에는 각 항목에 대하여 평균에 대한 편차를 표준 편차로 스케일링하여 도시하였으며 오른쪽 세로축은 추정 오류이다.

Table 2 Estimation result of deaerator inlet feedwater flow

WW de_I 측정값	WW de_I 추정값	추정 오류 (%)	KW gn	PS Lt_i	PH2 gn	PS bt_i
1230563	1230751	0.02	515164	10.9	4.2	10.1
1152357	1152777	0.04	499541	8.6	4.2	8.3
724186	722734	0.20	298943	4.1	3.2	0.0
610823	609686	0.19	249345	6.0	2.1	5.7
797573	798209	0.08	324832	4.5	4.2	0.0
808246	809133	0.11	349859	8.0	2.1	7.8
463517	470670	1.54	199758	6.2	2.1	0.0
359566	359281	0.08	140990	4.3	2.1	0.0
1230563	1230751	0.02	515164	10.9	4.2	10.1
1400586	1404685	0.29	562742	11.2	4.2	10.3
1393527	1388572	0.36	563244	11.1	4.2	10.5
1152352	1152621	0.02	499494	8.6	4.2	8.3
1014928	1014764	0.02	402070	7.3	4.2	0.0
321022	321105	0.03	125057	4.3	2.1	0.0
468258	462311	1.27	199996	6.8	2.1	0.0
475547	475565	0.00	199936	2.7	3.2	0.0

(PH2gn), BFP-T 입구 압력(PSbt_i)으로 선정되었으며, 추정 유량을 구하여 원래 값과 비교한 결과가 Table 2.에 나와있다. Fig. 6은 Fig. 5와 같이 각 항목에 대하여 스케일링하여 도시한 것이다. 전반적으로 상관 정도가 0.85 이상인 측정 항목에 대해서는 추정의 실효성이 확인될 수 있었으며, Fig. 5,6에서 보이는 바와 같이 상관 변수들과의 변화 방향이 불일치 되는 경우에 추정오류가 커지는 것을 볼 수 있었다.

4. 결론

현재 이러한 성능 분석 계산 절차와 방법에 대해서는 이미 ASME PTC 등에 의하여 표준화가 되어 있으므로 성능 분석에 있어서 현재 가장 중요한 요소는 성능 계산에 사용되는 약 80 개 정도의 온도, 압력, 발전 출력 및 유량 측정 데이터에 대하여 검증 및 유효화(verification and validation)를 하고 이를 바탕으로 정확한 성능 분석을 하는 문제이다.

본 연구에서는 어느 하나의 측정 데이터가 잘못된 수치를 가지고 있을 때, 이 잘못된 수치를 나타내는 정보가 사이클의 다른 측정 데이터에서 발견될 수 있다고 가정하였으며, 이를 기반으로 오류 메트릭을 정의하였다. 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 개발하였으며, 이를 바탕으로 입력 검증 시스템을 국내 화력 발전소의 열성능 측정 데이터를 사용하여 개발하였다.

후 기

본 연구에 필요한 성능 관련 사양 및 기타 데이터를 제공한 한국 전력공사 관계자에게 감사를 드린다.

참고문헌

1. American Society of Mechanical Engineers Performance Test Code 6 "Steam Turbines," 1976.
2. American Society of Mechanical Engineers

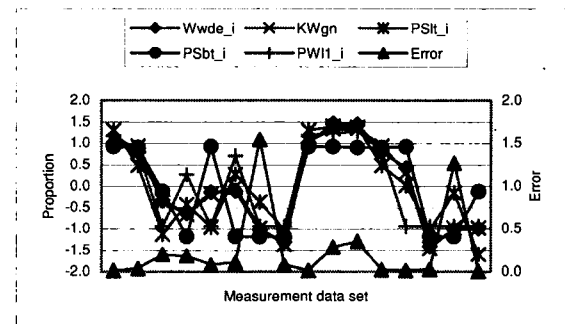


Fig. 6 distribution of estimation result of deaerator inlet feedwater flow

대표적인 유량 측정 항목인 탈기기 입구 급수 유량(Wwde_i)의 상관 변수는 발전기 출력(KWgn), 저압 터빈 입구 압력(PSlt_i), 발전기 수소 압력

- 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. Glorian, D., "Performance of Thermal Generating Plants Worldwide: Current Situation and Outlook," 8th Int. Conference & Exhibition for the Power Generating Industries, USA, pp. 337-350, 1995.
 6. Munchausen, J.H., "EPRI Performance Enhancement Program," Proceedings of the American Power Conference, USA, pp. 519-521, 1995.
 7. Bae, Y. I., Kim, H. Y., Mun, S. C., Kim, S. K., "Neural Network Model of Turbine Cycle Process," KOPEC Report Vol. 16 No. 1, pp.6-14, 1994.
 8. Spencer, R.C., Cotton, K.C., Cannon, C.N., "A Method for Predicting the Performance of Steam Turbine-Generators, 16,500KW and Larger," General Electric Co. Report, 1974.
 9. British Electricity International, "Modern Power Station Practice: Volume G Station Operation and Maintenance," 1991.
 10. Kim, S.K., Han, S.T., "A STUDY ON THE COMPUTERIZATION OF PERFORMANCE EVALUATION FOR THERMAL POWER PLANT," 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference, 1996.
 11. 배용환, 이석희, "계층구조 접근에 의한 복합 시스템 고장진단 기법," 한국정밀공학회지, 제 14 권 제 11 호, pp. 135-146, 1997.