

열펌프의 고장감지 및 진단시스템 구축을 위한 실시간 정상상태 진단기법 개발

김민성[†], 윤석호^{*}, 김민수^{**}

한국에너지기술연구원 신재생에너지연구본부, 한국기계연구원 에너지기계연구본부, 서울대학교 기계항공공학부

Real-time steady state identification technology of a heat pump system to develop fault detection and diagnosis system

Minsung Kim[†], Seok Ho Yoon, Min Soo Kim

*Geothermal Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea
Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea
School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea*

ABSTRACT: Identification of steady-state is the first step in developing a fault detection and diagnosis (FDD) system. In a complete FDD system, the steady-state detector will be included as a module in a self-learning algorithm which enables the working system's reference model to "tune" itself to its particular installation. In this study, a steady-state detector of a residential air conditioner based on moving windows was designed. Seven representing measurements were selected as key features for steady-state detection. The optimized moving window size and the feature thresholds was suggested through startup transient test and no-fault steady-state test. Performance of the steady-state detector was verified during indoor load change test. From the research, the general methodology to design a moving window steady-state detector was provided for vapor compression applications.

Key words: heap pump(열펌프), fault detection and diagnosis(고장감지 및 진단), steady-state detector(정상상태 진단기), moving window(이동창)

———— 기 호 설 명 ————

- T : 온도 [°C]
- v : 분산
- x : 측정값
- \bar{x} : 이동창 평균(moving window average)
- w : 절대습도, w_{air}/w_{air} [-]
- Δ : 변수편차
- ϕ : 특성값(features)

σ : 표준편차

하첨자

- A : 공기측
- C : 응축기
- D : 압축기 토출부
- E : 증발기
- i : 특성변수(feature) 인덱스
- ID : 실내측
- k : 이동창 내의 표본데이터 수
- MW : 이동창 (moving window)
- n : 시간 인덱스

[†] Corresponding author
Tel : +82-42-860-3062 fax : +82-42-860-3133
E-mail address: minsungk@kier.re.kr

OD : 실외측
RH : 상대습도
sc : 과냉도
sh : 과열도

1. 서론

정상상태를 파악하기 위한 연구는 초기에 공정 제어 분야에서 적용되었다^[1-3]. 이를 위해 모델분석, 최적화, 고장진단 및 제어 등의 다양한 분야에 적용되었는데, 항공제어나 원자력 플랜트 제어와 달리 동적운전 상태에서의 신뢰성은 큰 문제가 되지 않기 때문에 정상상태에서 각각의 분석을 수행하기 위한 방편으로 진행된 것이다. 열펌프 분야에서는 시스템의 복잡성으로 인해 동특성 적용이 어려우며, 경제성도 확보하여야 하기 때문에 정상상태에서 고장진단이 수행되는 것이 일반적이다. 정상상태에 대한 진단은 시스템 전체를 관찰하거나 단순히 몇몇 필요한 시스템 파라미터를 모니터링 함으로써 가능하다. 실험실에서 진행되는 성능실험의 경우 시스템의 성능 측정만이 목적일 경우가 많으므로 특별히 정상상태 진단에 대한 기법을 도입하지 않고 오랜 시간이 지난 후에 데이터를 획득함으로써 정상상태를 확인할 수 있다. 그러나 그 기간이 충분하지 않고 단지 일부 값을 관찰할 경우 실질적인 정상상태인지를 보장할 수가 없게 된다. 정상상태 기법은 고장진단에 널리 사용되기 때문에 우수한 고장진단 분석을 위해서는 정상상태 진단기를 잘 개발하는 것이 중요하다.

그동안 공조분야의 연구에서 고장감지 및 진단(fault detection and diagnosis, FDD)을 목적으로 몇 가지의 정상상태에 대한 진단기법이 제안되었다^[4-7]. 기존의 연구들은 고장진단 시스템의 개발만이 주목적이었으므로 정상상태 진단기(steady-state detector)에 대한 구체적인 연구는 수행되지 않았다. 본 연구에서 대상으로 하는 가정용 에어컨의 경우 정상상태에 도달할 경우에 FDD 분석이 이루어지는데, 이를 자동화하고자 할 경우 정상상태 진단기가 시스템 상태를 정상상태로 판단할 경우에는 항상 분석이 이루어질 수 있도록 최적화하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 이동창(moving window)를 이용한 정상상태 진단기를 평가하고 가정용 에어컨

의 FDD 시스템 구축에 필요한 정상상태 진단기를 최적화 하는데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 체계적으로 개선된 알고리즘을 제시하였다.

2. 정상상태 진단 이론

정상상태 진단기는 노이즈 필터의 개념에서 출발하였다. 시스템이 정상상태가 아닐 경우, 측정값들은 외란의 영향이나 변화도중에 있으므로 불안정하게 된다. 이러한 불안정한 정도를 정량화하기 위한 특성값으로 분산이나 표준편차가 보편적으로 적용되는데, 이러한 대표값들은 임의로 측정된 신호데이터의 분포를 통계적으로 제시해 준다는 점에서 유용하다.

Glass 등(1995)^[4]는 기하가중분산(geometrically weighted variance)을 이용하여 공조기(air-handling unit)에 대한 정상상태를 진단하였다. 기본 개념으로 오래된 데이터들은 자동적으로 소멸되도록 1보다 작은 소멸계수(forgetting factor)를 시간에 따라 반복적으로 곱하는 방법을 사용하였는데, 이러한 소멸계수는 시스템의 시간상수를 근거로하여 정하도록 하였다. 또한 디지털화에 용이하도록 회귀(recursive)형태의 공식을 제공하였다. 증기압축 시스템에 대한 일부 FDD 연구에서 이와 같은 정상상태 진단기법을 적용하기도 하였다^[5-6].

가장 일반적이고 단순한 정상상태 진단기는 Fig. 1에서와 같이 적절하게 정의된 이동창 내부의 데이터에 근거하여 분석하는 방법이다. 이동창은 윈도우 내부의 데이터 중 가장 오래된 값을 다음 시간에 새 값으로 대체하게 되는데, 이는 로우패스필터(low-pass filter)의 개념과 동일하다. Li(2004)^[7]는 이동창 기울기(moving window slope)와 이동창 분산(moving window variance)을 루프탑 에어컨(roof-top air conditioner)의 정상상태 진단을 위한 변수로 사용하였다. 본 연구에서는 이동창 표준편차(moving window standard deviation)를 이용하여 정상상태를 진단하도록 하였다. 이동창의 크기와 대상으로 하는 특성값(feature)들의 경계값(threshold)을 최적화할 경우 이동창 표준편차만으로도 고장진단이 가능하다. 이동창에 기반을 둔 방법은 구조가 간단하여 연산부하가 작고 접근이론 자체가 근본적이어서 실제 시스템에 적용하기 매우 용이하다.

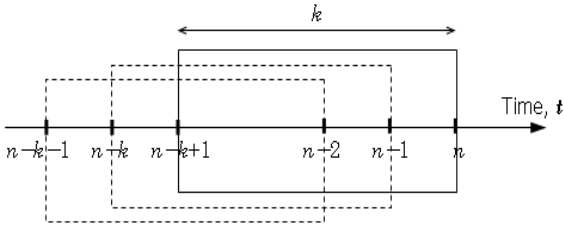


Fig. 1 Moving windows of n data points at near k th time

본 연구의 정상상태 진단기는 회기적으로 표준편차를 계산할 수 있는 알고리즘을 적용하였다. 현재 시간을 상태 k 로 두면, 가장 최근의 n 개의 샘플데이터에 대한 평균 \bar{x}_k 는 식 (1)로 주어진다.

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=k-n+1}^k x_i \quad (1)$$

현재 상태 k 와 직전 상태 $k-1$ 에서의 n 개의 샘플에 대한 평균값의 차이는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{x}_k - \bar{x}_{k-1} &= \frac{1}{n} \left[\sum_{i=k-n+1}^k x_i - \sum_{i=k-n}^k x_i \right] \\ &= \frac{1}{n} (x_k - x_{k-n}) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)를 재배열하면 다음의 회귀식과 같다.

$$\bar{x}_k = \bar{x}_{k-1} + \frac{1}{n} (x_k - x_{k-n}) \quad (3)$$

이러한 방법으로 계산된 식 (3)의 좌변항을 이동창 평균이라고 하며, 이는 이동창 내의 최신값과 소멸되는 최초값의 평균편차만큼이 직전 이동창평균과 합으로 나타난다. 이동창 분산과 이동창 표준편차는 각각 식 (4), (5)처럼 정의된다.

$$\begin{aligned} v_k &= \frac{1}{n} \sum_{i=k-n+1}^k (x_i - \bar{x}_k)^2 \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=k-n+1}^k x_i^2 - \bar{x}_k^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &= v_{k-1} + \frac{1}{n} (x_k^2 - x_{k-n}^2) - (\bar{x}_k^2 - \bar{x}_{k-1}^2) \\ \sigma_k &= \sqrt{v_k} \end{aligned} \quad (5)$$

정상상태 진단기는 미리 정해진 한계값 안쪽으로 시스템 변수들이 들어오게 되면 정상운전을 판단하게 된다.

3. 정상상태 진단기 개발

3.1 실험장치 및 조건

8.8 kW 공칭용량의 분리형 가정용 열펌프를 설치하고 실험을 수행하였다. 실험장치는 Fig. 2와 같이 실외기 코일, 열팽창밸브, 실내기 코일로 구성되어 있으며, 실내외기 모두 핀-튜브 열교환

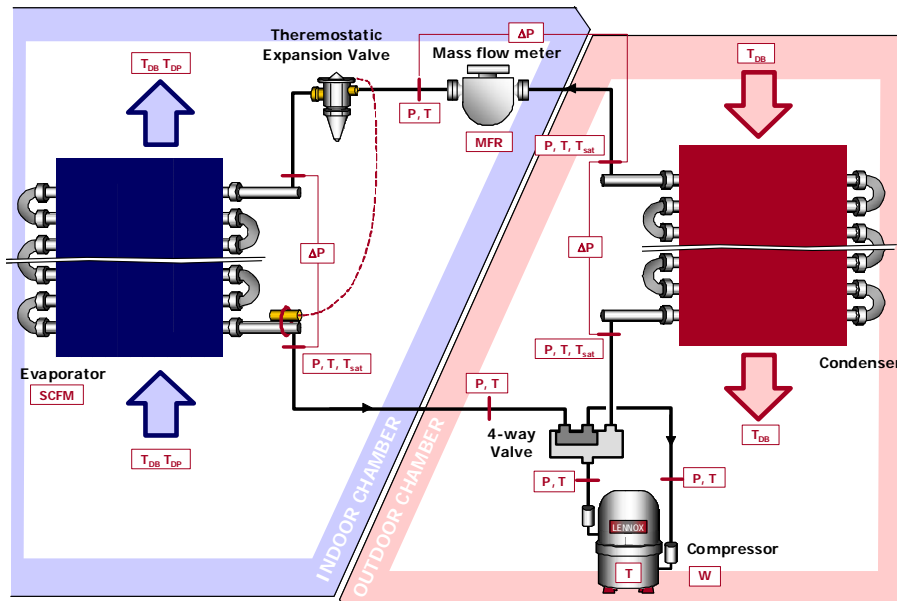


Fig. 2 Schematic diagram of an experimental setup for a residential heat pump in cooling mode

기 형태이다. 실내기와 실외기 모두 항온항습실에서 설치되었다^[8]. 정상상태 및 기동특성 실험이 수행되었으며, 정상상태 진단기의 성능을 파악하기 위해 실내부하 변동실험도 동시에 수행되었다. Table 1는 실내외 운전조건을 나타낸 것이다. 정상상태 데이터는 시스템이 정상상태에 도달한 지 1시간 뒤에 수집되었으며, 기동특성은 재연성을 확인하기 위해 3회 반복한 결과를 비교하였다. 아울러 고장운전상태에서 정상상태 진단을 파악하기 위한 실험도 수행하였으며, 실내 부하 변동의 급격한 변동에 따른 특성 관찰을 위하여 실내 챔버의 고정히터 작동수를 조정하였다.

Table 1 Test types and conditions

Test type		$T_{OD}(^{\circ}C)$	$T_{ID}(^{\circ}C)$	$\phi_D(-)$
NF	Steady state	27.8	26.7	0.003
	Startup	27.8	26.7	
	ID load change	35.0	15~35	0.018
UC	35.0	15~35		

3.2 정상상태 진단용 측정변수 선정

운전조건에 따라 시스템 변화를 대표할 수 있는 변수를 정상상태 진단을 위한 특성값으로 선정하였다. 냉매측 변수로 증발기 포화온도(T_E), 과열도(DT_{sh}), 응축기 포화온도(T_C), 압축기 토출온도(T_D), 과냉도(DT_{sc})이 있으며 공기측 변수로 증발기 입출구 온도하락치(DT_{EA}), 응축기 입출구 온도상승치(DT_{CA})의 7개 변수를 선택하였다.

특성변수의 선정을 위해서는 경제성을 우선적으로 고려하였다. 질량유량과 같은 측정센서는 가급적 피하였다. 증발기와 응축기의 포화온도는 설치된 압력센서의 측정값을 REFPROP 7을 이용하여 온도값으로 변환하였다. 이 경우 온도센서를 직접이용하는 경우보다 포화온도의 불확실도(uncertainty)는 상당히 줄일 수 있으나 비용 부담이 큰 압력센서를 사용하게 되는 문제점이 있다. 그러나 압력센서의 가격도 정확도에 따라 최근 상당히 하락하고 있으며, 비록 온도센서를 쓸 경우도 냉매가 2상영역으로 추정되는 열교환기의 중간부분에 부착함으로써 실측도 가능하다. 이 경우 불확실도는 증가하나 가격이 우선적인 측면이라면 충분히 고려할 수 있으며, 본 연구에 제시되는 알고리즘을 재적용하면 이에 대한 최적화도 가능하다. 온도 실측에는 모두 T-형 열전대를 이용하였다.

3.3 경계값(threshold)의 선정

각 변수에 대한 경계값은 정상상태의 성능을 제한하는 중요한 변수이다. 경계값이 작을수록 정상상태 진단기의 정밀도는 상승하지만, 많은 유용한 데이터를 분실할 수 있다. 실제로 온도에 따라 변수의 불확실도는 영향을 받기 때문에 경계값을 작게만 설정하는 것은 데이터를 수집하는 범위를 제한하는 오류를 범할 수 있다. 또한 지나치게 큰 값을 제시한다면 정상상태와 크게 떨어진 상태가 포함될 경우가 있는데, 이 경우는 FDD 시스템 자체의 신뢰성을 떨어뜨릴 우려가 있다. 따라서 적절한 크기의 경계값을 선정하는 것이 비정상 운전상태를 걸러내고 아울러 효율적인 FDD 시스템을 구축하는데 효과적이다.

경계값을 정하기 위하여, 고도로 정상상태로 예상되는 값들을 1시간 동안 모니터링하였다. 이 값들은 실내외 운전조건이 고정된 상태에서 기동 후 3시간 뒤에 기록되었다. 수집된 자료로부터 분석된 표준편차를 기준으로 경계값을 설정하였으며, 과열도의 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. Table 2는 각 변수에 대한 정상상태에서의 표준편차를 요약한 것이다.

이러한 표준편차를 이용하여 정상상태 진단기의 경계값을 제시하게 되는데, 각 분포가 정규분포임을 가정할 경우 정상상태의 표준편차 값의 99% 정도의 영역 이내에 표준편차가 들어올 경우 정상상태로 가정하도록 하였다.

Table 2 Feature variations at steady state

Features	ΔT_{sh}	ΔT_{sc}	T_E	T_D	T_C	ΔT_{CA}	ΔT_{EA}
Range($^{\circ}C$)	0.49	0.22	0.14	0.25	0.17	0.27	0.25
$\sigma(^{\circ}C)$	0.124	0.052	0.024	0.058	0.035	0.063	0.058

3.4 정상운전시의 기준모델 선정

정상상태 진단기를 이용하여 정상상태가 판정되고 난 후, 모델을 학습하도록 하였다. 실내외 온도를 임의대로 변경시키면서 3일동안 데이터를 학습시켰는데, 이 때의 학습조건에 맞는 값으로 선정된 운전조건들을 바탕으로 다음 식의 다항함수 형태로 모델을 제시하였다. 이 때, 실내온도, 실내이슬점온도, 실외온도를 독립변수의 형태로 7개의 특성값을 함수화 시키도록 하였다. 식 (6a), (6b), (6c)는 각각 1차, 2차, 3차 다항함수

형태의 기준값(multivariate polynomial reference, MPR)에 대한 예측값을 산정하기 위한 기준 모델(no-fault model)이다.

$$\phi_i^{(1)} = a_0 + a_1 T_{OD} + a_2 T_{ID} + a_3 T_{DP} \quad (6a)$$

$$\phi_i^{(2)} = \phi_i^{(1)} + a_4 T_{OD}^2 + a_5 T_{ID}^2 + a_6 T_{DP}^2 + a_7 T_{OD} T_{ID} + a_8 T_{ID} T_{DP} + a_9 T_{DP} T_{OD} \quad (6b)$$

$$\phi_i^{(3)} = \phi_i^{(2)} + a_{10} T_{OD}^3 + a_{11} T_{ID}^3 + a_{12} T_{DP}^3 + a_{13} T_{OD} T_{ID} T_{DP} + a_{14} T_{OD}^2 T_{ID} + a_{15} T_{OD} T_{ID} T_{DP} + a_{16} T_{ID}^2 T_{OD} + a_{17} T_{ID} T_{DP} + a_{18} T_{DP}^2 T_{OD} + a_{19} T_{DP}^2 T_{ID} \quad (6c)$$

상기의 모델을 기준으로 잔차(residual)를 제시할 수 있는데, 측정값에서 기준값의 편차로 정의된다. Fig. 3에 실제 측정된 변수들 중 독립변수의 변화에 따른 정상상태 진단 상황을 나타내었다. 운전조건의 변화가 급격히 일어날 경우 정상상태 진단기는 0의 값을 반환하며, 이후 일정 시간이 지나서 변화율이 일정범위 이내에 들어오면 정상상태로 진단하고 1의 값을 반환한다. 각각의 모델에 대한 성능치가 함께 나타나 있다.

4. 결론

본 연구에서는 FDD 시스템 구축을 위한 기본 작업으로 가정용 열펌프가 냉방조건으로 작동할 경우에 대해 정상상태 진단기를 개발하였다. 이동창을 기반으로 7개의 측정값들에 대한 표준편차를 분석함으로써 정상상태 판정을 내리도록 하였다. 정상상태 진단기를 이용하면 FDD 시스템에서 가장 어려울 것으로 예상되는 정상운전시의 기준모델(no fault reference model)의 개발에 매우 용이할 것으로 판단된다. 아울러 본 논문에서 제시된 일련의 프로세스는 FDD 과정의 예비작업으로 분류될 수 있는데, 이러한 작업이 충실히 뒷받침 되어야 신뢰성 있는 FDD 시스템이 구축될 것이다.

후 기

본 연구는 미국 국립표준기술연구소에서 수행되었으며, 연구에 많은 도움을 준 Piotr A. Domanski 박사와 W. Vance Payne 박사에게 감사드린다.

참고문헌

1. Mahuli, S. K., Rhinehart, R., Riggs, J. B., 1992, Experimental demonstration of non-linear model-based in-line control of pH, J. Process Control, Vol. 2, No. 3, pp. 145-153.
2. Cao, S., Rhinehart, R., 1995. An efficient method for on-line identification of steady state, J. Process Control, Vol. 5, No. 6, pp. 363-374.
3. Jiang, T., Chen, B., He, X., and Stuart, P., 2003, Application of steady-state detection method based on wavelet transform, Computers and Chemical Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 569-578.
4. Glass, A. S., Gruber, P., Roos, M., and Tödtli, J., 1995, Qualitative model-based fault detection in air-handling units, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 15, No. 4, pp. 11-22.
5. Rossi, T. M., 1995, Detection, diagnosis, and evaluation of faults in vapor compression cycle equipment, Ph. D. Thesis, Purdue Univ., West Lafayette, IN, USA.
6. Breuker, M. S., Braun, J. E., 1998, Evaluating the performance of a fault detection and diagnostic system for vapor compression equipment, Int J HVAC&R Research, Vol. 4, No. 4, pp. 401-425.
7. Li, H., 2004, A decoupling-based unified fault detection and diagnosis approach for packaged air conditioners. Ph. D. Thesis, Purdue Univ., West Lafayette, IN, USA.
8. Kim, M., Payne, W. V., Domanski, P. A., and Hermes, C. J. L., 2006, Performance of a residential heat pump operating in the cooling mode with single faults imposed, NISTIR 7350, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA
9. Braun, J. E., 1999, Automated fault detections and diagnostics for vapor compression cooling equipment, Int J HVAC&R Res., Vol. 5, No. 2, pp. 85-86.

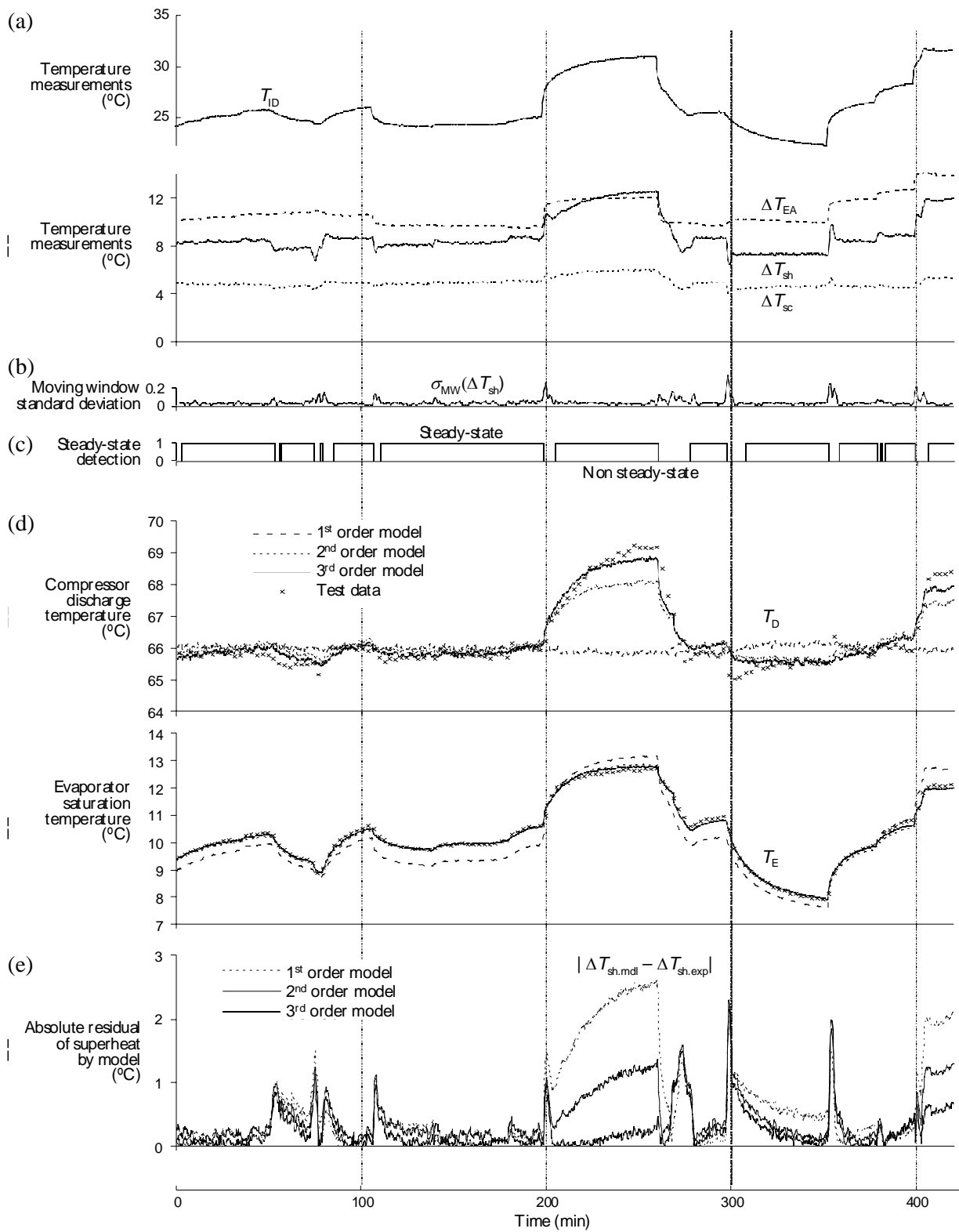


Fig. 6 Performance of MPR models to predict features during a sample operation period (a) T_{ID} , ΔT_{EA} , ΔT_{sh} , and ΔT_{sc} (b) Moving window standard deviation of ΔT_{sh} (c) Steady-state identification; (d) MPR model of 1st, 2nd, and 3rd order tracking real-time measurements of T_D and T_C (e) Absolute residuals of ΔT_{sh} by MPR models.