

효율향상 프로그램의 성과계량검증을 위한 계측자로 보정 기법

조기선 · 박종진 · 이창호
한국전기연구원

A Measuring Data Calibration Technique for Measurement and Verification of Energy-Efficiency Programs

Ki-Seon Cho · Jong-Jin Park · Chang-Ho Rhee
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper describes algorithms for enhancing the reliability of measurements to verify the performance of energy efficiency programs with an simple method. Fundamentally, measurements contain erroneous data because of the various causes, and so proper procedures or schemes are prepared before the performance is evaluated. In this paper, we propose an approach for detecting and correcting an adulterate data, such as missing and bad data. Erroneous data are detected or corrected by pre-described measuring conditions, ensemble average, and standard deviation of measurements at measuring time. The proposed algorithms are tested by field test measurements. From case studies we drew the promising results.

을 통해서 운용되고 있기 때문에 기획·평가·관리 등의 모든 단계에서 보다 객관적이고 체계적인 절차가 요구되며 이를 위한 기반 요소기술을 체계적으로 확보할 필요가 있다.

사업구분	주요 사업명
전략분야 관리사업	중남서남향설비 직접부여관리 원리제ON에어컨
전략효율 향상사업	고효율조명기기 고효율전동기 고효율엔버터
부하관리 지원사업	휴가보수지원 자율일전지원 부하일전지원 변상발전
수요관리 홍보사업	인문제재홍보 평도홍보
용지	용지

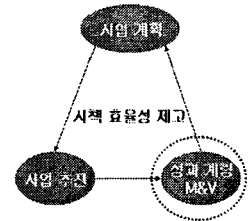


그림 1 국내 DSM 프로그램
Fig. 1 Demand Side Management Program in Korea

1. 서 론

2000년대 초반까지 정부는 에너지공급사로 하여금 에너지이용합리화법에 의거하여 수요관리(Demand Side Management; DSM)투자계획을 수립, 시행, 평가하도록 하였으나, 2000년대 후반에 전력산업구조개편과 함께 과거의 수행체계에 있어서 커다란 변화를 맞이하였다. 전력산업구조개편에 따라 수요관리사업의 시행주체가 과거의 전력회사에서 정부로 이관되었고, 사업추진 재원도 과거와는 달리 전력산업기반기금(공익기금)을 재원으로 시행하게 되었으며, 2005년부터는 수요관리사업에 있어서도 경쟁체제가 도입되어 한국전력공사와 에너지관리공단의 경쟁구도로 전환되었다.

구조개편후의 수요관리 추진체계를 보면, 정부는 수요 관리 관련 정책을 수립하고 사업수행을 위한 지침 등을 수립하며, 사업집행 기관으로부터의 사업수행결과를 보고받아 지속적으로 정책에 반영하는 역할을 담당하고, 정부가 지정한 전담기관은 사업의 기획, 평가, 관리업무를 전담하고, 실제로 사업의 시행하는 주관기관으로는 한국전력공사와 에너지관리공단이 지정되어 운영되는 사업체제로 구성되어 있다.

추진체계와 재원면에서 과거와는 상이한 환경에 놓이게 된 수요관리사업은 과거 그 어느때 보다 기획, 평가, 관리업무의 중요성이 부각되고 있으며, 이를 효율적으로 수행할 수 있는 공인된 시스템의 확보는 매우 시급한 과제라 할 수 있다. 수요관리사업은 자국의 전력사용행태 및 전력수급의 환경이 나라마다 다를뿐더러 재원확보에 있어서도 상이한 특성을 보이고 있어 외국의 시스템을 여과없이 도입하는 데에도 문제가 있을뿐더러 보급환경 및 추구하는 목표에 따라 다양한 수정·보완 작업이 요구된다. 따라서 국내의 수요관리 보급 환경 및 정책목표 실현에 부합되는 한국형 수요관리 기획, 평가, 관리지원 시스템이 요구된다.

국내 수요관리사업은 국민 전체가 부담하는 공익기금

수요관리사업의 시행에 따른 실질적인 편익을 객관적으로 평가하는 행위를 수요관리사업 성과의 계량 및 검증(M&V; Measurement & Verification)이란 용어로 사용하고 있다. 이 M&V는 소요되는 비용과 요구되는 정밀도 및 자료의 가용성 등을 종합적으로 평가하여 M&V 계획을 수립하며, 크게 네 가지 형태의 M&V방법이 알려져 있다. M&V 방법이 다양하게 상존하고는 있으나 기본적으로 기간의 차이(순간, 단기, 장기)가 있을 뿐 측정 자료를 필수적으로 사용하고 있다. 본 논문에서는 수요관리 성과에 대한 M&V시스템을 구성함에 있어서 가장 필수적인 기능인 측정 자료의 신뢰성에 관한 것이며, 측정 자료에 포함된 오류를 어떻게 식별하고 오류가 발생한 자료를 어떻게 보정하여 신뢰성을 확보할 것인가에 대한 기본적인 접근방법을 제시한다.

M&V시스템에서 측정 자료의 보정에 관련된 신뢰성 확보기법은 그 기능의 부재로 계산의 정밀도 저하뿐만 아니라 M&V시스템의 안전성을 해칠 수 있으며, 최악의 상황에서 시스템이 shut down 될 수 있는 개연성을 안고 있기 때문에 반드시 M&V시스템에서 확보되어야 하는 필수 기능이다.

본 논문에서는 누락자료를 측정조건에 의해서 식별하고 3차구간보간법과 앙상블 평균치(ensemble average)의 산술평균치를 통해서 보정하고 오류자료는 연산결과치의 오차범위를 통해서 식별하며, 이상값은 측정조건과 앙상블 평균치를 통해서 식별하고 오류자료의 보정은 누락자료의 보정과 동일한 과정을 통해서 수행하였다.

본 논문의 2장에서는 M&V방법에 관한 개괄적인 설명을 기술하였고, 측정 자료의 신뢰성 확보기법은 3장에, M&V 시스템 원형은 4장에 기술하였다. 5장에서 결론을 제시하였다.

2. 효율향상 프로그램 성과의 계량 및 검증

2.1 M&V 정의

전력수요관리 프로그램의 시행성과에 대한 계량 및 검증(M&V; Measurement & Verification)이란 전력수요관리 프로그램 기술을 도입함으로써 발생하는 수요 및 에너지 절감량(demand and/or energy savings)을 계량화하여 검증하는 행위로서, 수요관리기술의 도입 전후의 절감량 차이를 다양한 측정, 에너지비용분석 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 종합적으로 분석하는 것을 말한다.

절감량을 도출하기 위해서는 우선적으로 기준이 되는 조건 및 설비가 명시되어야 한다. 여기에는 구체적인 현장 상황을 나타내는 장비의 목록, 운전조건, 재실자, 설비사양, 에너지 소비율, 제어방식, 부하의 운전패턴(일정 부하 또는 가변부하) 등이 규정되어야 한다.

M&V를 시행함에 있어서 반드시 비용이 수반된다. 따라서 도출하고자 하는 정보의 중요도와 요구되는 정밀도 등을 고려하여 가장 비용효과적인 M&V방법을 선정하는 것이 필요하며, 실질적으로 M&V비용은 전력수요관리 프로그램 시행 비용의 10%이내가 되도록 그 방법 및 절차가 정의되고 있다.

2.2 M&V 방법론

전력수요관리 프로그램의 시행성과를 계량하고 검증하는 방법은 절감량을 산출하는데 소요되는 비용과 요구되는 정밀도 수준에 따라 다양한 방법이 존재하여, 현재까지 다루어지고 있는 4가지 방법론에 대해서 본 절에서 개괄적으로 기술하였다.

2.2.1 Option A

Option A는 일반적으로 설비 개체에 대한 성과평가(performance verification)로 정의되며, 측정 또는 약정된 성능과 약정된 소비량을 이용한 방법이다. 설비의 개체 전후에 시스템의 성능을 측정(순간 또는 단기측정)하거나 선행된 성능평가 결과를 활용하여 설비 개체의 성능평가를 수행하고, 미리 약정한 인자(stipulated parameter)- 운전시간 등-의 차이를 계산한 후 이를 승산함으로써 절감량을 결정하는 방법이다. 본 방법은 조명이나 냉방부하 등과 같이 한 건물내의 개별부하나 시스템에 적용하기 적합한 방법이며, 정밀도 수준이 가장 낮은 접근법이지만 비용측면에서 가장 유리한 방법이다.

2.2.2 Option B

Option B는 일반적으로 설비 개체에 따른 절감평가(savings verification)로 정의하고 있으며, 측정된 성능과 약정된 소비량을 이용하는 것은 Option A와 유사하나, 설비 개체의 성능측정에 있어서 순간 측정보다는 장단기간의 걸친 연속측정을 통해서 성능을 검증하고, 운전시간 등의 약정된 요소에 현장의 특성을 반영한 접근방법이다. Option B는 개별 설비에 대한 연속적인 측정과 측정된 성능에 대한 기준이 되는 설비의 성능(baseline)과 비교함으로써 절감량을 결정하게 된다. 따라서 기준의 설정방법과 그 당위성이 절감량의 신뢰성을 좌우하게 된다.

2.2.3 Option C

Option C는 건물 전체나 참여자 주계량기의 측정치를 이용하여 절감량을 결정하는 방법으로, 개체 설비에 대한 에너지사용패턴에 관한 정보를 통해서 현장 전반의 에너지사용패턴에서 설비 개체 또는 도입 효과를 파악하는 방법이다. Option C는 개체별로 설비를 측정하기 곤란한 경우, 에너지 시스템간의 상호작용에 대한 측정이 요구되는 경우, 그리고 단일 등과 같이 직접적인 절감량

을 산출하기는 어려우나 그 효과를 파악할 필요가 있는 경우에 사용할 수 있는 방법이다.

2.2.4 Option D

Option D는 "VisualDOE" 등과 같은 컴퓨터 시뮬레이터를 이용하여 절감량을 결정하는 방법으로, 설비나 건물에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 모델과 개별 성능검증 자료를 통한 파라미터 수치를 결정하여, 적용기술의 효과를 계량화하는 방법이다. Option D는 현장의 특성이 항상 동일할 수 없으므로, 현장 특성을 반영할 수 있는 모델 및 파라미터의 조율과정이 요구되고, 설계를 비롯한 다양한 전문지식이 요구되는 방법으로, 많은 시간과 비용이 소요되는 방법이다.

3. 제안한 측정 자료의 신뢰성 확보 기법

측정 자료의 신뢰성을 확보하기 위해서는 측정 자료에 포함된 오류자료(bad data)를 식별하여 적절히 보정하는 과정이 요구된다. 이러한 오류자료의 식별과 보정을 위해서는 무엇보다 측정 자료의 특성을 선결적으로 확보할 필요가 있으나 이는 가용하지 않는 경우가 대부분이다.

3.1 가정

본 논문에서는 수요관리 특히 효율향상프로그램의 성과에 대한 M&V에서 접하게 되는 측정자료의 성질을 반영하여 다음과 같은 가정을 바탕으로 하였다.

1) 측정자료는 순간 및 단기 측정자료를 기반으로 한다. 효율향상프로그램의 경우에 M&V비용을 낮추기 위해서 약정요소(stipulated factors)를 이용한 평가방법이 주로 사용되고 있는데, 이때 사용할 측정기법이 순간 또는 단기측정을 사용하고 있다. 이러한 가정은 연간 부하성상 추세나 계절적인 추세가 반영되지 않게 됨으로 복합적인 예측모형을 사용하지 않고 단순하고 빠른 응답 특성을 갖는 기법들을 사용할 수 있다.

2) 두 번째는 측정물리량이 지정된 분단위 평균치이다. 대부분의 자료기록계(data logger, 예, Elite Logger 등)들이 측정주기를 선정하여 구간 평균값과 최대, 최소 값을 제공하고 있기 때문에 측정장치들의 특성을 반영한 시스템 설계를 위한 가정이다.

3) 측정자료에는 기본적으로 전압, 전류, 유효전력, 역률 등 측정자료에 포함되어 있다. 이는 측정자료에 포함된 오류정보를 파악하기 위해서 요구되는 것이나, logger에서 이들 물리량의 조합을 통해서 계산된 값이 기록된다면, 본 가정은 유효하지 않게 된다.

4) 측정자료의 유효 측정오차는 알려져 있다. 이는 측정장치의 정밀도를 통해서 측정의 전제조건으로 가정할 수 있다.

3.2 오류정보 식별 및 보정

오류정보의 식별은 누락자료(missing data)와 불량자료(erroneous data)를 선별해 내는 일련의 과정을 의미한다. 누락자료라 함은 측정조건에서 정의된 측정개시일 시 및 종료일내에 측정주기단위의 물리량이 존재하지 않음을 의미하며, 불량자료란 물리량은 존재하나 기본 물리량의 연산을 통해서 유효하지 않은 특정 물리량이 존재함을 의미한다. 따라서 이들 물리량은 반드시 보정되어야 한다. 보정은 불량자료를 배제하는 방법과 논리적으로 합당한 과정을 통해서 그 값을 보정하는 방법을 사용할 수 있다. 본 논문에서는 일차적으로 측정자료 전체에 대해서 우선적으로 누락자료를 식별한다. 누락자료는 측정주기별 누락자료의 존재유무를 식별하고 누락자료를 배제한 자료만을 이용해서 측정시간대별 구간 평균값(ensemble average)을 도출한다. 이 정보는 보정과정

에서 사용된다. 누락자료의 존재는 각종 예측기법의 적용에 있어서 제약으로 작용할 수 있다. 특정 구간 정보를 이용한 구간 외측의 값을 예측하는 경우에는 외삽법(extrapolation)에 의한 결과의 신뢰성을 저하될 수 있으며, 구간 내부값에 포함된 결손자료가 측정자료에 비해 상대적으로 그 양이 상당한 경우에는 각종 내삽기법(interpolation)을 사용하여 보정한다. 손 치더라도 그 영향이 보정값이 포함되어 있으므로 이를 이용한 응용분야의 오차가 근본적으로 함유되게 된다.

전술한 바와 같이 본 논문에서 누락자료는 측정주기를 통해서 식별하고 누락자료는 1차적으로 3차 구간 보간법(piecewise cubic interpolation)을 통해서 보정하고, 전일 구간평균값과의 산출평균을 통해서 보정한다. 3차 구간 보간법을 이용한 유효전력 보정값 $P(x)$ 는 식(1)과 같다.

$$P(x) = \frac{3h_k s^2 - 2s^3}{h_k^3} y_{k+1} + \frac{h_k^3 - 3h_k^2 s + 2s^3}{h_k^3} y_k + \frac{s^2(s-h_k)}{h_k^2} d_{k+1} + \frac{s(s-h_k)^2}{h_k^2} d_k \quad (1)$$

$$\text{단, } h_k = x_{k+1} - x_k, \quad s = x - x_k, \quad d_k = \delta_{k-1}, \\ d_{k+1} = \frac{y_{k+2} - y_{k+1}}{x_{k+2} - x_{k+1}}, \quad \delta_k = \frac{y_{k+1} - y_k}{h_k}$$

여기서, h_k : k-번째 부분구간의 길이,
 d_k : k-번째 부분구간에서의 기울기,
 $(\delta_k \neq d_k)$
 δ_k : k-번째 부분구간의 평균 기울기.

여기서 측정주기 즉 구간의 길이가 일정하지 않는 경우에는 식(2)와 같은 변형식을 사용하여 적용한다.

$$\frac{w_1 + w_2}{d_k} = \frac{1}{2} \left(\frac{w_1}{\delta_{k-1}} + \frac{w_2}{\delta_k} \right) \quad (2)$$

$$\text{단, } w_1 = 2h_k + h_{k-1}, \quad w_2 = h_k + 2h_{k-1}$$

위와 같이 3차구간보간법을 통해서 보정된 자료와 측정시간대별 양상별 평균치와의 산출평균값을 실질 보정값으로 기록한다.

$$P^C(x) = Ave(P(x), E-AVE(x)) \quad (3)$$

오류정보는 기본적인 유효전력식의 연산값과 기존 측정치들의 측정오차를 기반으로 식별하여, 이에 대한 보정은 자료의 누락자료로 처리하고 누락자료의 보정과정을 수행함으로써 보정할 수 있다. 또한, 오류자료 중 이상값(outlier)은 측정대상의 실질 전력소비량 자료와 양상별 평균값을 통해서 사분위수를 이용하여 식별하며, 마찬가지로 오류자료로 판명될 경우에는 누락자료로 처리해서 전술한 보정과정을 통해 보정하도록 하였다.

4. M&V 시스템

효율향상 프로그램에 대한 객관적인 평가를 위해서는 공인된 평가시스템의 확보가 중요한 관건이며, 이에 대한 기본적인 개념이 정립되고 있다. 효율향상 프로그램의 성과에 대한 계량검증 시스템의 주요 기능으로는 참여자의 정보관리, 참여자의 참여 프로그램정보관리, 신뢰성검증을 포함한 측정자료의 관리, 그리고, 측정자료를 바탕으로 한 프로그램 성과의 검증기능이 있다. 이러한 M&V시스템을 설계 구현하기 위해서는 이들 기능의 주요 목표 즉 평가의 관점이 명확히 정의될 필요가 있으며, 본 논문에서 논의하는 M&V시스템은 공익기금을 사용한 효율향상 프로그램의 검증에 초점을 맞추어 전담기관에서 성과를 검증할 수 있는 시스템으로서의 M&V시스템을 논하며, 이러한 논의는 그림2와 같은 유기적인

체제하에서 운용되어야 한다.

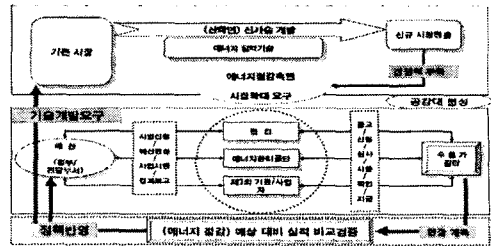


그림 2 효율향상 프로그램의 수행체계
 Fig. 2 Implementation process of Energy Efficiency Program

그림 3은 전술한 M&V시스템의 설계 및 구현 프로그램을 보여주고 있다. 좌측은 전술한 M&V시스템의 주요 기능에 대해서 기술되었으며, 참여자, 시행기관, 전담기관, 측정기관에 따라서 자신의 자료를 일정한 규칙에 의해서 제출하고 이를 전담기관에서 일괄하여 평가할 수 있도록 구성되어 있다.

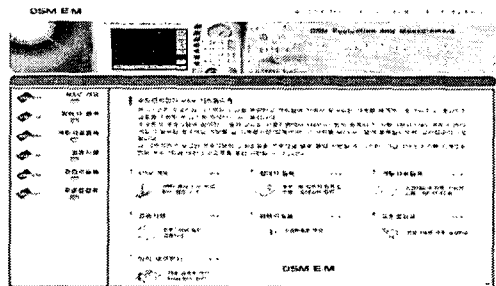


그림 3 DSM 프로그램성상을 위한 M&V 시스템
 Fig. 3 M&V System for evaluating the performance of DSM

5. 결 론

본 논문에서는 수요관리 특히 효율향상 프로그램의 성과를 계량 및 검증하기 위해 필수기능으로서의 측정자료의 신뢰성 확보방안에 대해서 제시하였다. 본 논문에서 정의된 방안은 원형으로서의 의미가 있으며, 실제로 M&V시스템을 통해서 그 신뢰성에 대한 다각도의 평가가 이루어져야 하며, 일부에 대해서는 그 실효성이 검증되고 있다. 측정자료의 신뢰성 검증은 M&V결과의 신뢰성에도 큰 영향을 미치지만 무엇보다 M&V시스템의 신뢰성에 그 영향이 크므로 향후, 측정자료의 신뢰성 검증에 소요되는 시간복잡도(time complexity)를 고려하여 M&V시스템의 성능향상에 관한 연구를 지속적으로 수행할 필요가 있다.

[Acknowledgments]

본 연구는 "수요관리사업 평가시스템 구축사업에 관한 전력산업기반조사사업"의 연구 성과의 일부임.

[참고 문헌]

- [1] DOE, *International Performance Measurement and Verification Protocol*, USA, 1997.12., Revised 2002.
- [2] CenterPoint Energy, *Commercial & Industrial Standard Offer Program - Program Manual*, 2004.9.
- [3] 에너지관리공단, *DSM 프로그램별 M&V 및 경제성평가*, 2000.12.
- [4] CPUC, *The California Evaluation Framework*, 2004.6.
- [5] Nexant, *Measurement & Verification Resources and Training Opportunities*, Revision 3, 2001.10.