

Development of Demand Response Operation System for Load Aggregators

김 지 희* · 문 국 현** · 주 성 관† · 오 재 철***
(Ji-Hui Kim · Guk-Hyun Moon · Sung-Kwan Joo · Jae-Cheol Oh)

Abstract - During an emergency due to a shortage of power, a load aggregator (LA) can use the demand response operation system to deploy demand response resources (DRRs) through various demand response (DR) programs. This paper introduces the demand response operation system for a load aggregator to manage various demand response resources in a smart grid environment.

KeyWords : Demand Response (DR), Demand Response Resource (DRR), Demand Response Operation, Load Aggregator, Smart Grid.

1. 서 론

스마트 그리드(Smart Grid)를 구성하는 다양한 요소 중 수요반응(DR : Demand Response)은 기존의 소비자들이 능동적 전력시장 참여자가 되어 에너지 사용량과 발전을 관리하는 역할을 수행하는 것으로, 스마트 그리드 운영을 위한 핵심적인 개념이라 할 수 있다[1-3]. 현재 국내에서는 이러한 수요반응의 일환으로 ISO(Independent System Operator)가 수요자원시장을 개설함으로써 시장 참여자들의 전력 소비 감소 및 피크 부하의 절감을 유도하고 있다. 또한 ISO의 수요자원시장의 참여 자격에 미달되는 말단 수용가들은 부하관리사업자(LA : Load Aggregator)를 통하여 간접적으로 수요자원시장에 참여하고 있다. 이 때 부하관리사업자는 자신의 수익 최대화를 목표로 ISO의 수요자원시장에 참여함과 동시에 말단 수용가들의 특징을 고려하여 다수의 수요반응 프로그램을 운영하여야 할 것이다.

현재 해외에서 수요반응 운영 시스템 개발과 관련된 연구 및 사업을 추진 중이지만[4] 해외의 수요반응 운영 시스템은 국내 실정에 적합하지 않다는 한계점이 있다. 또한 수요반응 및 DR 자원과 관련하여 부하관리사업자가 말단 수용가의 특징을 고려하여 부하 제어량을 배분하는 방법이 연구되었으나[5, 6] 이러한 연구는 직접부하제어(DLC : Direct Load Control) 프로그램을 적용할 경우로 한정되어 있을 뿐만 아니라 각 DR 자원의 구체적인 특성을 고려하지 않았다. 이와 관련하여 기존연구 [7, 8]에서는 스마트 그리드 환경

하에서 부하관리사업자의 DR 자원 운영 시스템을 설계하고, 부하관리사업자 관점에서의 DR 자원 최적 배분 전략에 대한 선행연구를 수행하였다. 본 논문에서는 선행연구 [7, 8]을 보완하여 현재 개발 중인 부하관리사업자용 수요반응 운영 시스템 소개 및 DR 자원 배분 계획과 관련된 예시를 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2절에서는 부하관리사업자용 수요반응 운영 시스템의 개요 및 흐름에 대하여 서술한다. 다음으로 3절에서는 수요반응 운영 시스템 내에서 부하관리사업자 관점에서의 최소비용 DR 자원 배분 계획에 관련된 예시를 제시한다.

2. 부하관리사업자용 수요반응 운영 시스템

스마트 그리드 환경 하에서 수요반응 운영 시스템의 구성원은 크게 ISO, 대수용가 및 부하관리사업자 그리고 말단 수용가로 구분할 수 있다. 부하관리사업자는 다수의 말단 수용가들을 모집하여 대수용가와 함께 ISO의 수요자원시장에 참여하는 주체로써, 기존의 전력시장에 새롭게 출현한 시장 참여자이다. 부하의 규모가 작아 ISO의 수요자원시장에 직접 참여할 수 없었던 말단 수용가는 부하관리사업자를 통해 간접적으로 ISO의 수요자원시장에 참여하여 자신의 부하 패턴을 변화할 수 있게 되었고 ISO 또한 부하관리사업자를 통해 다수의 말단 수용가들을 효율적으로 제어할 수 있게 되었다. 즉, 부하관리사업자는 ISO와 말단 수용가의 중간에 위치하며 다수의 말단 수용가들을 모집하여 ISO의 수요자원시장에 참여한다. 이 때, 부하관리사업자는 말단 수용가들에게 ISO의 수요자원시장과는 독립적으로 수요반응 프로그램을 적용함으로써 도출되는 수익을 기대한다[8]. 본 절에서는 현재 개발 중인 부하관리사업자용 수요반응 운영 시스템에 대하여 설명할 것이다.

ISO는 독립적인 서버를 보유하고 있으며 이 ISO의 서버

* 정 회 원 : 고려대 공대 전자전기공학과 박사과정
 ** 정 회 원 : 고려대 공대 전자전기공학과 박사과정
 † 교신저자, 정회원 : 고려대 공대 전기전자전공학과 부교수
 E-mail : skjoo@korea.ac.kr
 *** 정 회 원 : ㈜아이온커뮤니케이션즈 대표이사
 접수일자 : 2011년 9월 19일
 최종완료 : 2011년 10월 19일

는 대수용가 및 부하관리사업자의 부하 삭감량을 공지하는 역할을 수행한다. 또한 대수용가는 EMCS(Energy Management Control System)를 통해 본인이 소유하고 있는 대규모의 전기 부하를 제어함으로써 ISO가 공지한 부하 삭감량을 충족한다. 반면 부하관리사업자는 ISO와는 별도로 독립적인 서버를 보유하고 있으며 이를 통해 다수의 말단 수용가들을 모집, 제어한다. 부하관리사업자에 소속되어 있는 말단 수용가들에게는 각각 게이트웨이가 설치되어 있고 부하관리사업자가 부하 삭감을 공지할 경우 말단 수용가들은 이러한 게이트웨이를 통해 자신이 보유하고 있는 다수의 스마트 기기를 제어한다. 즉, ISO가 부하 삭감을 공지할 경우 대수용가는 자신이 보유하고 있는 전기 부하를 직접 제어하는 반면 부하관리사업자는 자신에게 소속되어 있는 다수의 말단 수용가들에게 다시 부하 삭감 공지를 하여 말단 수용가들이 전기 부하를 제어하도록 유도한다.

전력계통의 공급 예비력이 적정 수준 이하이거나 계통 최대전력이 기존 계통 최대전력을 초과할 것으로 예상되는 경우 또는 기타 부하 관리가 필요하다고 판단될 경우, ISO는 수요자원시장을 개설하여 대수용가 및 부하관리사업자를 대상으로 부하 삭감을 공지한다[9]. 이 때 ISO는 수요자원시장을 효율적으로 운영하기 위해 별도의 시스템을 구축한다. 또한 부하관리사업자도 ISO의 수요자원시장에 참여함과 동시에, 이와는 독립적으로 수요반응 프로그램을 통하여 말단 수용가들을 DR 자원화 하므로 부하관리사업자용 수요반응 운영 시스템 구축이 필수적이다. 반면 대수용가는 ISO나 부하관리사업자와 같이 수요반응을 운영하는 주체가 아니기 때문에 별도의 수요반응 운영 시스템 없이 부하제어장치를 통해 전기 부하를 제어한다. 이와 같이 수요반응 운영 시스템의 구성원들은 각기 다른 특징을 가지고 있으므로 이를 고려하여 시스템을 개발하여야 할 것이다. 이러한 시장 참여자들의 특징을 고려한 수요반응 운영 시스템 구성은 그림 1과 같다.

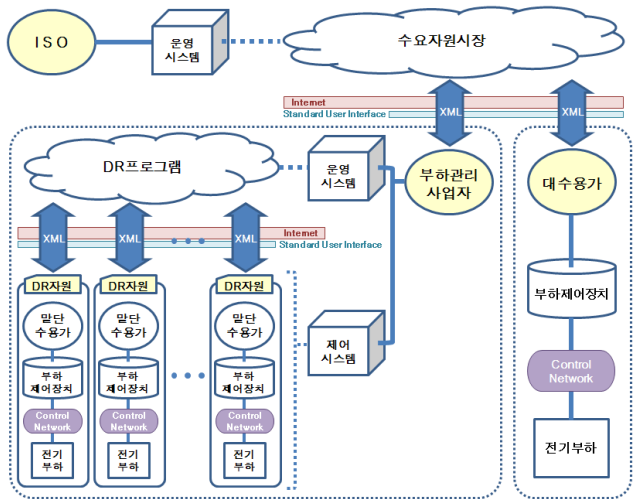


그림 1 수요반응 운영 시스템 구성도
Fig. 1 Composition of Demand Response Operation System

그림 1에서 제안된 수요반응 운영 시스템은 개방형 표준 언어인 XML(eXtensible Markup Language)를 기반으로 설

계되었다. 그리고 ISO의 수요자원시장과 대수용가 및 부하관리사업자 간의 사용자 인터페이스는 인터넷 기반이며 부하관리사업자와 말단 수용가 간의 사용자 인터페이스 또한 인터넷 기반으로 구성된다. 뿐만 아니라 대수용가 및 말단 수용가는 별도의 컨트롤 네트워크를 통해 전기 부하를 제어한다.

스마트 그리드 환경 하에서 ISO는 인터넷의 웹페이지를 통해 대수용가 및 부하관리사업자에게 수요자원시장 개설 및 부하 삭감을 공지한다. 이렇게 ISO의 수요자원시장의 개설 및 부하 삭감이 인터넷의 웹페이지를 통해 공지되면 부하관리사업자는 자신의 수요반응 프로그램에 가입한 말단 수용가들에게 사전에 보급하였던 단말기를 통해 부하 삭감을 공지한다. 그림 2는 현재 개발 중인 스마트 그리드 환경 하에서의 수요반응 운영 시스템 및 말단 수용가의 단말기 간 운영 절차를 보여준다.



그림 2 수요반응 운영 시스템 및 말단 수용가의 단말기 간 운영 절차

Fig. 2 Operation Process of Demand Response Operation System and Retail Customer

그림 2에서, ISO가 사전에 대수용가 및 부하관리사업자를 대상으로 수요자원시장에 참여할 부하군을 모집하면 부하관리사업자는 ISO의 수요자원시장 참여 자격을 충족하는 적정 규모 이상의 부하량을 확보하기 위해 말단 수용가들을 대상으로 자신의 수요반응 프로그램에 참여할 부하군 모집을 실시한다. 부하관리사업자의 부하군 모집 공고를 숙지한 말단 수용가들은 자신이 보유하고 있는 부하의 종류 및 특성을 부하관리사업자에게 등록하게 되고, 부하관리사업자는 등록된 말단 수용가들의 부하 종류 및 특성을 분석하여 해당 말단 수용가가 DR 자원으로써 가치가 있는지 판단한다. 만약 해당 말단 수용가가 DR 자원으로써 가치가 있다고 판단되면 부하관리사업자는 해당 말단 수용가의 수요반응 프로그램 참여를 승인한다. 이렇게 ISO의 수요자원시장에 참여할 자격을 충족할 만큼의 DR 자원들을 모집, 통합한 부하관리사업자는 ISO에 통합된 말단 수용가들의 전기 부하의 중

류 및 특징을 등록한다. 부하관리사업자가 등록한 전기 부하들이 ISO의 수요자원시장에 참여할 자격이 충족되면 ISO는 해당 부하관리사업자에 대한 수요자원시장의 참여를 승인한다. ISO의 수요자원시장에 참여할 자격을 획득한 부하관리사업자는 자신에게 소속되어 있는 각 말단 수용가에게 적합한 수요반응 프로그램을 추천하고 해당 말단 수용가는 부하관리사업자의 수요반응 프로그램에 자발적으로 참여한다.

전력 계통에 비상 상황이 발생할 경우 ISO는 수요자원시장을 개설할 뿐만 아니라 부하관리사업자 또한 ISO의 수요자원시장 공지 내용을 바탕으로 말단 수용가들에게 DR이벤트를 공지한다. 이 때 부하관리사업자는 웹페이지를 통해 ISO의 수요자원시장을 참여함과 동시에 사전에 말단 수용가들에게 보급한 단말기를 통해 DR이벤트 기간 동안의 부하 삭감량 뿐만 아니라 부하를 삭감하여야 하는 시각, 부하 삭감 이행 시 말단 수용가가 지급받는 인센티브 등을 공지한다. 즉, 부하관리사업자의 DR이벤트 기간 동안 말단 수용가들은 공지된 DR이벤트 내용을 바탕으로 부하를 삭감하며 이와 동시에 부하관리사업자는 ISO의 수요자원시장에 참여하게 된다. ISO의 수요자원시장과 부하관리사업자의 DR이벤트가 종료되면 ISO는 수요자원시장에 참여한 부하관리사업자의 부하 삭감량에 따른 인센티브를 정산하여 부하관리사업자에게 지급하고, 마찬가지로 부하관리사업자는 DR이벤트에 참여한 말단 수용가들의 부하 삭감량에 따른 인센티브를 정산하여 각 말단 수용가에게 지급한다. 이 때, 부하관리사업자는 ISO로부터 지급받은 인센티브에서 자신의 마진을 계산한 나머지 금액을 말단 수용가들에게 인센티브로 지급한다. 여기서 부하관리사업자가 계산한 마진이 곧 본 수요반응 운영 시스템에서 도출되는 부하관리사업자의 수익이다. 결과적으로 부하관리사업자가 수요반응 프로그램에 참여한 말단 수용가들에게 지급하는 인센티브의 총 합이 부하관리사업자의 DR 자원 운영비용이 되며 부하관리사업자는 DR 자원 운영비용이 최소화 될수록 부하관리사업자의 수익이 증가됨을 알 수 있다. 따라서 부하관리사업자는 DR 자원 운영비용이 최소화 되도록 DR 자원 배분 계획을 세워야 할 것이다.

3. 최소비용 DR 자원 배분 계획

본 절에서는 부하관리사업자용 수요반응 운영 시스템 개발 시 최소비용 DR 자원 배분 계획에 대한 예시를 서술한다. 부하관리사업자의 DR 자원 운영에 따른 수익을 최대화하기 위해서는 DR 자원 운영비용을 최소화하는 방향으로 시스템을 설계하여야 한다. 따라서 부하관리사업자의 최소비용 DR 자원 배분 계획을 통해 부하관리사업자용 수요반응 운영 시스템을 개발할 경우 DR 자원을 최적으로 배분할 수 있을 것이다.

아래에서는 부하관리사업자용 수요반응 운영 시스템 개발 시 최소비용 DR 자원 배분 계획에 대한 예시를 나타내었다. 오늘날 예비력 시장에서 수요반응에 대한 중요도가 점차 높아짐[10-13]에 따라 본 예시에서는 부하관리사업자가 예비력 시장에서만 수요반응 프로그램을 운영한다고 가정한다. 또한 부하관리사업자의 수요반응 프로그램에 참여하는 말단 수용가의 총 수는 4개이며 이들은 부하관리사업자의 수요반

응 프로그램에 자발적으로 참여한다고 가정한다. 뿐만 아니라 말단 수용가가 DR이벤트 기간 동안 부하 삭감을 시행할 경우 부하관리사업자로부터 인센티브를 지급 받으며 부하 삭감을 시행하지 않을 경우 부하관리사업자에게 페널티를 지불하지 않는다고 가정한다. 마지막으로 본 예시에서 부하관리사업자가 말단 수용가들에게 공지하는 DR이벤트 구간은 8개이며 DR이벤트 1구간은 1시간 단위이다.

먼저 예시를 위한 부하관리사업자의 수요반응 프로그램 종류 및 특징을 표 1에서 제시하였다.

표 1 부하관리사업자가 운영하는 수요반응 프로그램 종류 및 특징

Table 1 Demand Response Programs of Load Aggregator

| 수요반응 프로그램 종류 | 인센티브 (\$/kW) | 부하 삭감 의무 정도 |
|--------------|--------------|-------------|
| A | 7 | 상 |
| B | 5 | 하 |

표 1에서 부하관리사업자는 예비력 시장에 2개의 수요반응 프로그램을 운영한다. 이 때, 부하관리사업자가 운영하는 수요반응 프로그램의 인센티브는 각각 다르며 인센티브가 높은 수요반응 프로그램 일수록 해당 말단 수용가의 부하 삭감 의무 정도도 높아진다. 또한 말단 수용가들은 예비력 시장에서 1개의 수요반응 프로그램에만 참여할 수 있다.

다음으로, 부하관리사업자의 수요반응 프로그램에 참여하는 말단 수용가들의 특징은 표 2와 같다.

표 2 부하관리사업자의 수요반응 프로그램에 참여하는 수용가 특징

Table 2 Characteristics of Retail Customers

| 말단 수용가 | 수요반응 프로그램 | 증감률 (kW/분) | 감발률 (kW/분) | 부하삭감용량 | | 정지시간 | |
|--------|-----------|------------|------------|---------|---------|-----------|-----------|
| | | | | 최대 (kW) | 최소 (kW) | 최소 감축 (시) | 최소 정지 (시) |
| 1 | A | 26 | 228 | 55 | 15 | 1 | 2 |
| 2 | A | 30 | 15 | 45 | 10 | 2 | 1 |
| 3 | B | 25 | 23 | 75 | 30 | 2 | 3 |
| 4 | B | 27 | 25 | 90 | 35 | 2 | 3 |

표 2에서 각 말단 수용가가 참여하는 수요반응 프로그램의 종류 및 증/감발률, 부하관리사업자의 수요반응 프로그램에 참여하는 각 말단 수용가의 DR이벤트 구간 별 최대/최소 부하 삭감 용량 그리고 최소 감축/최소 정지 지속 시간 등을 나타내었다. 다음으로, 표 3에서는 ISO의 수요자원시장 하에서 부하관리사업자에게 공지된 DR이벤트 구간 별 부하 삭감량을 제시하였다.

표 3 ISO의 수요자원시장 하에서 부하관리사업자에게 공지된 DR이벤트 구간 별 부하 삭감량

Table 3 Requested Load Curtailments by ISO

| DR이벤트 구간 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 공지 부하 삭감량(kW) | 153 | 175 | 228 | 231 | 250 | 236 | 202 | 175 |

위에서 제시한 가정을 바탕으로 DR이벤트 기간 동안 부하관리사업자가 수요반응 프로그램에 참여하는 말단 수용가들에게 공지하는 부하 삭감량 및 각 말단 수용가에게 지급하는 예상 인센티브의 결과는 표 4와 같다.

표 4 부하관리사업자의 DR 자원 배분 계획

Table 4 Allocated DRRs of Load Aggregator

| DR이벤트 구간 말단 수용가 | DR이벤트 구간 | | | | | | | | 총 공지 부하 삭감량 (kW) | 예상 인센티브 (\$) |
|--------------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|------------------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | |
| 1 | 0 | 15 | 35 | 36 | 47 | 39 | 21 | 0 | 193 | 1,351 |
| 2 | 0 | 0 | 28 | 30 | 38 | 32 | 16 | 10 | 154 | 1,078 |
| 3 | 69 | 72 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 591 | 2,955 |
| 4 | 84 | 88 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 712 | 3,560 |

표 4에서, 낮은 인센티브를 지급받는 수요반응 프로그램에 참여하는 말단 수용가 3과 말단 수용가 4에게 상대적으로 더 많은 부하 삭감량이 산정되는 것으로 분석된다. 이와는 반대로 높은 인센티브를 지급받는 수요반응 프로그램에 참여하는 말단 수용가 1과 말단 수용가 2의 경우에는 상대적으로 적은 부하 삭감량이 산정 되는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 위의 예시에서 제시한 바와 같이 부하관리사업자가 각 말단 수용가의 특징을 고려하여 DR 자원 배분 계획을 세운다면 부하관리사업자의 DR 자원 운영비용을 최소화 할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 현재 진행 중인 부하관리사업자용 수요반응 운영 시스템 구성 및 운영 절차에 대하여 기술하였다. 또한 스마트 그리드 환경 하에서 부하관리사업자가 DR 자원 운영비용을 최소화할 수 있도록 최소비용 DR 배분 계획에 대한 예시를 제시하였다. 본 논문에서 제시한 부하관리사업자의 수요반응 운영 시스템의 최소비용 DR 자원 배분 계획은 향후 수익 최대화 DR 자원 배분 계획 방향으로 확장할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010101030003C), (No. 20114010203010)

참 고 문 헌

[1] 지식경제부, “스마트 그리드 국가로드맵,” Jan. 2010.
 [2] 김지희, 위영민, 주성관, 오재철, “스마트 그리드(Smart Grid) 하에서 수요반응(Demand Response)의 역할 및 필요성,” 대한전기학회 전기의 세계, 제58권, 제12호, pp. 42-44, Dec. 2009.
 [3] FERC, “Assessment of Demand Response and Advancing Metering,” Aug. 2006.

[4] PIER, “Open Automated Demand Response Communications Specification(Ver. 1.0),” April 2009.
 [5] 정구현, 김진호, 김발호, “부하관리사업자의 비상시 부하제어량 배분 알고리즘 개발,” 대한전기학회 전기학회 논문지 A, 제53A권, 제9호, pp. 466-471, Aug. 2004.
 [6] 정상윤, 박종배, 신중린, 김형중, 채명식, “직접부하자원의 시간대별 부하배분 전략,” 대한전기학회 하계학술대회, July 2005.
 [7] 김지희, 문국현, 김민경, 공성배, 조형철, 주성관, 오재철, “스마트 그리드 환경 하에서 LA사업자의 DR 자원 운영 시스템 설계,” 대한전기학회 하계학술대회, July 2011.
 [8] 김지희, 이종욱, 주성관, 오재철, “LA사업자 관점에서의 DR 자원 배분 전략,” 대한전기학회 하계학술대회, July 2010.
 [9] 한국전력거래소, “전력수요자원시장 운영규칙,” June 2011.
 [10] Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, “Demand Response Spinning Reserve Demonstration,” May 2007.
 [11] R. B. Burke and M. I. Henderson, “Incorporating Demand Response in Operating Reserve in New England,” in Proc. IEEE PES General Meeting, vol. 2, pp. 1570-1574, June 2005.
 [12] Y. Wang, I. R. Pordanjani, and W. Xu, “An Event-Driven Demand Response Scheme for Power System Security Enhancement,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, no. 1, pp. 23 - 29, March 2011.
 [13] M. Parvania and M. Fotuhi-Firuzabad, “Demand Response Scheduling by Stochastic SCUC,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 89-98, June 2010.

저 자 소 개

김 지 희 (金 志 姬)

2008년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 현재, 동 대학원 전자전기공학과 박사과정.

문 국 현 (文 國 賢)

2007년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 현재, 동 대학원 전자전기공학과 박사과정.

주 성 관 (朱 成 官)

2004년 University of Washington 전기공학과 졸업(공학박사). 2006년~현재, 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수.

오 재 철 (吳 在 哲)

1991년 경희대학교 경제학과 졸업. 현재, ㈜아이온커뮤니케이션즈 대표이사.