

소비자의 행동 패턴을 고려한 수요반응의 상태 천이 모델

State Transition Model of Demand Response Considering Behavior Patterns of Customer

곽 형 근* · 이 나 은* · 김 진 오†
(Hyung-Geun Kwag · Na-Eun Lee · Jin-O Kim)

Abstract - Demand response(DR) is potential generation alternative to improve the reliability indices of system and load points. However, when demand resources scheduled in DR market fail to reduce demand, it can create new problems associated with maintaining a reliable supply. In this paper, a reliability model of demand resource is constructed considering customers' behaviors in the same form as conventional generation units, where availability and unavailability are associated with the simple two-state model. As a result, the generalized reliability model of demand resources is represented by multi-state model.

Key Words : Power system, Demand response, Demand resource, Reliability, Transition rate, Unavailability, Ramp rate

1. 서 론

전력 시스템의 신뢰도 문제를 해결하기 위하여 많은 국가들이 피크 부하 시 종래의 발전기의 대체재로써 수요반응을 도입하고 있다. 수요반응(DR, demand response)은 전기 가격의 변화에 따른 소비자의 전기 사용의 변화를 유도하는 가격 기반 수요반응과 시스템의 신뢰도가 악화되거나 도매 시장에서의 전기 가격이 높게 형성된 경우 인센티브를 통한 전기 사용의 변화를 유도하는 인센티브 기반 수요반응으로 구분한다 [1-2]. 일반적으로 풀 기반의(pool-based) 전기 에너지 시장과 마찬가지로 수요반응도 풀 기반의 수요반응 시장에서 거래가 되며 [3], 수요반응 시장에서 거래가 성사된 수요자원은 부하 감축에 대한 의무를 가진다. 그러나 만약 수요반응 시장에서 정산된 수요자원이 부하 감축에 실패하게 된다면 전력 계통의 신뢰도에 좋지 않은 영향을 끼치게 될 것이다. 이러한 계통의 신뢰도 관점에서 수요반응에 관한 연구들이 최근에 진행되어 왔다. 수요반응에 따른 각 부하 버스에서의 전기 가격과 신뢰도 지수를 계산하고 신뢰도 영향력을 분석하였고 [4-5] 수요반응을 고려한 스마트 그리드의 신뢰도 영향력을 분석하였다 [6]. 또한 수요반응의 지리적 이점과 빠른 반응 속도 때문에 수요자원의 운영 예비력으로 활용하는 방안도 소개되었다 [7]. 하지만 기존의 모든 연구들이 소비자의 행동 패턴이 불확실하고 그 예측이 가능하지 않으며 소비자가 쉽게 마음을 바꿀 수 있다는 사실을 간과하였다. 심지어 소비 패턴에 관한 과거 데이터를 추적하여 소비 패턴을 계량화 한다고 하더라도 그들의 다음 소비 패턴을 예측하는 것은 거의 불가능할 것이다. 이러한

소비자 행동의 불확실성은 시스템의 신뢰도에 부정적인 영향을 끼치고 때때로 심각한 상정사고를 야기할 지도 모른다. 따라서 본 연구에서는 기존 발전기의 가용성(availability), 비가용성(unavailability)의 고장상태 모델처럼 소비자의 행동의 불확실성에 따른 상태천이 모델을 소개하고 [8-9] 이를 다단 상태 모델로 확장하여 전력시스템에 투입되는 수요자원의 신뢰성을 판단하는 방법을 제안한다.

2. 수요반응의 상태 천이 모델

수요반응에서 수요 감축은 부하를 기준으로 음의 값이지만 고객에게 전달해야 하는 가용용량의 기준으로 보면 양의 값으로 나타나며 이러한 부하의 수요 감축은 가상의 발전 자원으로 취급할 수 있다 [10]. 실제로 전력 시스템에서는 점두 부하 시 높은 한계 비용을 갖는 발전 자원을 대신하여 수요반응의 수요 감축을 통하여 계통의 안정을 도모하고 있다. 그러나 소비자의 소비 패턴의 변동성이 매우 크기 때문에 수요자원은 시스템의 신뢰도 유지에 관하여 기존의 발전 자원보다 더 큰 문제를 야기할 수 있다. 따라서 계통에 투입되는 수요자원의 신뢰성을 판단하여 신뢰성이 높은 수요 자원을 선별하여 사용해야 한다. 본 논문에서는 기존 발전기의 가용성과 비가용성을 수요반응에 적용하는 방법을 소개하고 수요감축에 관한 과거 데이터를 이용하여 수요자원의 상태천이 모델(state transition model)을 제안한다.

2.1 수요자원의 Two-state Model

일반적으로 발전기의 가용성과 비가용성은 운영 및 고장의 과거 데이터를 기준으로 전체 시간 중 운영 및 고장 시간의 비율로 정의 한다 [8-9]. 이러한 가용성과 비가용성은 발전기의 상태천이 모델에서 운영 상태와 고장 상태의 두 상태로 나타난다. 이와 유사한 방법으로 수요반응의 가용성

* Dept. Electrical Engigeering, Hanyang University, Korea
† Corresponding Author : Dept. Electrical Engigeering, Hanyang University, Korea
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
Received : March 29, 2013; Accepted : June 19, 2013

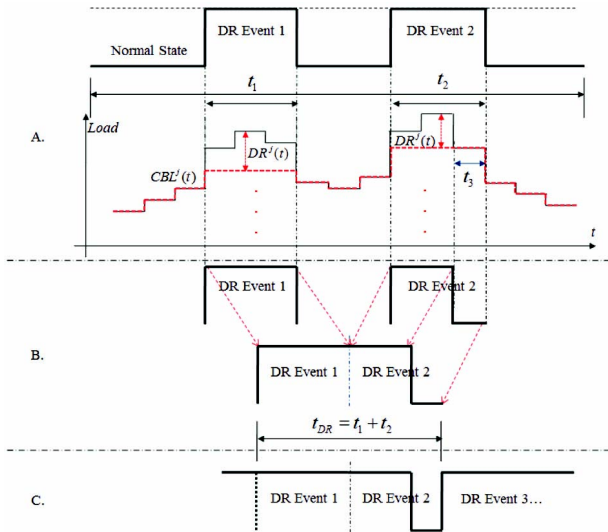


그림 1 수요자원의 가용성과 비가용성
Fig. 1 DR unavailability and availability

과 비가용성을 정의할 수 있다.

그림 1은 수요반응에 참여하는 수요자원의 가용성과 비가용성 개념을 수립하는 과정을 보여준다. 그림 1A에서 수요반응 이벤트 1과 2가 발령되었고 수요자원은 t_1 , t_2 시간 동안 수요감축을 하였다. 얇은 점선 실선은 자원의 예측 값(CBL, customer baseline load)이고 점선은 실제 계량 값이며 그 둘 사이의 차는 자원 j 의 감축량 $DR^j(t)$ 가 된다. 자원 j 는 t_1 시간 동안 모두 반응하였고 t_2 시간 동안에는 일부분만 반응하였다. 이때 감축에 성공한 부분을 '1'로 실패한 부분을 '0'으로 나타내어 두 데이터를 합치면 그림 1B와 같이 나타난다. 수요반응 이벤트 1과 2를 포함하여 모든 이벤트에 대한 자원 j 의 수요감축의 과거 자료들을 모두 수집하여 그림 1C와 같이 시간 순으로 나열한다. 수집된 수요감축에 관한 과거 자료들은 감축 성공의 운영 시간과 감축 실패의 고장 시간으로 구성되며 전체 시간 중 운영 및 고장 시간으로 수요반응의 가용성(Availability)과 비가용성(Unavailability)을 정의할 수 있다.

$$DR \text{ availability} = A^j = \frac{\sum[\text{up time}]}{\sum[\text{down time}] + \sum[\text{up time}]} \quad (1)$$

$$DR \text{ unavailability} = U^j = \frac{\sum[\text{down time}]}{\sum[\text{down time}] + \sum[\text{up time}]} \quad (2)$$

수식 (1)과 (2)의 가용성과 비가용성을 가지는 수요자원은 그림 2의 감축의 성공과 실패 두 가지 상태를 가지는 2-상태 모델(2-state model)로 나타낼 수 있다 [8]. 수요반응의 업 상태와 다운 상태는 각각 수요감축의 성공과 실패를 나타내며 이때 각 상태 간의 천이율은 식 (3)과 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\lambda^j = \frac{f_f}{t_s} \quad (3)$$

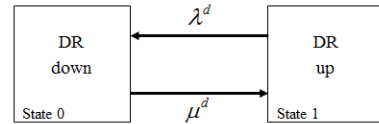


그림 2 수요반응의 2 상태 모델

Fig. 2 Two-state model of demand reduction for DR events

$$\mu^j = \frac{f_s}{t_f} \quad (4)$$

여기서 t_f 와 t_s 는 각각 수요감축 실패 시간, 성공 시간을 나타내고 f_f 와 f_s 는 각각 전체 운영 시간 중 수요감축의 실패 횟수와 성공 횟수를 나타낸다.

2.2 수요자원의 Multi-state Model

일반적으로 수요자원은 난방기구, 에어컨, 세탁기 등의 여러 개의 부하 자원으로 구성되며 수요자원의 상태천이 모델은 대부분 2 상태 모델보다 더 복잡한 형태로 나타난다. 예를 들면, 수요자원1과 2가 최소 감축량 M_0 MW의 단위로 각각 최대 감축량 $2M_0$ 과 $3M_0$ MW까지 감축할 수 있다면 이 수요자원 1, 2의 모델은 3 상태 모델과 4 상태 모델로 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림 3에서 3 상태 모델과 4 상태 모델의 수요자원은 각각 M_0 MW 단위로 0부터 최대 감축량 $2M_0$ 와 $3M_0$ 까지 감축할 수 있으며 그림의 화살표처럼 서로 다른 상태들 간의 모든 천이가 가능하다.

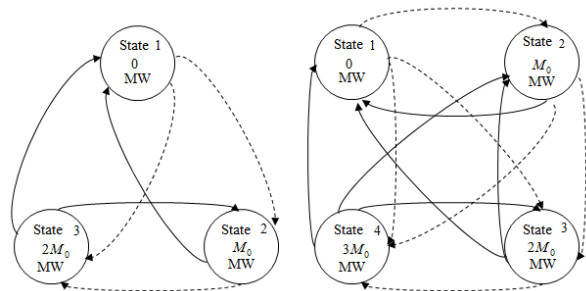


그림 3 수요반응의 신뢰도 3 상태 모델과 4 상태 모델

Fig. 3 Three- and four-state model of demand reduction for DR events

2.3 수요자원의 증감발률에 따른 Multi-state Model

주어진 시간 동안 발전기 출력의 증감은 증감발률(ramp rate)에 따라 결정되는데 이와 마찬가지로 수요자원의 부하 감축 역시 수요자원의 증감발률(DR ramp rate)에 따라 결정된다. 수요자원의 부하감축에 관한 증감발률(DR ramp rate)은 한 시간 동안 복구 또는 감축할 수 있는 가용용량의 평균값으로 정의한다. 증감발률은 수요자원의 한 시간 동안 감축할 수 있는 양의 평균값으로 감축량의 한 시간 동안의

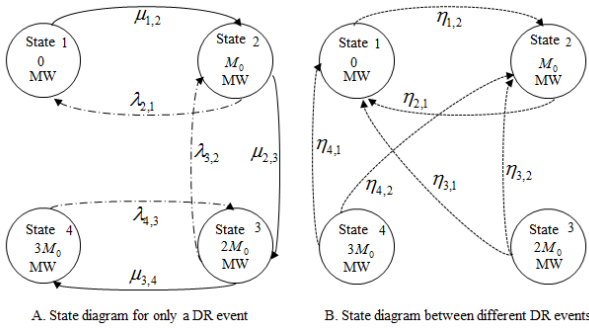


그림 4 M_0 보다 크고 $2M_0$ 작은 증감발률을 가지는 수요자원의 4 상태 모델
 Fig. 4 4-state model according to ramp rate between M_0 and $2M_0$ MW

평균값은 반드시 증감발률 보다 작아야 한다. 그림 3의 예에서 증감발률이 M_0 와 $2M_0$ 사이 값일 경우 한 시간 동안 수요감축 가용용량의 증가 또는 감소가 M_0 와 같거나 작아야 하고 다음 상태로의 천이가 인접한 상태 간의 천이만 존재하게 된다. 예를 들면 상태 2로부터 인접한 상태 1과 3으로는 천이가 가능하지만 상태 4로는 천이가 불가능하다. 이처럼 수요반응 증감발률(DR ramp rate)은 특정한 수요반응 이벤트 내에서 상태 간의 천이를 제약하는데 증감발률이 M_0 와 $2M_0$ 사이 값을 가질 때 그림 3의 모델은 그림 4A와 같은 수요반응 이벤트 내부의 다이어그램으로 나타난다. 그림 4A에서 실선은 상태 i 에서 높은 가용용량을 가지는 상태 j 로의 수리율(repair rate), 파선은 상태 i 에서 낮은 가용용량을 가지는 상태 j 로의 고장률(failure rate)을 나타낸다.

수요반응 이벤트들은 앞서 그림 1C에서 설명한 것처럼 시간 순으로 나열된다. 이때 각각의 수요반응 이벤트들은 서로 독립적이기 때문에 새로운 이벤트의 시작 시점에서 수요감축의 상태는 이전 이벤트에 어떠한 영향을 받지 않게 되고 단지 증감발률에만 영향을 받는다. 위의 예와 같이 증감발률이 M_0 와 $2M_0$ 사이 값을 가진다면 한 시간 동안의 수요감축은 0, M_0 MW만 가능하며 이는 새로운 수요반응 이벤트의 초기 상태가 상태 1과 2만을 가짐을 의미한다. 반면에 이전 이벤트의 상태는 모든 상태가 가능하므로 인접한 두 이벤트 간의 천이는 다른 모든 상태에서 상태 1과 상태 2로만 가능하다. 그림 4B는 독립적인 이벤트들 간의 다이어그램에서의 이러한 상태 천이를 보여준다. 그림 4B에서 점선은 상태 i 에서 초기 상태 j 로의 천이를 $\eta_{i,j}$ 을 나타낸다.

2.4 수요자원의 Multi-state Model의 상태 확률, 천이율 및 고장률 계산

이상의 과정들은 모든 증감발률에 대하여 일반화할 수 있다. 수요자원이 최소 감축량 M_0 , 최대 감축량 M 을 가지고 수요반응에 참여할 때 상태의 총 개수 K 와 상태 k 에서 가용용량 AC_k 을 식 (5)와 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$K = \left\lceil \frac{M}{M_0} \right\rceil + 1 \tag{5}$$

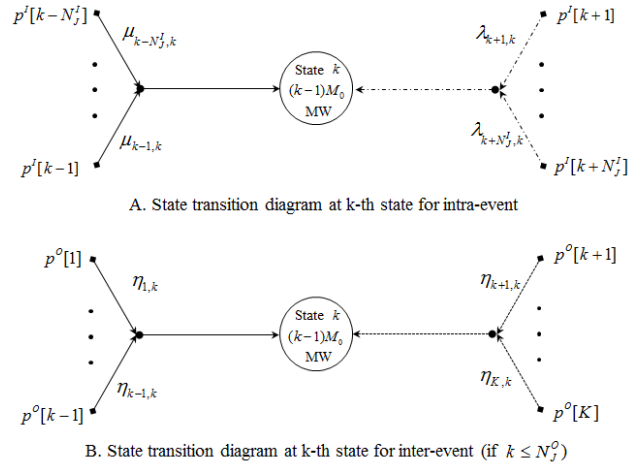


그림 5 증감발률에 따른 k 상태에서의 상태 천이 다이어그램

Fig. 5 State transition diagram at state k according to ramp rate R_j

$$AC_k = (k-1)M_0 \quad k = 1, 2, \dots, K \tag{6}$$

여기에서 $[\cdot]$ 는 뚫이다.

상태 천이 다이어그램은 각 상태에서의 증감발률 위치에 따라 결정되며 그 위치는 각 상태의 가용용량의 범위로 결정할 수 있다.

$$(j-1)M_0 < R_j < jM_0 \tag{7}$$

증감발률 R_j 는 그 위치에 따라 천이가 가능한 상태의 개수를 결정한다. 하나의 이벤트 내부에서 상태 k 로 들어오는 천이는 인접한 낮은 용량과 높은 용량의 상태로부터 각각 $N_j^I = (j-1)$ 개만큼 천이가 가능하며 이는 그림 5A의 다이어그램으로 나타난다. 서로 다른 이벤트 간에서는 상태 1부터 J 까지 N_j^O 개의 초기 상태를 가질 수 있으므로 상태 k 가 N_j^O 보다 작을 때 모든 다른 상태로부터의 천이가 가능하며 그림 5B의 다이어그램으로 나타난다.

상태 k 에 있을 확률은 그림 5의 상태 천이 다이어그램으로부터 이전 상태에서의 확률과 천이율의 곱의 모든 합으로 계산할 수 있으며, 이는 다음의 식 (8)과 (9)와 같이 나타난다 [9].

$$p_k^I = \sum_{i=k-N_j^I}^{k-1} p_i^I \mu_{i,k} + \sum_{i=k+1}^{k+N_j^I} p_i^I \lambda_{i,k} \tag{8}$$

$$p_k^O = \begin{cases} \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i^O \eta_{i,k} & \text{for } k \leq N_j^O \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{9}$$

여기서 I 와 O 는 각각 그림 6A(하나의 이벤트)와 6B(상호 이벤트 간)를 나타내는 첨자이고 p_k^I 와 p_k^O 는 그때의 상태 확률이다.

모든 k 에 대하여 수식 (8)과 (9)을 계산하면 각각 K 개의

연립 방정식을 구할 수 있고 이를 벡터로 표현하면 다음의 식 (10)과 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{p}^I = \mathbf{T}^I \cdot \mathbf{p}^I \quad (10)$$

$$\mathbf{p}^O = \mathbf{T}^O \cdot \mathbf{p}^O \quad (11)$$

여기서 \mathbf{T}^I , \mathbf{T}^O 는 각각 이벤트 내 그리고 이벤트 상호 간의 상태 천이 행렬을 나타내고 이때 $T_{i,j}^I$, $T_{i,j}^O$ 를 행렬 \mathbf{T}^I , \mathbf{T}^O 의 각 (i,j) 원소, $\mu_{j,i}$, $\lambda_{j,i}$, $\eta_{j,i}$ 를 상태 j 에서 상태 i 로의 수리율, 고장률, 천이율이라고 할 때 각 행렬의 원소는 식 (12)와 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{i,j}^I = \begin{cases} \mu_{j,i} & \text{for } 0 < i-j \leq N_J^I \\ \lambda_{j,i} & \text{for } 0 < j-i \leq N_J^I \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$T_{i,j}^O = \begin{cases} \eta_{j,i} & \text{for } 0 < i \leq N_J^O \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

그림 6과 7은 수요자원의 신뢰도 모델이 5개의 상태를 가지는 경우 상태 천이 개수(N_J^I , N_J^O)에 따른 수요반응 이벤트 내의 상태 천이 행렬 \mathbf{T}^I 와 상호 이벤트 간의 상태 천이 행렬 \mathbf{T}^O 를 구성하는 각 원소를 보여준다. 이때 각 행렬의 행과 열은 각각 ‘to state’와 ‘from state’를 나타낸다. 행렬 \mathbf{T}^I 의 대각 원소의 왼편에서 수리율 $\mu_{j,i}$ 이 오른편에서는 고장률 $\lambda_{j,i}$ 이 각각 N_J^I 만큼 나타나고 나머지 원소들은 ‘0’을 가진다. 행렬 \mathbf{T}^O 의 맨 상위 1행부터 N_J^O 행까지 대각 원소를 제외한 모든 원소가 천이율 $\eta_{j,i}$ 을 가지고 나머지 원소들은 ‘0’을 가진다.

상태 천이 행렬 \mathbf{T} 는 \mathbf{T}^I 와 \mathbf{T}^O 의 합으로 표현되며 이때 모든 상태 확률은 식 (10)과 (11)의 합으로 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{p} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{p} \quad (14)$$

모든 상태 확률의 합은 1이므로 식 (14)의 상태 천이 행렬 \mathbf{T} 의 어떤 로우벡터를 $[1,1,\dots,1]$ 로 교체하여 상태 k 에 대한 확률 p_k 을 계산할 수 있다 [9].

모든 상태 k 에서의 천이율(departure rate) d_k 는 상태 k 에서 다른 모든 상태 i 로 천이하는 모든 천이율의 합이며 따라서 식 (12)와 (13)으로부터 다음의 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다 [9].

$$\begin{aligned} d_k &= \sum_{i=1}^K T_{i,k} \\ &= \sum_{i=k-N_J^I}^{k-1} \lambda_{k,i} + \sum_{i=k+1}^{k+N_J^I} \mu_{k,i} + \sum_{i=1, i \neq k}^N \lambda_{i,k} \end{aligned} \quad (15)$$

모든 상태 k 에서의 빈도율(frequency) f_k 는 상태 확률과 천이율의 곱으로 나타나며 다음의 식 (16)과 같이 계산할 수 있다 [8].

$$f_k = p_k d_k \quad (16)$$

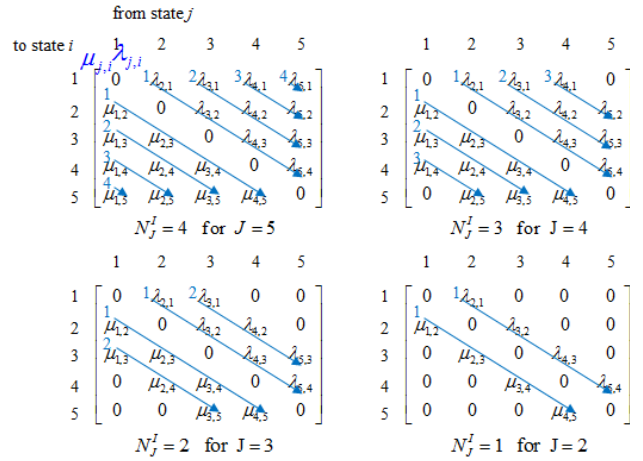


그림 6 상태 천이 개수(N_J^I)에 따른 수요반응 이벤트 내부의 상태 천이 행렬 \mathbf{T}^I

Fig. 6 State transition matrix \mathbf{T}^I according to N_J^I for intra-event

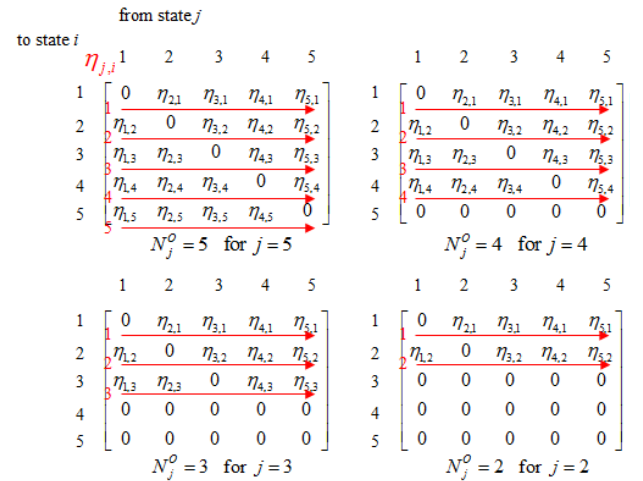


그림 7 상태 천이 개수(N_J^O)에 따른 수요반응 상호 이벤트 간의 상태 천이 행렬

Fig. 7 State transition matrix \mathbf{T}^O according to N_J^O for inter-event

3. 사례 연구

부하 모션에서 수요자원 DR_1 은 최소 0.5 MW 단위로 최대 2.0 MW까지 부하를 감축할 수 있고 천이가 가능한 상태 개수에 따라그림 8과 같은 수요감축의 과거 데이터를 가진다.

표 1은 수요자원 DR_1 의 상태 천이 모델의 수요반응 이벤트 내부의 상태 천이 행렬 \mathbf{T}^I , 서로 다른 이벤트 간의 상태 천이 행렬 \mathbf{T}^O 그리고 전체 상태 천이 행렬 \mathbf{T} 을 보여준다. 천이가 가능한 상태의 개수(N_J^I)가 증가함에 따라 \mathbf{T}^I 의 각 대각 원소의 왼편과 오른편에서 ‘0’이 아닌 원소가 증가하고 마침내 $N_J^I=4$ 가 되면 대각 원소를 제외한 모든 원소가 ‘0’

표 1 천이가 가능한 상태의 개수(N_f^I, N_f^O)에 따른 상태 천이 행렬

Table 1 Transition matrix according to N_f^I, N_f^O [f/hr]

	T^I	T^O	T
$N_2^I = 1, N_2^O = 2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.035 & 0 & 0 & 0 \\ 0.059 & 0 & 0.013 & 0 & 0 \\ 0 & 0.189 & 0 & 0.003 & 0 \\ 0 & 0 & 0.093 & 0 & 0.002 \\ 0 & 0 & 0 & 0.028 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.008 & 0.017 & 0.014 & 0.011 \\ 0.027 & 0 & 0.069 & 0.05 & 0.015 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.043 & 0.017 & 0.014 & 0.011 \\ 0.086 & 0 & 0.082 & 0.05 & 0.015 \\ 0 & 0.189 & 0 & 0.003 & 0 \\ 0 & 0 & 0.093 & 0 & 0.002 \\ 0 & 0 & 0 & 0.028 & 0 \end{pmatrix}$
$N_3^I = 2, N_3^O = 3$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.005 & 0.008 & 0 & 0 \\ 0.026 & 0 & 0.013 & 0.005 & 0 \\ 0.031 & 0.05 & 0 & 0.008 & 0.005 \\ 0 & 0.057 & 0.061 & 0 & 0.009 \\ 0 & 0 & 0.06 & 0.048 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.009 & 0.017 & 0.009 & 0.019 \\ 0.005 & 0 & 0.019 & 0.028 & 0.039 \\ 0.006 & 0.014 & 0 & 0.029 & 0.036 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.014 & 0.025 & 0.009 & 0.019 \\ 0.031 & 0 & 0.032 & 0.033 & 0.039 \\ 0.037 & 0.064 & 0 & 0.037 & 0.041 \\ 0 & 0.057 & 0.061 & 0 & 0.009 \\ 0 & 0 & 0.06 & 0.048 & 0 \end{pmatrix}$
$N_4^I = 3, N_4^O = 4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.003 & 0.011 & 0.012 & 0 \\ 0.018 & 0 & 0.011 & 0.015 & 0.007 \\ 0.021 & 0.038 & 0 & 0.015 & 0.017 \\ 0.016 & 0.027 & 0.043 & 0 & 0.008 \\ 0 & 0.022 & 0.039 & 0.069 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.007 & 0.008 & 0.013 & 0.020 \\ 0.009 & 0 & 0.014 & 0.017 & 0.025 \\ 0.005 & 0.011 & 0 & 0.017 & 0.021 \\ 0.006 & 0.008 & 0.018 & 0 & 0.032 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.010 & 0.019 & 0.025 & 0.02 \\ 0.027 & 0 & 0.025 & 0.032 & 0.032 \\ 0.026 & 0.049 & 0 & 0.032 & 0.038 \\ 0.022 & 0.035 & 0.061 & 0 & 0.04 \\ 0 & 0.022 & 0.039 & 0.069 & 0 \end{pmatrix}$
$N_5^I = 4, N_5^O = 5$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.002 & 0.006 & 0.014 & 0.010 \\ 0.012 & 0 & 0.006 & 0.011 & 0.018 \\ 0.018 & 0.013 & 0 & 0.010 & 0.018 \\ 0.009 & 0.029 & 0.029 & 0 & 0.010 \\ 0.009 & 0.028 & 0.027 & 0.058 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.009 & 0.007 & 0.009 & 0.018 \\ 0.008 & 0 & 0.009 & 0.007 & 0.031 \\ 0.004 & 0.006 & 0 & 0.007 & 0.022 \\ 0.012 & 0.007 & 0.008 & 0 & 0.025 \\ 0.004 & 0.008 & 0.006 & 0.013 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0.011 & 0.013 & 0.023 & 0.028 \\ 0.02 & 0 & 0.015 & 0.018 & 0.049 \\ 0.022 & 0.019 & 0 & 0.017 & 0.040 \\ 0.021 & 0.036 & 0.037 & 0 & 0.035 \\ 0.013 & 0.036 & 0.033 & 0.071 & 0 \end{pmatrix}$

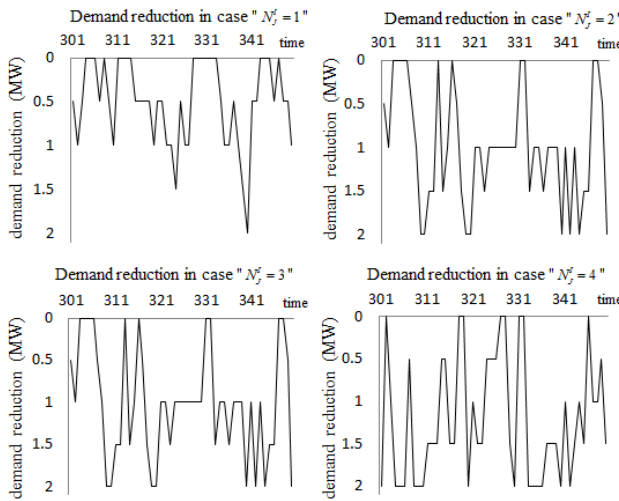


그림 8 DR_1 의 증감률(ramp rate)에 따른 수요 감축 과거 데이터

Fig. 8 DR historical data of DR_1 according to ramp rate's location

아닌 값을 가진다. T^O 는 맨 상위 1행부터 N_f^O 행까지 '0'이 아닌 원소를 가지는데 T^O 도 $N_f^O=5$ 가 되면 대각 원소를 제외한 모든 원소가 '0' 아닌 값을 가진다.

표 2는 수요자원 DR_1 의 천이가 가능한 상태의 개수에 따른 상태 확률, 천이율 및 빈도율을 나타낸다. 표 1의 상태 천이 행렬 T 의 어떤 로우벡터를 $[1,1,\dots,1]$ 로 교체하여 식 (14)의 연립방정식을 풀면 각각의 상태 확률을 계산할 수 있고, 상태 천이 행렬 T 의 컬럼(column) 벡터의 원소들을 모두 합하면 각 상태에서의 천이율을 얻을 수 있다. 이때 빈도율(frequency)은 각 상태 확률과 천이율의 곱으로 나타나며 수요반응 이벤트가 평균적으로 4 시간 지속된다고 가

정하면 각 값에 4를 곱하여 이벤트 1회당 상태 횟수로 나타낸다.

표 2 상태 확률, 천이율 [f/hr] 및 상태 빈도율 [Occ/4hr]

Table 2 State probability, departure rate and frequency

상태 번호	가용 용량	$N_2^I = 1$	$N_3^I = 2$	$N_4^I = 3$	$N_5^I = 4$
		상태 확률			
1	0 MW	0.154	0.124	0.136	0.118
2	0.5 MW	0.428	0.228	0.165	0.169
3	1.0 MW	0.271	0.311	0.243	0.141
4	1.5 MW	0.114	0.16	0.235	0.199
5	2 MW	0.033	0.177	0.221	0.373
		천이율 [f/hr]			
1	0 MW	0.086	0.068	0.075	0.076
2	0.5 MW	0.232	0.135	0.116	0.102
3	1.0 MW	0.192	0.178	0.144	0.098
4	1.5 MW	0.095	0.127	0.158	0.129
5	2 MW	0.028	0.108	0.13	0.152
		빈도율 [Occ/4hr]			
1	0 MW	0.0530	0.0337	0.0408	0.0359
2	0.5 MW	0.3972	0.1231	0.0766	0.0690
3	1.0 MW	0.2081	0.2214	0.1400	0.0553
4	1.5 MW	0.0433	0.0813	0.1485	0.1027
5	2 MW	0.0037	0.0765	0.1149	0.2268

4. 결 론

본 논문에서 소비자 행동의 불확실성을 나타내기 위하여 수요자원의 상태 천이 모델의 2 상태 모델과 다단 상태 모델을 제안하고 수요자원의 증감률을 도입하여 다단 상태 모델을 일반화하였다. 또한 상태 천이 행렬과 각각의 상태 확률, 천이율 그리고 고장률을 계산하는 방법을 제시하였다. 사례조사에서 본 논문에서 제안한 상태 천이 모델을 이용해

여 상태 전이 행렬을 계산하였고 수요자원의 상태 확률과 전이율, 전이 횟수를 계산하였다.

논문에서 제안한 수요 자원의 신뢰도 모델을 이용하여 전력 계통에 투입되는 수요자원의 신뢰성을 판단할 수 있다. 또한 이를 이용하여 높은 신뢰도를 갖는 수요 자원을 선별할 수 있고 이를 전력 계통의 가상의 발전 자원으로 활용하는 경우 계통의 신뢰도를 높일 수 있을 것이다. 따라서 향후 연구에서 가용성을 가지는 수요 자원의 모델을 적용하여 전력 계통의 신뢰도를 평가함으로써 수요반응에 따른 전력 계통의 신뢰도 효과를 평가할 수 있을 것이다.

Acknowledgment

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2010-0021733)

References

[1] M.H. Albadi, E.F. El-Saadany, "A summary of demand response in electricity markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 11, pp. 1989-1996, Nov. 2008.

[2] U.S. Department of Energy, "Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them," A report to the U.S. Congress, Feb. 2006, Available: <http://eetd.lbl.gov/ea/EMP/reports/congress-1252d.pdf>

[3] D.T. Nguyen, M. Negnevitsky, M. de Groot, "Pool-Based Demand Response Exchange - Concept and Modeling," *IEEE Trans. Power system*, vol. 26, no. 3, pp.1677-1685, Aug. 2011

[4] P. Wang, Y. Ding, Y. Xiao, "Technique to evaluate nodal reliability indices and nodal prices of restructured power systems," *IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution*, vol.152, no. 3, pp.390-396, May. 2005.

[5] L. Goel, Q. Wu, P. Wang, "Nodal price volatility reduction and reliability enhancement of restructured power systems considering demand - price elasticity," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 10, pp. 1655-1663, Oct. 2008.

[6] K. Moslehi, R. Kumar, "A reliability perspective of the Smart Grid," *IEEE Trans. On Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 57-64, June 2010.

[7] J.E. Eto, "Demand Response Spinning Reserve Demonstration," Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-62761, May 2007 Available: <http://certs.lbl.gov/pdf/62761.pdf>

[8] R. Billington, R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Power System*. 2nd ed. New York: Plenum Press, 1996.

[9] R. Billington, R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems*. 2nd ed. New York: Plenum Press, 1992.

[10] H. Kwag, J. Kim, "Optimal combined scheduling of generation and demand response with demand resource constraints," *Applied Energy*, vol. 96, pp. 161-170, Aug. 2012.

저 자 소 개



곽형근 (郭炯根)

2006년 한양대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 02-2220-0347
E-mail : venice53@hanyang.ac.kr



이 나 은 (李娜恩)

2012년 동아대 전기공학과 졸업. 현재 한양대 대학원 전기공학과 석사과정
Tel : 02-2220-0347
E-mail : lee05260@hanyang.ac.kr



김진오 (金鎭吾)

1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업 (공학박). 현재 한양대 전기공학과 정교수
Tel : 02-2220-0347
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr