

전략적 수요반응이 송전선 혼잡의 시장지배력에 미치는 영향

Demand Response Effect on Market Power with Transmission Congestion in Electricity Market

이 광 호*
(Kwang-Ho Lee)

Abstract - This paper analyzes the impact of DRA (Demand Response Aggregator) on market power when competing with power generation companies (Gencos) in the electricity market. If congestion occurs in the transmission line, the strategic choice of the power generation company increases exercise of market power. DRA's strategic reduction of power load impacts the strategy of Gencos, which in turn affects the outcome of the load reduction. As the strategy of Gencos changes according to the location of the congested transmission line, the impact on the market depends on the relative location of the congested line and the DRA.

Key Words : Demand response, Market power, Transmission congestion, Electricity market, Cournot, Nash equilibrium

1. 서 론

전력시장에서 발전사에 대한 시장지배력 평가는 시장 전반의 효율성을 확보하는데 매우 중요한 항목이다. 시장지배력의 개념은 경제학에서 시작된 것이지만 전력계통에서의 특수성 때문에 전력시장에 적합한 평가지수를 개발하려는 노력이 꾸준히 지속되어 왔다[1]. 특히 송전망에서 혼잡현상이 발생하면 발생 위치에 따라서 전력의 경제가치 차별화가 나타난다. 즉 발전력의 시장가격에 대한 영향이 심화되기 때문에 시장지배력에 대한 평가지수에 혼잡현상은 반드시 반영되어야 한다[1,2].

최근 전력시장에 수요반응(DR)을 도입하는 노력이 국내외에서 활발히 진행 중이다. 수요반응은 적절한 보상을 대가로 부하전력의 감축을 유도하고 이를 통해 과도한 발전력 공급에 따른 막대한 비용을 절약하는 제도이다[3]. 수요반응 부하를 충분히 확보하고 개량과 통신 등의 기술적 지원을 하는 수요관리사업자(DRA)가 중개 역할을 함으로써 전력시장과 연동되는 DR의 기대 효과가 높아질 것으로 예상된다[4].

DRA가 각 노드에서 부하감축에 개입을 하면 모션별 시장가격에 영향을 주게 되고 이로 인해 발전사들의 시장지배력도 변하게 된다. 따라서 DR까지 반영된 시장지배력 평가지수의 개발이 필요해진다[5]. 본 연구에서는 혼잡이 발생하는 송전선의 위치와 DRA가 작용하는 모션의 상관관계에 따라 시장지배력의 변화와 감축현상의 영향을 분석한다.

시장지배력에 대한 일반적인 방법으로 HHI 지수가 사용된다. 이는 단순히 공급자의 시장점유율만을 이용하는 것으로 전력시장에 적용하기에는 문제가 있다. 전력시장에 적합한 평가지수로 RSI(residual supply index), TCMPI (transmission-constrained market power index), TCNF(transmission-constrained network) 등이 연구되고 있다[5~7]. 이러한 지수들은 송전선 혼잡현상을 기반으로 정의되면서도 내쉬균형에 대한 고찰이 미흡한 측면이 있다.

Y.Y. Lee 등의 연구[6, 7]에서 공급경쟁을 Cournot 모형으로 정의하여 균형상태에서의 발전력 변수에 대한 시장가격의 변화율을 유도함으로써 시장가격을 가격상승(mark-up) 성분과 한계비용 성분으로 유도한 바 있다. 하지만 혼잡현상이 발생하는 경우 내쉬균형은 복합전략(mixed strategy)으로 나타날 수 있기 때문에 확률기반의 복합전략에 대한 분석이 동반되지 못한 점은 지적의 대상이 된다.

수요반응이 전력시장에 미치는 영향에 대해서도 많은 연구가 발표된 바 있다[8~10]. 수요관리사업자의 역할을 전략적인 선택 변수로 모형화하는 형태가 주를 이룬다. 본 연구에서는 DRA의 선택에 따라 수요함수가 변하는 형태로 정의를 하고 이를 전력시장에서 발전회사의 전략적 발전력 선택문제와 결합하는 통합모형을 제시한다. 기존의 Cournot 경쟁모형과 DRA의 입찰변수를 통한 이득극대화 문제를 게임의 문제로 다루는 것이다. 통합된 문제에 대해 내쉬균형상태를 계산하기 위해 송전선 혼잡현상에서의 복합전략 특성을 활용하여 DRA까지 참여하는 균형상태 계산을 시도한다. 사례의 결과분석을 통해 혼잡현상이 발생하는 송전선의 위치와 시장지배력을 사용하는 발전사의 관계, 그리고 DRA의 전략이 시장지배력에 미치는 영향, 혼잡선로가 부하감축에 미치는 영향 등을 분석하고 몇가지 특징을 제시한다.

* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Dankook University, Korea.
E-mail: mania49d@dankook.ac.kr

Received : Jun 19, 2017; Accepted : November 23, 2017

2. 수요반응과 전력시장

2.1 수요관리사업자

수요반응의 효과를 높이기 위해서는 부하측의 참여의지가 있어야 하고 이를 위한 적절한 금전적 보상이 제시되어야 한다. 또한 부하감축에 대한 정량적 근거를 위해서 정확한 계량도 전제되어야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 수요관리사업자(DRA)가 필요하다. 시장운영자와 부하의 중간 역할을 DRA가 수행하는 것이다.

시장운영자(MO)는 공급자와 수요자 사이에서 실시간으로 전력 자원을 효율적으로 배분하는 역할을 한다. 본 연구에서 설정한 DRA와 MO의 상관관계를 나타내면 그림1과 같다. 본 연구에서 발전사는 Cournot 모형으로 다루지기 때문에 그림과 같이 발전사가 전략적으로 선택한 발전량을 MO에 제시한다. 부하전력은 DRA를 통해 수요반응에 참여하는 부하(A)와 참여하지 않는 부하(B)로 구분한다. 부하 B에 대한 수요함수(DF)는 MO의 가격설정 에 직접 활용되지만 부하A에 대해서는 중간자 DRA의 선택(δ)에 따라 변형된 수요함수(DF')가 사용된다.

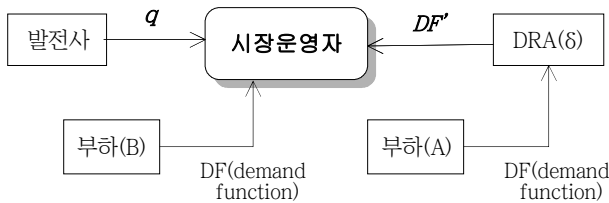


그림 1 수요관리사업자와 시장운영자 관계도
Fig. 1 Relation of Market Operator and DRA

DR 참여부하와 DRA 사이에는 적절한 인센티브 계약이 있으며 DRA는 DR 참여부하의 확보를 위한 인센티브의 강화와 자신의 이득극대화를 추구한다. 목적 달성을 위해서 DRA는 부하A의 수요함수를 효과적으로 변형하여 MO에 제시한다. MO는 발전력과 수요함수들을 대상으로 송전선의 혼잡현상을 고려하여 사회적 후생(Social Welfare) 극대화를 수행하여 모선별 가격정보와 감축량 등을 계산한다.

2.2 DRA와 수요함수

DRA의 효과적인 목적 달성을 위한 DR 참여 부하의 수요함수 변형은 다음 식 (1)과 같이 정의한다. 감축량 파라미터(δ)를 사용하여 원래 수요함수의 절편을 변화시키는 모형이다.

$$p(\delta) = \alpha - \gamma \cdot \delta - \beta \cdot d_i \quad (1)$$

식에서 α, β는 수요함수에서의 절편값과 1차항 계수이고 d_i는 노드 i에서의 부하전력이다. δ는 DRA가 선택하는 감축 입찰량으로서 DRA의 보수(payoff) 극대화를 위한 파라미터로 작용한다.

따라서 실제로 적용되는 부하A의 수요함수의 절편은 α - γδ가 된다. 감축량이 증가할수록 수요함수에서의 기울기는 변함이 없고 높이만 낮아지는 모형이다.

DRA에게 주어지는 DR 보상액을 설정하는 방법에는 다양한 견해와 주장이 있을 수 있다. 본 논문에서는 인센티브와 감축비용을 포함하여 DRA의 보수함수를 다음과 같이 정의한다.

$$\pi_i = \{p_{i0}d_{i0} - p_i(\delta)d_i(\delta)\} - 1/2 c_d \{d_{i0} - d_i(\delta)\}^2 \quad (2)$$

여기서 p_{i0}, d_{i0}는 부하감축을 하지 않을 때의 노드 i에서의 모 선가격과 부하전력이고, p_i(δ), d_i(δ)는 DRA의 입찰량 delta에 따라 변화된 가격과 부하전력을 의미한다. 따라서 모선 i에서의 부하감축량은 Δd_i = d_{i0} - d_i(δ) 로 정의된다.

DRA 이득식 (2)에서 첫 번째 항은 부하감축 이전에 부하측에서 지불해야 하는 금액(p_{i0}d_{i0})과 부하감축에 따라 감소된 지불금액(p_id_i)의 차이를 나타낸다. 두 번째 항은 감축부하량(Δd_i)을 제공한 것으로 부하감축에 따라 수요반응 소비자에게 지불해야 하는 인센티브 등의 비용을 나타낸다. 따라서 식 (2)는 DRA에게 지불되는 금액에서 비용을 제외한 이득의 의미를 갖는다.

2.3 DRA의 전략적 선택

DRA가 전략적으로 입찰 파라미터 δ를 결정하여 MO에 제시하면 그림 1에서와 같이 MO는 발전사의 전략변수인 발전량을 고려하여 시장가격과 감축량 등을 결정한다. 따라서 DRA와 발전사는 경쟁의 관계로 볼 수 있으며 DRA는 자신의 이득을 위해 발전량을 포함한 시장 전반의 상황을 반영하여 전략적 선택을 해야 한다. 식 (2)에서의 이득값을 극대화하는 조건은 한계수익과 한계비용이 같을 때이다. 이는 이득식을 전략변수 δ로 미분한 ∂π/∂δ = 0에 해당된다. 최적조건을 정리하면 다음 식 (3)과 같다.

$$p_i = c_d(d_{i0} - d_i) + (\beta_i - s_i)d_i \quad (3)$$

$$p_i = MC_i - (\partial p_i / \partial q_i)q_i \quad (4)$$

식 (3)에서 p_i는 노드 i에서의 시장가격, 우변의 첫째항은 감축의 한계비용에 해당된다. 두 번째 항에서의 s_i는 부하전력 d_i에 대한 민감도로서 구체적 정의는 4장에서 다시 소개한다. 우변항은 한계비용과 시장가격의 차이에 해당되며 이는 발전사 Cournot 모형에서의 최적조건과 비교된다.

Cournot 모형 최적조건을 나타내면 식 (4)와 같으며 MC 는 발전한계비용이다. 따라서 여기서도 두 번째 항은 가격인상 (mark-up) 성분으로 작용하며 문헌 [7]에서 시장지배력 평가지수로 활용되기도 한다. DRA의 최적조건 식 (3)과 발전사의 최적 조건 식 (4)의 유사성을 알 수가 있다. 시장운영자의 사회적 후생 극대화 문제와 더불어 발전사 및 DRA의 전략적 선택인 식 (3)과 (4)가 동시에 계산됨으로써 내쉬균형이 구해진다. 이를 활용하여 DRA가 경쟁에 참여함으로써 인한 기존 연구에 미치는 영향을 해석할 수 있는 것이다.

송전선 혼잡시의 부하감축과 모선 가격의 변화에 대한 연구 [9]가 발표된 바 있으나 경쟁모형이 완전경쟁에 국한되어 있어서 발전사의 전략이 포함되지 않은 점과 내쉬균형에 대한 분석이 부족하다. 본 연구에서는 혼잡현상 시의 복합전략 내쉬균형에 근거하여 DRA의 작용이 발전사의 시장지배력 행사와 부하감축에 미치는 영향을 분석한다.

3. 혼잡현상과 시장지배력

3.1 Cournot 내쉬균형

발전사의 경쟁을 Cournot 모형으로 수식화하면 다음 식 (5), (6)과 같다. 발전력을 전략변수로 삼아 자신의 이득을 극대화하는 선택을 하는 문제로서 b_i 와 m_i 는 발전 한계비용함수의 계수이고 α_i , β_i 는 노드 i 에서의 수요함수이다.

$$\max_{q_i} \pi_i = p_i q_i - (b_i q_i + 0.5 m_i q_i^2) \quad (5)$$

$$\text{s.t. } p_i = \alpha_i - \beta_i d_i \quad (6)$$

노드 i 에서의 시장가격을 결정하는 부하전력 d_i 는 다음 식 (7)~(9)와 같이 시장운영자의 사회적후생 극대화에 의해 계산된다. 식 (7)에서 B 는 각 수요함수에서의 면적에 해당되는 편익 (Benefit)으로서 Cournot 모형에서는 사회적후생과 같은 개념으로 사용된다[13].

$$\max_{d_j} B(d) = \sum_{j \in D} (\alpha_j d_j - 0.5 \beta_j d_j^2) \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i \in G} q_i - \sum_{j \in D} d_j = 0 \quad (8)$$

$$T_l \leq T_{l, \max} \quad \forall l \in L \quad (9)$$

여기서 식 (8)은 전력 수급조건이며 식 (9)는 송전선의 한계용량 조건이다. 최적화 결과 식 (9)에서 구속(binding)이 나타나면 송전선 혼잡현상이 발생한 것이다.

MO의 최적조건과 각 발전사들의 최적조건을 동시에 모두 만족하는 해(solution)가 내쉬균형에 해당된다. 발전기의 한계비용함수와 부하의 수요함수가 1차 함수로 주어지고 별도의 제약조건이 추가되지 않으면 내쉬균형 전략은 유일한(unique) 단순(pure) 전략으로 나타난다[13]. 하지만 식 (9)와 같은 송전선 제약조건에서 혼잡현상이 발생하면 내쉬균형은 복합(mixed) 전략으로 나타난다[12].

3.2 복합전략 내쉬균형의 특징

단순전략은 균형상태에서 참여자가 한 개의 전략을 선택하는 것이고, 복합전략이란 복수개의 전략을 확률적 가치치로 선택하는 것이다. 즉 혼잡현상이 발생하는 경우 모든 발전 참여자가 단일한 발전량을 선택하는 내쉬균형 상태는 존재하지 않을 수 있

다. 이 경우 적어도 어느 한 참여자의 전략은 복합전략으로 나타나고 이를 계산하기 위해서는 어느 전략을 어떤 확률값으로 선택하는지에 대해서도 계산되어야 한다. 관련된 구체적 내용[11,12]을 소개하는 대신에 간단한 사례를 통해 복합전략의 특징에 대해 살펴본다. 다음 그림 2는 사례대상 계통이다[11].

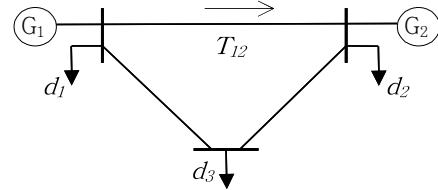


그림 2 3모선 사례계통

Fig. 2 Sample System of 3 buses

송전선 T_{12} 에서의 최대용량이 15MW일 때 내쉬균형을 계산하면 T_{12} 에서 혼잡현상이 나타나고 이때의 발전사 전략은 각각 $q_1=60.2$ 이고 q_2 는 [56.1, 46.3]의 전략을 [0.49, 0.51]의 확률로 선택하는 것이다.

이 사례와 관련해서 기존 연구[11,12]의 주장을 정리하면 다음과 같다. 단순전략을 선택하는 G_1 을 일반 참여자라 하고, 복합전략을 선택한 G_2 를 주참여자(key player)라고 부른다. 여러 경쟁자 중에서 혼잡선로의 수전단에 가깝게 위치한 참여자가 주참여자 역할을 한다. 주참여자는 시장지배력을 사용하기에 가장 유리한 위치에 있음을 의미한다. 그리고 주참여자는 두 개의 전략을 선택하는데, 큰 값의 전략은 혼잡현상을 발생시키지 않으며 작은 값의 전략은 혼잡을 발생시킨다. 또한 두 전략 선택에 대한 기대이득(expected payoff)은 동일하다.

3.3 혼잡현상에서의 시장지배력

송전선 혼잡시의 내쉬균형 특성을 그림 2의 계통에 적용하면 구체적인 시장상황과 시장지배력 현상을 알 수 있다. 혼잡선로의 수전단인 모선2에 위치하는 G_2 가 주참여자에 해당되어 2가지 전략을 사용하고 나머지 G_1 은 단일 선택을 바꾸지 않는다.

G_2 가 56.1을 선택할 때는 T_{12} 에서의 조류가 13.74로서 한계용량 이하이고 이때의 시장가격은 전체 노드에서 51.9로 균일하다. G_2 가 46.3을 선택하면 T_{12} 의 조류는 15.0으로 한계용량과 일치하며 이 때의 모선별 가격은 $p_1=52.31$, $p_2=54.32$, $p_3=53.65$ 로 차이가 난다. G_2 가 위치한 곳의 모선가격이 가장 높게 나타난다.

주참여자 G_2 는 혼잡과 비혼잡 현상을 전략적으로 유발시키면서 시장가격에 영향을 주는 시장지배력을 행사하고 있다. 만약 사례에서 확률 [0.49, 0.51]의 선택이 변경되면 일반 참여자 G_1 의 기대이득이 변하기 때문에 그들의 선택도 달라지며 균형상태는 깨지게 된다. 따라서 복합전략에서 주참여자의 선택확률은 내쉬균형에서 빠져서는 안되는 요소이다. 선택확률은 혼잡과 비혼잡 현상의 기대이득이 동일하다는 조건을 사용하여 계산된다.

송전선 혼잡시 Cournot 모형에서의 이러한 계산은 복합전략시에 균형상태에서 참여자들의 전략을 분석하여 얻어진 경험적 가

설[11,12]에 의해 이뤄진 것이다. 해법의 이론적 근거가 충분히 제시된 것은 아니지만 계산 결과에 대해 각 참여자들의 기대이득 분포를 분석해 보면 내쉬균형의 조건에 부합함을 확인할 수가 있다.

4. 수요관리사업자의 내쉬균형 전략

4.1 수요관리사업자가 포함된 쿠르노 모형

발전력 도매시장에 DRA가 참여하면 반대 개념의 발전력 (NegaWatt)으로 발전사들과 경쟁을 하게 된다. 부하감축을 수단으로 하기 때문에 DRA의 수익 구조가 발전사와 다르며 이득을 식 (2)와 같이 정의한 경우 전략적 선택(6)이 수요함수의 절편 형태이기 때문에 기존의 Cournot 모형에 그대로 대입해서는 균형상태가 구해지지 않는다.

앞의 2.3에서 DRA의 최적조건 식 (3)과 Cournot 모형에서의 발전력 최적조건 식 (4)가 유사한 형태임을 도출하였다. 식 (3)에 포함된 민감도 항의 의미를 해석하고 통합된 내쉬균형 조건식을 도출하기 위해 그림2와 같은 사례계통을 활용한다. 발전참여자 2인에 DRA 1인을 추가하여 3인의 경쟁 모형을 가정하며 구체적인 수치 데이터와 해석결과는 5장 사례연구에서 설명한다.

부하에서의 수요함수를 2차함수로 가정하면 시장운영자의 최적화 문제인 식 (7)~(9)의 최적조건은 다음 식 (10)과 같이 선형 식으로 정리된다.

$$M_c [d_1 d_2 d_3 \lambda \mu]^t = y(\alpha_i, q_i, \delta_i) \tag{10}$$

식 (10)은 수요의 편익(benefit)을 부하전력 d_1, d_2, d_3 로 미분한 식과 수급조건식, 그리고 혼잡선로에서의 송전조류식을 정리한 것이다. 좌변의 M_c 는 m_i, β_i 등으로 이뤄진 상수 행렬이고 우변에서의 y 는 발전사의 q_i , DRA의 δ_i 로 이뤄진 파라미터 벡터이다. 여기에 발전사의 최적선택식 (4)와 DRA의 최적선택식 (3)이 결합되어 동시에 계산함으로써 내쉬균형이 도출된다. 앞의 식 (3)에 포함된 민감도 s_i 는 DRA의 선택 δ_i 에 따른 부하전력 d_i 의 변화율에 관련된 개념이며 $-\gamma_i / (\partial d_i / \partial \delta_i)$ 로 정의되고 식 (10)으로부터 계산된다. 여기서 γ 는 식 (1)에서의 그것과 같은 것이다.

실제로 송전선 혼잡이 발생하여 내쉬균형이 복합전략으로 존재하면 MO의 최적화는 식 (10)과 같이 간단하게 나타나지 않는다. 앞의 3.2에서 설명했듯이 주참여자가 선택하는 두 종류(혼잡 전략, 비혼잡전략)의 값에 따라서 비혼잡시의 식 (10)과 혼잡시의 식 (10)으로 구분이 되며 두 식이 확률적으로 결합되면서 동시에 풀어야 하는 것이다[12].

4.2 위치에 따른 DRA의 영향

부하감축이 발생하면 제한한 모형에 의해 수요함수의 절편이 낮아지고 이는 시장에 수요 및 가격하락을 유발한다. 반면 송전선에서의 혼잡현상이 나타나면 공급자의 시장지배력이 증가하여

가격인상을 유발한다. 특히 수전단에 위치한 공급자는 혼잡과 비혼잡 2개의 선택을 전략적으로 선택하게 되어 시장 해석을 어렵게 만든다.

이와 같이 DRA 영향과 송전선 혼잡현상은 서로 상반되는 효과를 보인다. 혼잡이 발생한 선로의 송전단과 수전단에서의 위치에 따라 공급자 전략이 차이를 보이기 때문에 DRA의 영향도 그 위치에 따라 시장에 미치는 영향이 다를 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 DRA가 송전단에 있을 때, 수전단에 있을 때, 그리고 양단에 각각 위치할 때의 경우로 구분하여 발전 참여자들의 전략선택이 어떻게 달라지는지, 시장가격에는 어떤 영향을 미치는지를 분석한다.

또한 혼잡현상 하에서 시장지배력을 행사하는 발전사의 전략적 선택이 DRA에게도 영향을 미쳐서 부하감축의 결과도 달라질 수 있다. 이러한 상호간의 영향을 사례분석을 통해 소개한다.

5. 사례 연구

5.1 시장 및 계통 조건

사례연구의 대상계통은 앞서 그림2와 같이 발전 참여자 2인과 3개 모선에서의 수요함수가 위치하는 것이다. 송전선의 손실은 없고 리액티브는 모두 동일한 것으로 가정한다. DRA 및 시장관련 데이터는 표 1과 같다.

표 1 시장관련 데이터

Table 1 Market Data of supply and demand functions

	모선 1	모선 2	모선 3
한계연료비 함수(q)	10+0.2 q ₁	20+0.4 q ₂	-
수요함수(d)	70-1.0 d ₁	80-0.8 d ₂	100-0.5 d ₃

상호간의 영향을 분석하기 전에 부하감축과 송전선 혼잡 각각의 결과를 살펴본다. 우선 DRA가 참여하지 않는 경우를 계산한다. 송전선 T_{12} 의 한계용량을 35로 가정한다. 이 때의 발전사 쿠르노 균형 전략을 계산하면 다음과 같다.

표 2 발전사만의 균형전략 (DRA 불포함)

Table 2 Cournot Nash Equilibrium w/o DRA

	q ₁	q ₂	d ₁	d ₂	d ₃
비혼잡	81	55.13(0.778)	14.97	89.95	31.26
혼잡		45.23(0.222)	14.17	83.4	28.67

연구 [11,12]의 주장대로 선로 T_{12} 의 수전단에 위치한 G_2 가 복합전략을 선택한다. 77.8%의 확률로 비혼잡 전략을 선택하고 22.2% 확률로 혼잡전략을 선택한다. 반면 송전단에 위치한 G_1 은 81MW의 선택을 그대로 유지한다. 시장가격은 비혼잡 전략의 경우 전 모선에서 55.03으로 균일하고, 혼잡이 발생한 경우는 모선

별로 각각 55.83, 58.3, 57.07로 차이를 보인다. 비혼잡과 혼잡의 확률로 가중치를 삼아 계산하면 전체 발전력은 134MW이고 모선 가격은 55.7 (모선3 기준)이다. 이는 DRA가 작용할 때의 결과와 시장의 효율성을 비교할 때 기준으로 사용된다.

이번에는 발전사의 전략적 선택없이 DRA 간의 경쟁만 존재할 때에도 송전선 혼잡시에 복합전략이 나타나는지를 알아본다. DRA 참여자 2인을 모선1과 모선2에 위치하는 것으로 가정하고 발전사는 완전경쟁을 하는 것으로 가정한다. DRA의 보수 식 (2)에 포함되는 초기값으로 완전경쟁시의 결과인 $p_0=40$, $d_{10}=30$, $d_{20}=120$ 값이 사용된다. 또한 부하감축 식 (1)에서 $\gamma=0.3$, 식 (2)에서 $c_d=4$ 값을 가정한다.

표 3 DRA 2인 경쟁 내쉬균형

Table 3 Nash Equilibrium of Two DRAs' Competition

	q_1	q_2	δ_1	δ_2	d_1	d_2	d_3
혼잡	99.44	71.89	62.0	5.87	21.5	98.97	50.85

결과에서 보듯이 DRA 만의 경쟁으로는 복합전략이 나타나지 않고 혼잡현상만이 발생하게 된다. 이는 참여자의 선택변수와 보수(payoff)와의 관계식이 발전사의 그것과 서로 다르기 때문이다. 발전사의 경우 시장가격이 높아질수록 이득은 증가하는 반면 DRA의 경우 식 (2)에서와 같이 시장가격이 낮아질수록 감축의 효과를 크게 인정받아 보상금액이 증가한다. 이러한 차이로 인해 복합전략 발생과 시장지배력 행사에 서로 다른 특성을 나타내는 것으로 해석된다. 다음은 DRA와 발전사가 동시에 경쟁하는 경우를 살펴본다.

5.2 송전단에 위치한 DRA

발전참여자가 2인이 전략적으로 발전력을 선택하는 모형은 표2와 같은 내쉬균형으로 나타난다. 여기에 추가로 모선 1에 DRA가 위치하여 전략적으로 부하감축을 하면 발전사의 선택은 어떻게 변할 것인가? 또한 DRA의 부하감축에는 어떠한 변화가 나타날까? 이 경우는 3인의 경쟁 모형에 해당되며 추구하는 이득의 특성이 다르기 때문에 내쉬균형 조건식은 좀 더 복잡한 형태를 띤다. 송전선의 한계값을 35로 가정하고 3인 경쟁의 내쉬균형을 계산하면 다음과 같다.

표 4 송전단 DRA 위치시의 내쉬균형

Table 4 NE for DRA at Sending End on Congested Line

	q_1	q_2	δ	d_1	d_2	d_3
비혼잡	67.23	55.13(0.566)	45.9	1.21	89.95	31.26
혼잡		45.23(0.434)		0.4	83.4	28.67

DRA의 초기값은 발전사가 전략적으로 참가하는 표2의 결과를 근거로 $p_0=55.7$, $d_{10}=15$ 사용되고 γ , c_d 는 표3에서와 동일한 값을 사용한 것이다.

결과를 보면 수전단의 주참여자가 G_2 의 시장지배력은 여전히 유지되고 있음을 알 수 있다. 혼잡과 비혼잡 상태를 적절히 이용하는 복합전략을 나타내며 선택값(q_2)은 DRA가 참여하지 않을 때와 동일한 값(표3)이다. 다만 선택확률은 변화가 있고 이로 인해 일반 참여자 G_1 의 선택은 변경된다. 송전단에 위치한 DRA의 부하감축 파라미터는 $\delta=45.9$ 로서 단순전략을 나타낸다.

부하측의 상태를 보면 모선2, 3에서의 부하전력에는 변화가 없고 DRA가 위치한 모선1에서만 13~14 정도의 부하감축이 발생했음을 알 수 있다. 송전단에 DRA의 참가로 송전단의 발전력과 부하전력만 크게 변화한 것이다. 부하감축으로 DRA의 보수가 증가하고 발전력의 감소로 발전사 G_1 의 이득은 감소한다.

여기서 주목할 부분은 DRA의 참여가 시장지배력의 억제에는 영향을 주지 못한다는 것이다. 또한 모선 1에서의 수요함수 식 (1)에서 δ 가 증가하고 d_1 이 감소하여 모선 1에서의 시장가격은 변하지 않는다는 점이다. 비혼잡과 혼잡의 확률로 가중치를 삼아 계산하면 모선가격은 55.9(모선3 기준)로서 DRA 참여 이전과 변화가 거의 나타나지 않는다.

5.3 수전단에 위치한 DRA

DRA가 송전단에 위치할 때 시장에 미치는 영향에 대해 살펴보고 이번에는 동일한 조건에서 DRA를 수전단에 위치시킬 때의 결과를 분석한다. 시장조건과 DRA의 파라미터들은 앞에서와 동일하고 DRA 초기값은 $d_{20}=90$ 으로 표2에서의 결과를 적용한다. 내쉬균형을 계산하면 표5와 같다.

표 5 수전단 DRA 위치시의 내쉬균형

Table 5 NE for DRA at Receiving End on Congested Line

	q_1	q_2	δ	d_1	d_2	d_3
비혼잡	87.6	44.28	55.95	21.87	70.17	39.84

결과에 따르면 3인의 참여자 모두 단순전략을 선택하게 되고 송전선에서의 조류는 23.87로서 혼잡현상은 발생하지 않는다. 표2와 비교할때 부하감축이 이뤄진 모선2에서의 부하전력은 크게 감소한 반면 나머지 부하는 소폭 증가한다. 부하감축 파라미터는 약 56으로 수전단에 위치할 때의 46보다 크게 늘어난 것이다. 발전전력 또한 G_2 의 전력이 감소하고 G_1 의 전력은 증가한다. 이 때의 시장가격은 48.13으로 전체 모선에서 균일하다. DRA가 없을 때의 시장가격인 55.7, 송전단에 DRA가 있을 때의 55.9에 비해 크게 감소한 것이다. 이는 시장지배력이 크게 억제된 것으로 해석할 수 있다. G_2 이득은 1323.2 -> 853.5로 크게 감소한다.

DRA가 수전단에 위치하면 반드시 내쉬균형이 단순전략으로 나타나는 것인가? 이를 분석하기 위해 DRA의 파라미터를 변경하여 균형상태 계산을 시도한다. DRA의 보수를 나타내는 식 (2)에서 파라미터 c_d 는 부하감축에 따른 비용의 계수이다. 이 값이 클수록 부하감축에 보수적이고 작을수록 공격적으로 과감한 부하감축을 한다는 의미이다. 표 3과 표 5에서는 $c_d=4.0$ 의 값을 사용하였는데 이를 8.0으로 증가시키면 균형상태는 다음과 같이 복합전

표 6 보수적 DRA의 수전단 위치시 내쉬균형

Table 6 NE for Passive DRA at Receiving End

	q_1	q_2	δ	d_1	d_2	d_3
비혼잡		47.2(0.978)		20.0	79.2	37.5
혼잡	89.46	38.7(0.022)	34.6	19.3	73.6	35.3

략으로 나타난다.

균형상태에서의 시장가격은 50.05로서 DRA가 적극적 상태인 표 6의 48.13 보다 높은 값이다. 또한 전체 발전력은 136.5로서 DRA가 없는 표 3에서의 134.0 보다 높은 값이다. 따라서 시장가격면에서 볼 때 수전단에 위치하면서 부하감축에 대한 적극성이 떨어질수록 시장지배력의 억제력도 감소함을 알 수 있다. 또한 DRA가 없을 때보다 전체 발전력이 오히려 증가하는 것으로 보아 DRA의 적극성이 약할 때는 반대 현상이 발생할 수도 있음을 알 수 있다.

5.4 양단에 위치

이러한 사례를 종합하면 송전선 혼잡현상이 존재할 때 DRA의 위치가 혼잡선로의 송전단인지 수전단인지에 따라 부하감축 현상과 시장지배력 억제 효과에 미치는 영향이 상반되게 나타남을 알 수 있다. 즉, 송전단에 위치하면 부하감축 현상이 시장지배력 억제 보다 강하고, 수전단에 위치하면 부하감축효과 보다는 시장지배력억제 현상이 강하게 나타난다.

이번에는 2개의 DRA가 혼잡선로 양단에 위치할 때 부하감축과 시장지배력억제 현상에 어떤 영향을 주는지를 분석한다. 동일한 조건의 DRA 2인이 모선 1, 2에 각각 위치할 때 4인 게임의 내쉬균형을 계산하면 결과는 다음과 같다.

표 7 수전/송전단 DRA 위치시의 내쉬균형

Table 7 NE for Two DRAs at Both Ends on Congested Line

	q_1	q_{12}	δ_1	δ_2	d_1	d_2	d_3
비혼잡		40.5(0.933)			3.29	70.0	42.9
혼잡	75.7	33.2(0.067)	70.0	64.3	2.69	65.2	41.0

결과표에 의하면 참여자 3인 G_1 , DRA_1 , DRA_2 는 단순전략을 택하고 수전단의 G_2 는 복합전략을 선택한다. 균형상태에서의 발전력 합은 115.7로서 표 2의 134에 비해 크게 낮고, 시장가격도 45.8로서 표 2의 55.7, 표 5의 55.9보다 크게 낮아진다. DR의 입찰량과 모선1, 2에서의 부하전력을 볼 때, 모선1의 DRA_1 은 주로 부하감축에 기여했고 모선2의 DRA_2 는 시장가격 인하를 통해 시장지배력 억제에 기여한 것으로 분석된다.

표 8에서의 내쉬균형에 대한 검증의 의미로 각 참여자의 이득 변화 곡선을 나타내면 그림 3과 같다. 균형상태에서 나머지 3인의 선택은 그대로 두고 자신의 선택을 변화시킬 때의 이득(보수)을 표시한 그래프이다. 균형상태인 표7에서의 값을 택할 때가 가장 큰 이득임을 알 수 있고 이는 내쉬균형의 정의에 부합하는 것이다.

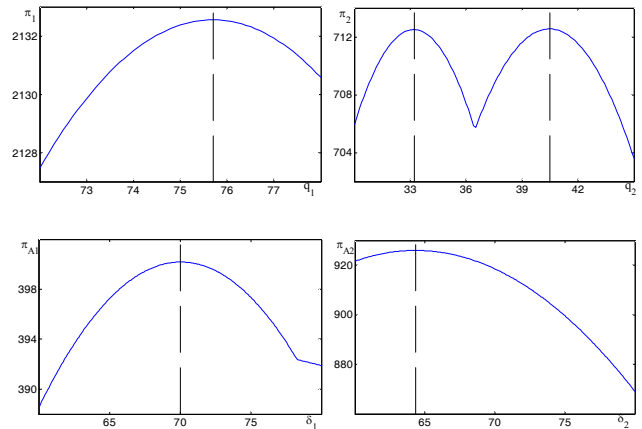


그림 3 참여자 4인의 이득분포 곡선

Fig. 3 Marginal Profits of 4-Players at NE

6. 결 론

송전선에 혼잡현상이 발생하면 모선별 시장가격이 차별화되고 이는 가격상승과 시장지배력의 유발로 이어진다. 부하감축을 합리적으로 시장에 도입하려는 수요반응이 이러한 시장지배력을 억제하는데 어떻게 작용하는지를 분석하기 위한 연구이다.

경쟁적 전력시장에서 혼잡현상은 내쉬균형 상태에서 분석해야 하는데 송전선 혼잡시 균형상태가 복합전략으로 나타나서 계산에 어려움이 따른다. 여기에 수요관리사업자(DRA)가 발전력 시장에 참여하여 발전사와 대등하게 경쟁하는 모형을 다루기 때문에 균형상태에 대한 해를 계산하는 것이 중요하게 작용한다.

본 연구에서는 혼잡선로와 발전참여자의 위치관계를 이용하는 경험적 해법으로 수요관리사업자와 발전사간의 경쟁게임 모형을 해석한다. DRA가 혼잡선로의 어느쪽에 위치하는가에 따라 발전사의 전략적 선택을 변화시키고 또한 감축부하량과 시장지배력 억제에 미치는 영향이 크게 차이를 확인하였다.

사례연구를 통하여 DRA가 송전단에 위치하면 부하감축에 큰 영향을 주고 수전단에 위치하면 시장지배력억제에 큰 영향을 주는 것으로 분석되었고 양쪽에 위치하면 부하감축과 시장지배력 억제에 모두 효과가 있음도 알게 되었다. 본 연구결과는 향후 수요반응 제도를 활성화할 때, 시장지배력의 평가지수를 연구할 때 활용될 것으로 기대된다.

References

[1] P.Wang, Y.Xiao, Y.Ding, "Nodal Market Power Assessment in Electricity Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 19, No. 3, pp. 1373-1379, August 2004.

[2] Y.Sheffrin, J.Chen, B.F.Hobbs, "Watching Watts to Prevent Abuse of Power," *IEEE Power & Energy Magazine*, pp. 58-65, July/August 2004.

- [3] R. Aazami, K. Aflali, M. R. Haghifam, "A Demand Response Based Solution for LMP Management in Power Market," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, pp. 1125-1132, Feb. 2011.
- [4] E. Nekouei, T. Alpcan, and D. Chattopadhyay, "Game-Theoretic Frameworks for Demand Response in Electricity Markets," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, March 2015.
- [5] S. Bose, C. Wu, Y. Xu, A. Wierman, H. Mohsenian-Rad, "A Unifying Market Power Measure for Deregulated Transmission-Constrained Electricity Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 30, No. 5, pp. 2338-2348, Sep. 2015.
- [6] L. Xu and R. Baldick, "Transmission-constrained residual demand derivative in electricity markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1563-1573, Nov. 2007.
- [7] Y. Y. Lee, R. Baldick, and J. Hur, "Firm-based measurements of market power in transmission-constrained electricity markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 1962 - 1970, Nov. 2011.
- [8] R. Aazami, K. Aflali, M. R. Haghifam, "A Demand Response Based Solution for LMP Management in Power Market," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, pp. 1125-1132, Feb. 2011.
- [9] D. Yang and Y. Chen, "Demand response and market performance in power economics," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1~6, 2009.
- [10] D. T. Nguyen, M. Negnevitsky, M. Groot, "Pool- Based Demand Response Exchange-Concept and Modeling," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 26, No. 3, pp. 1677-1684, August 2011.
- [11] K. H. Lee, "Solving Mixed Strategy Nash-Cournot Equilibria under Generation and Transmission Constraints in Electricity Market," *Journal of Electrical Engineering Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 675-685, 2013.
- [12] K. H. Lee, "Solving Mixed Strategy Equilibria of Multi-Player Games with a Transmission Congestion," *Transaction of KIEE*, Vol. 55A, No. 11, pp. 492-497, Nov. 2006.
- [13] Roy Gardner, *Games for Business and Economics*, John Wiley & Sons, Inc. 2003.

저 자 소 개



이 광 호 (Kwang-Ho, Lee)

1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업.
 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
 1995년 전력연구원위촉연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수.
 1996~현재 단국대 전자전기공학부 교수
 Tel : 031-8005-3604
 E-mail : mania49d@dankook.ac.kr