

에너지 제약을 고려한 전력시장 시뮬레이션

허진\* 강동주 이정호 문영환  
한국전기연구원

Electricity Market Simulation considering Energy Constraints

Hur Jin\* Kang Dong-Joo Lee Jeong-Ho Moon Young-Hwan  
KERI

**Abstract** - With the deregulation of the power industries in many countries, the trend is towards accommodating more freedom and choice to the market participants and encouraging competition as much as possible in the power market. In this regards, the necessity of market simulation is increasing in order to guarantee a secure and reliable operation of an electricity market. This paper presents the technique of market simulation considering constraints such as energy resource and transmission interface using commercial market simulator.

1. 서론

최근 국내에서는 도매전력시장(TWBP)의 도입이 진행됨에 따라 이를 위한 시장설계 및 효율적인 시장운영을 위한 다양한 검토 작업들이 이루어지고 있다. 특히 시장설계의 경우, 해외 자문회사와의 협력을 통해 경쟁적 전력시장을 이미 도입하여 운영하고 있는 해외 국가들의 사례들을 포함한 많은 시장운영 기법들이 검토되고 있으며 우리나라에서 목표로 하는 TWBP 전력시장에 적합한 방안들을 준비하여 이에 대한 안들이 제안되고 있는데 여기에는 TWBP 전력시장에 적용될 전력시장운영규칙 또한 포함되어 있다. 전력을 전력시장운영규칙이 정하는 바에 따라 전력시장을 통해서만 거래하도록 규정하고 있는 우리나라의 경우, 전력시장운영규칙은 전력시장과 전력계통의 운영에 대한 모든 것을 다루게 되는 만큼 이에 대한 합리적인 설계와 적용은 효율적인 TWBP 전력시장의 기본 틀이라고 할 수 있다.[1] 이러한 환경적 변화에 적응하도록 전력시장 해석기법 분석과 다양한 전력시장 해석기술 경험이 필요하다. 하지만 현재 구조 개편의 환경에서의 전력시장에 대한 이론적 분석은 많이 수행되어 왔지만 전력시장 시뮬레이션 기술은 아직 초보적인 단계이며 기본적으로 시뮬레이션을 위한 프로그램(Market Simulator)이 해외에 비해 부족한 실정이다.

본 논문에서는 전력시장 시뮬레이션을 수행하기 위해 전력시장의 기본적인 기술을 설명하고 전력시장 모델링, 입력데이터의 구성 그리고 시나리오(Scenario)에 따른 시뮬레이션을 구성하여 시뮬레이션 기법과 개념을 제시하고자 한다. 전력시장 시뮬레이션은 기존에 많이 수행되어온 전력계통 시뮬레이션과 매우 유사하지만 시장(Market)의 개념이 도입에 따라 경제학적인 개념도 반영이 되어야 한다. 물론 시장시뮬레이션도 계통의 안정적 운영을 기반으로 수행되어야 한다. 전력시장 시뮬레이션은 시장모델링이 선행되어야 하고 이에 따른 데이터 입력 및 구성이 매우 중요하다. 본 논문에서는 에너지 제약조건 하에서의 전력시장 시뮬레이션을 고려한다. 에너지 제약조건은 수력(Hydro) 자원의 경우를 살펴보고 모든 시장모형(3-node topography)을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 제시된 시장 모형에서

송전선로의 제약조건(transmission interface)을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 에너지 제약조건을 고려한 시장 시뮬레이션을 위해 상용 시장시뮬레이터인 PLEXOS(호주, DA사)[2]를 이용하여 하였다. 본 연구를 통하여 기본적인 시장시뮬레이션 기술을 확보하고 축적하여 국내 전력시장 모의에 기초를 갖고자 한다. 또한 본 연구원은 국내시장규칙에 적합한 고유의 시장시뮬레이터를 개발 중에 있으며 이러한 다양한 시뮬레이션 기술과 경험은 시뮬레이터 개발에 밑거름이 될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 전력시장 시뮬레이션

전력시장 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 우선적으로 전력시장(Electricity Market)을 모델링 하여야 한다. 시장 모델링은 입력데이터로 표현할 수 있으며 입력데이터를 구성할 때 특히 발전기 모델링이 정확히 정의되어야 한다. 본 절에서는 시장 모델링의 방법과 발전원별 모델링 기법 중에서 대표적인 화력과 수력 리소스(resource)를 중심으로 설명하고 전력시장 시뮬레이션을 위한 입출력 데이터를 정의한다.

2.1 시장 모델링

기본적으로 전력시장 모델링은 각 계통의 구성 요소를 객체(Object)와 클래스(Class)로 분류하여 나타낸다. 시장 모델링 개념을 설명하기 위해 그림 1에서 간단한 전력시장 모형을 고려하고 전력시장 모형에 따른 객체와 클래스의 구조를 나타내었다. 그림 1의 경우 지역 1, 2로 구분되어있고 각 지역은 발전기, 부하 그리고 송전선로로 구성되어 있다.

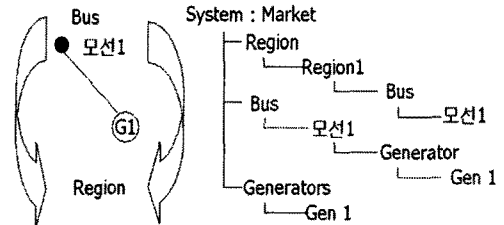
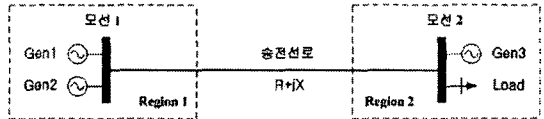


그림 1. 전력시장 모형 및 객체와 클래스 구조

객체와 클래스 구조에 따라 지역, 모선, 발전기, 부하 그리고 송전선로가 객체로 설정된다. 각각의 해당 객체는 클래스를 이용하여 표현이 된다. 즉 지역 1의 객체에 발전기 Gen1과 Gen2 그리고 지역 2의 경우에는 발전

기 Gen3와 부하 클래스가 구성되어 객체를 형성하고 구성된 객체를 이용하여 전력시장 모형을 나타낼 수 있다. 이와 같이 객체와 클래스의 정의를 통해 정확한 입력 파라미터를 정의하고 전력시장 데이터베이스(DB)를 작성할 수 있다.

### 2.1.1 발전기 모델링

전력시장을 모의하기 위해 발전기 모델링에 따라 입력 데이터를 구성해야 한다. 본 논문의 시장모형에서는 화력과 수력 리소스를 적용하였고 본 절에서는 화력과 수력에 대한 발전기 모델링을 간략히 살펴본다.[3] 화력 리소스를 모델링 할 경우에는 발전비용함수를 고려해야 한다. 발전비용함수(G\_Cost)는 다음 식 1과 같이 정의한다.

$$G\_Cost = FP \times HR + VOMC \quad (1)$$

단, G\_Cost = Generation Cost(won/MWh)

FP = Fuel Price(won/GJ)

HR = Heat Rate(GJ/MWh)

VOMC=Variable Operation and Maintenance Cost

식 1의 정의에 따라 FP, HR, VOMC 파라미터를 이용하여 화력 발전기를 모델링 할 수 있다. Heat Rate의 의미는 화력 발전기 모델링의 경우 입력되는 파라미터로 MW의 전력생산을 위해 소모되는 연료량을 의미한다. 수력(Hydro) 리소스를 이용하여 발전기 모델을 구현할 경우에는 발전기(Generator), 저장소(Storage), 수로(Waterway) 객체를 이용하여 모델링 할 수 있다. 간단한 모델로 표현할 경우에는 저장소, 수로 객체는 고려하지 않고 발전기의 Unit 수, 최대 용량의 기본적인 데이터 집합으로 표현하고 수력발전기 운영에 따른 제약조건(GWh의 용량 제약)을 추가한다. 이외에도 원자력, 양수 그리고 복합화력 등의 모델링은 리소스 별 특징에 따라 입력데이터를 구성하여 모델링을 수행할 수 있다.

### 2.2 입출력 데이터 분석

각 해당 클래스는 입력데이터를 속성(property)으로 갖는다. 발전기에 해당하는 기본적인 입력데이터는 표 1과 같다. 표 1에서 제시한 입력데이터는 전력시장을 모의하기 위한 최소한의 데이터 집합(Dataset)을 나타낸다. 표 1에서 제시한 입력파라미터 이외에도 증감발발, 발전비용 파라미터 등이 적용될 수 있다.

표 1. 전력시장 모의를 위한 입력데이터

시장 구성 객체	속성(Property)
발전기 객체	발전기의 Unit 수
	최대 출력 용량
	전력공급자의 입찰용량(MW)
부하 객체	전력공급자의 입찰가격
	수요예측데이터
	전력구매자의 입찰용량(MW)
송전선로 객체	전력구매자의 입찰가격
	조류의 최대/최소
	송전선로 임피던스

### 3. 시장모형의 구성

수력 리소스에 따른 에너지 제약과 송전선로의 제약조건을 고려한 시장 시뮬레이션을 위해 그림 2와 같은 시장 모형을 구성하였다. 그림 2의 시장 모형은 3개의 모션으로 구성되어 있다. 모션 1의 경우 Gen\_11과 Gen\_12의 발전기로 구성되어 있고 구성된 발전기는 각각 Oil과 Gas를 주 에너지 원으로 사용하는 것으로 가정하였다.

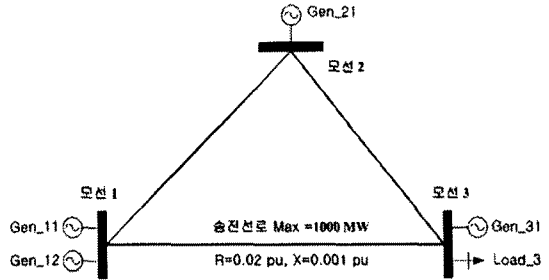


그림 2. 3개 모션으로 구성된 시장 모형

Gen\_11의 경우 최대 출력 용량(Max Capacity)을 600 MW, 최소 출력 용량을 300 MW으로 가정하고 세부적인 입력데이터를 그림 3에 나타내었다. Gen\_12의 경우 최대 출력 용량을 300 MW, 최소 출력 용량을 100 MW으로 가정하고 Heat Rate의 값을 7 GJ/MWh 그리고 Gas의 연료단가를 5 \$/GJ로 설정하였다. 모션 2의 경우 수력발전기 Gen\_22가 연결되어 있고 최대 출력 용량은 500 MW로 가정하였다.

Property	Band	Value	Units
Offer Quantity	1	300	MW
Offer Quantity	2	300	MW
Offer Price	1	0	\$/MWh
Offer Price	2	15	\$/MWh
Units	1	1	-
Max Capacity	1	600	MW
Min Stable Level	1	300	MW
Start Cost	1	30000	\$/start
Heat Rate	1	10	GJ/MWh
Max Ramp Down	1	1	MW/min.
Max Ramp Up	1	1	MW/min.
Forced Outage Prob	1	10	%
Mean Time to Repair	1	2	hrs

그림 3. Gen\_11의 입력 파라미터

모션 3은 기준 모션에 해당한다. 기준모션에 Gen\_31이 연결되어 있고 최대 출력 용량을 200 MW, 최소 출력 용량을 50 MW으로 가정하였다. Heat Rate 값은 12 GJ/MWh로 설정하였으며 Diesel을 연료로 하고 연료 비용은 7 \$/GJ로 가정하였다. 송전선로의 레지스턴스(R)와 리액턴스(X)는 0.01 pu와 0.002 pu로 가정하였다. 또한 모션 3에 연결된 부하데이터는 그림 4와 같이 형태의 부하 패턴을 가정하였다. 상용 시장 시뮬레이터인 PLEXOS의 경우 부하 입력 데이터는 CSV 형태 또는 텍스트 파일 형식으로 시뮬레이터에 입력된다.

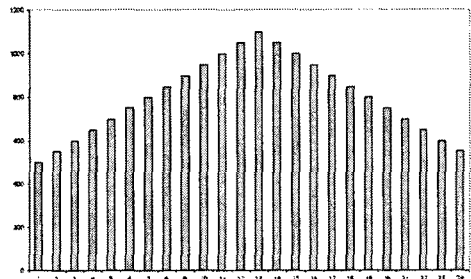


그림 4. 모션 3에 연결된 부하 특성

### 4. 시나리오에 따른 시뮬레이션

본 절에서는 제시된 시장 모형을 이용하여 에너지 제약과 선로제약을 이용한 시나리오를 이용하여 시뮬레이

선을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 각 모션에서의 가격을 살펴보고 가격 결정되었을 때 각 발전기의 출력량을 나타내었다.

#### 4.1 에너지 제약을 고려한 시뮬레이션

본 절에서 사용하는 시나리오는 에너지 제약에 의한 시뮬레이션이다. 에너지 제약의 의미는 수력 리소스를 사용하는 발전기 Gen\_21에 에너지 제약을 부여하였다. 에너지 제약을 고려하기 위해 Gen\_21의 수력 리소스에 수력자원 모델링을 위해 일일 최대 에너지 용량과 발전기 용량의 비율을 고려한 Max Capacity Factor(MCF)를 설정하였다. MCF의 값은 일일 최대 에너지 용량을 8 GWh/day로 가정하였을 경우  $0.67(8000/(500 \times 24))$ 에 해당한다. 에너지 제약을 고려한 시나리오에서는 송전선로 제약을 고려하지 않는다. 수력 리소스의 에너지 제약을 이용하여 모션별 가격(nodal pricing) 시뮬레이션을 수행하였고 3개의 모션별 가격을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 피크(peak) 부하를 담당하는 모션 3의 가격이 가장 높음을 알 수 있다.

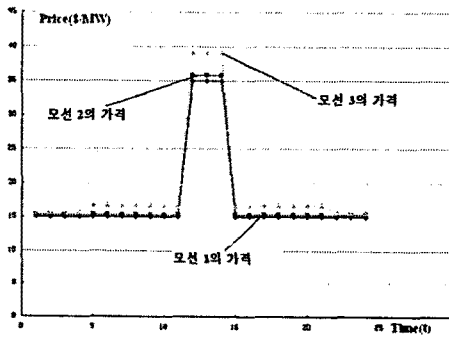


그림 5. 에너지 제약을 고려한 모션별 가격 산정

또한 각 모션에 연결된 발전기의 출력을 그림 6에 나타내었다. 각 발전기는 입력된 최대 및 최소 출력범위 내에서 수급조건을 만족하면서 최종 출력을 결정하게 된다. Gen\_21의 경우 수력 에너지 제약이 고려된 발전기 출력 값이다.

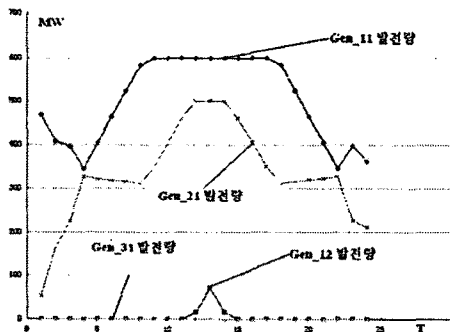


그림 6. 각 모션별 발전기 출력

#### 4.2 송전선로 제약을 고려한 시뮬레이션

3개의 모션으로 구성된 시장모형에서 모션 1과 3사이의 선로와 모션 2와 3사이의 선로에 동일하게 선로용량 제약 1000 MW를 설정하는 시나리오를 적용하였고 에너지 제약을 동시에 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 송전선로 제약을 고려한 3개의 모션별 가격을 그림 7에 나타내었다.

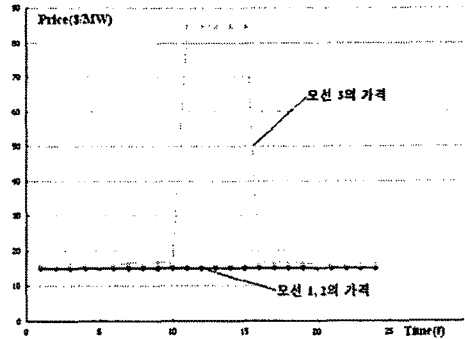


그림 7. 선로제약을 고려한 모션별 가격 산정

송전선로 제약에 따라 그림 5와 비교해 보면 모션 3의 가격이 많이 상승했음을 알 수 있다. 또한 선로제약에 따라 모션 1과 모션 2의 가격도 변동되었다. 1000 MW의 송전선로 제약에 따라 각 모션에 연결된 발전기의 출력을 그림 8에 나타내었다.

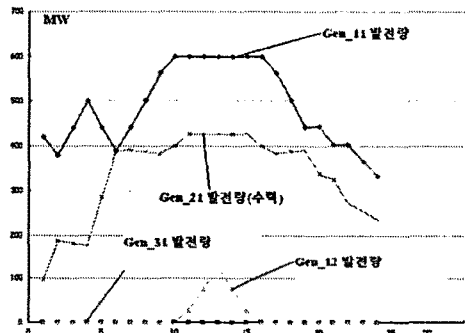


그림 8. 선로제약을 고려한 발전기 출력

### 5. 결론

본 논문에서는 에너지 제약을 고려한 전력시장 시뮬레이션을 수행하였다. 에너지 제약의 의미는 발전기의 리소스 별 모델링에 따라 수력 리소스를 모델링 할 경우 일일 최대 에너지 용량을 제약조건으로 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 송전선로 제약을 고려하여 시뮬레이션을 통해 가격 변동 특성을 살펴보았다. 본 논문에서 가장 중요하게 생각하는 점은 전력시장 시뮬레이션을 위한 개념설정과 흐름을 이해하는 것이다. 본 논문을 통하여 전력시장 시뮬레이션은 전력시장 모델링, 발전 리소스 모델링 그리고 정확한 입력데이터의 구성으로 시뮬레이션이 가능함을 살펴보고 이를 기반으로 다양한 시나리오에 대한 전력시장 시뮬레이션이 가능할 것으로 생각된다. 이러한 시뮬레이션 기술과 경험을 이용하여 현재 개발 중인 한국형 시뮬레이터 개발에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

#### [참고 문헌]

- [1] “도매경쟁전력시장(TWBP) 개선을 위한 외부전문인력 활용 용역(시장설계분야)”, 최종보고서, 한국전력거래소, 한국전력연구원, 2002
- [2] DraytonAnalytics, “PLEXOS for power system v4” Manual, 2002
- [3] 허진, 강동주, 이정호, 문영환, “전력시장 모의를 위한 발전기 모델링 기법”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 219-221, 2003