

단기시장모형 해석을 위한 전력시장가격 시뮬레이터(EMPS) 개발

허진 강동주 정해성 문영환
한국전기연구원

Development of Electricity Market Price Simulator(EMPS)
for short term electricity market

Jin Hur Dong-Joo Kang Hae-Sung Jung Young-Hwan Moon
Korea Electrotechnology Research Institute(KERI)

Abstract - As the circumstance of the traditional system is changed according to power system deregulation, the simulation tool which should reflect market code providing market operating mechanism is needed to analyze an electricity market. This paper presents the development of Electricity Market Price Simulator for short term(EMPS) that is designed to imitate the Korean electricity market. The EMPS is developed in VB.NET and is composed of three functions that consist of calculating SMP for CBP market, MCP for TWBP market and LMP for LMP-market. To evidence the features and the performance of EMPS, a small two way bidding market with 12-bus system, one way bidding market for generator competition and LMP market with 5-bus system will be presented for the electricity market simulations using EMPS.

별 한계가격을 나타내는 LMP(Locational Marginal Price)를 산정할 수 있는 기법을 구현하였다. 가격결정 기법은 해당 문제를 목적함수와 제약조건으로 정식화 하고 선형계획법(LP) 기반의 시뮬레이션을 이용하여 최적의 해를 산정하도록 개발하였다. EMPS 프로그램은 Visual Basic .NET을 개발언어로 사용하였고 입출력 데이터베이스는 마이크로소프트 액세스를 활용하였다. 시장시뮬레이션은 입력 DB로부터 시장모델링을 구성하고 다양한 시나리오에 따라 시뮬레이션을 수행하기 때문에 빠른 연산 처리를 요구하고 있다. EMPS의 경우, 닷넷 프레임워크(.NET framework)을 플랫폼으로 적용하여 정확하고 빠른 속도로 시장시뮬레이션을 수행할 수 있도록 구현하였다. EMPS 프로그램을 이용하여 발전 비용을 기준의 변동비 반영 시장모형, 양방향입찰시장 모형이 구현된 12 모션 모형 그리고 LMP 모의 분석을 위한 5모션 모형을 대상으로 가격모의 분석 시뮬레이션을 수행하여 프로그램의 유용성을 검증하였다.

1. 서 론

우리나라 전력산업은 기존의 수직적 구조에서 경쟁적 전력시장의 전환과 체계의 도입을 위해 과도기적인 변동비반영시장인 CBP(Cost Based Pool)를 운영하고 있으며, 현재 사회적, 경제적 상황에 따라 당분간 CBP 전력시장이 운영될 전망이다. 이러한 환경적 변화에 따라 기존의 전력계통을 포함한 계통운영 및 해석은 각 참여자의 이윤추구의 경제학적인 개념을 도입하여 전력시장 체계를 대상으로 다양한 시나리오에 따라 모의 분석을 수행하여야 한다. 일반적으로 시장시뮬레이션의 요소 기술은 수요와 가격예측, 기동정지계획 및 급전운영계획을 포함한 운전계획수립, 송전혼잡해석 그리고 최적의 입찰전략 수립을 위한 게이밍 분석 등으로 요약할 수 있다. 이러한 요소기술을 기반으로 시장시뮬레이션을 수행할 수 있는 툴을 시장시뮬레이터라 정의할 수 있다. 이미 구조개편이 진행된 나라에서는 시장시뮬레이터를 도입하여 자국의 시장운영 분석 및 평가에 활용하고 있다. 대표적인 해외 시장시뮬레이터로는 PLEXOS(호주), GE-MAPS, PROSYM, STEMS(이상 미국) 등이 있다. 하지만, 국내시장 모의를 위해 외국의 상용화된 프로그램을 도입할 경우에는 국내 시장모형 개발을 위한 맞춤형작업(customization)이 필수적이며 국내 시장규칙을 반영해야 하는 한계를 가지게 된다. 이러한 한계를 극복하고 정확한 국내 전력시장 모의 분석을 위해 전력시장 시뮬레이션 기법의 도입은 필수적이며 또한 국내시장 규칙에 적합한 시뮬레이션 툴의 개발은 필수적이라 할 수 있다.[1, 2]

본 논문에서는 전력시장 시뮬레이터의 여러 기능 중에서 단기시장 모형을 대상으로 시장가격을 산정하고 다양한 모의 분석을 수행할 수 있는 EMPS(Electricity Market Price Simulator for short term) 프로그램 개발하였다. EMPS에 구현된 가격결정 메카니즘은 CBP시장에서의 SMP(System Marginal Price), 양방향입찰시장을 대비한 단일가격체제(uniform price) 기반의 MCP(Marginal Clearing Price) 그리고 모션

2. 전력시장가격 산정 메카니즘

전력시장 시뮬레이션을 담당하는 시장시뮬레이터의 가장 핵심기능은 가격결정을 담당하는 것이며, EMPS는 입력된 DB를 이용하여 가격을 산정하고 결정된 가격을 이용하여 국내 정산규칙에 따라 각 시장 참여자의 수익 등 다양한 시장시뮬레이션에 대한 모의분석이 가능하다. EMPS에 구현된 시장가격결정 메카니즘은 CBP 시장에서의 SMP, 양방향입찰시장에서의 MCP 그리고 모션별 한계가격을 결정하는 LMP의 결과를 산정할 수 있다. 입력데이터의 유형 및 범위를 고려하여 EMPS에서 계산할 수 있는 가격산정 메카니즘은 크게 3가지로 구분할 수 있고 표 1에 M1, M2 그리고 M3로 분류하여 나타내었다.

표 1. EMPS에 구현된 가격산정 메카니즘

입력유형	기본 입력데이터	
	발전사업자	전력구매자
M1	공급입찰 (Offer data)	수요예측데이터 (Load Forecast Data)
M2	공급입찰 (Offer data)	구매입찰 (Bid data)
M3	발전비용 데이터 (Gen Cost Data)	수요예측데이터 (Load Forecast Data)

2.1 M1 산정기법 : MCP 및 LMP 산정

M1 방법은 발전사업자의 입찰데이터와 수요예측 데이터를 이용하여 시장가격을 결정한다. 우선 발전사업자의 경우, 다수의 발전사업자는 거래일 전에 10 대역 미만의 가격과 용량 세트를 입찰데이터로 작성하여 제출한다. 제출된 모든 발전사업자의 입찰데이터를 정렬하여 스택을 쌓고 전체적인 스택곡선을 만들게 된다. 그림 1에서 살펴보면 전력공급자의 Bidding curve에 해당하

는 곡선이 전체 입찰데이터가 누적된 스택곡선임을 알 수 있다. 수요 측면에서는 입찰데이터가 아닌 수요예측 데이터를 이용하여 교차점을 찾아 MCP를 결정하게 된다. EMPS에서 MCP를 산정하기 위해 공급곡선과 수요예측데이터를 이용하여 발전비용 최소화 목적함수와 수급조건 및 입찰데이터 등의 제약조건으로 구성된 정식화를 구성하고 최적화 시물레이션을 이용하여 최적의 해를 찾게 된다.

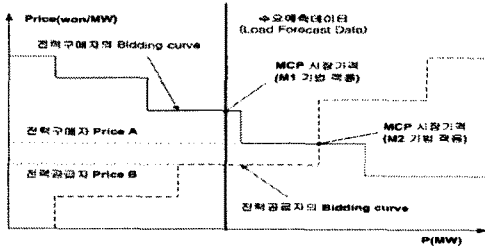


그림 1. M1 & M2의 가격결정 기법

2.2 M2 산정기법 : MCP 및 LMP 산정

M2 방법은 시장가격 MCP의 결정은 전력공급자와 전력구매자의 입찰데이터를 이용하여 산정할 수 있으며 이는 양방향입찰시장의 가격결정 방법에 해당한다. 시장 가격예측을 위한 가격결정 절차는 그림 1과 같다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 전력공급자의 입찰곡선과 전력구매자의 입찰곡선의 교차점이 시장가격 MCP로 결정된다. MCP가 결정되는 교차점에서 전력공급자와 전력구매자의 가격(cleared price)이 일치할 경우 해당 가격은 시장가격으로 결정되지만 일치하지 않는 경우도 있다. 일반적으로 일치하지 않는 경우, MCP의 결정은 전력구매자의 Price A와 전력공급자의 Price B의 평균을 계산하여 결정할 수 있다. Price A와 Price B의 값을 결정하기 위해 다음과 같이 목적함수와 제약조건으로 구성된 최적화 문제를 고려한다. MCP 결정을 위한 정식화에서 목적함수는 전력을 구매한 전력구매자의 이득에서 전력생산 비용을 뺀 값인 사회적 이득 또는 잉여 (Social welfare)의 최대화로 설정하여 산정하였다.

2.3 M3 산정기법 : SMP 산정

M3 방법은 발전사업자의 발전기 비용함수와 수요예측 데이터를 이용하여 가격을 산출할 수 있다. 일반적으로 비용함수는 2차 함수의 형태로 주어지기 때문에 EMPS에 구현된 알고리즘에서는 10개의 부분 선형화 (piecewise linear)를 이용해서 공급곡선을 형성하고 문제를 정식화한다. 발전비용에 필요한 입력데이터는 발전기 용량의 최대/최소, 열계수(Heat Rate), 연료단가(Fuel Price) 그리고 발전비용을 제외한 변동비(VO&M)를 사용한다. 이러한 입력데이터를 이용하여 모든 발전기에 대한 선형화 구간을 계산하고 발전비용(Gen_cost) 기준으로 정렬(낮은 순부터)하여 스택을 쌓은 후 수요예측 데이터와 비교하여 가격을 결정하여 SMP를 산정하게 된다.

3. EMPS 프로그램 구현

EMPS 프로그램의 구성은 입력 DB, 최적화 엔진을 포함한 시물레이션 엔진 그리고 출력 DB의 세 부분으로 구성된다. EMPS의 동작원리는 입력받은 DB를 이용하여 시장모형을 모델링하고 시장시물레이션을 위한 시나리오에 따라 시물레이션 엔진모듈이 수행된다. 시물레이션 엔진모듈이 수행 될 때는 최적화 과정은 최적화 툴(solver)을 통해서 상호 결과를 인터페이스 하게 된다. 시물레이션 결과는 출력 DB를 통하여 액세스 형태의 데이터 포맷과 사용자 기호에 맞는 그래픽 형태로 제

공되어 시장시물레이션 결과 해석을 수행할 수 있다. EMPS의 개발환경 및 기본사양을 표 2에 나타내었고 시물레이션 동작특성을 그림 2에 나타내었다.

표 2. EMPS 개발환경 및 기본사양

EMPS 프로그램	개발환경
운영환경(OS)	Window 32 bit system
입출력 DB(I/O DB)	Microsoft(MS) Access DB
최적화 프로그램 (Optimization solver)	MOSEK v3.1 (LP/MIP/DP/IP)
Operation Platform	MS .NET Framework (ver. 1.1)
개발 언어(language)	Visual Basic .NET (MS Visual Studio 7.0)

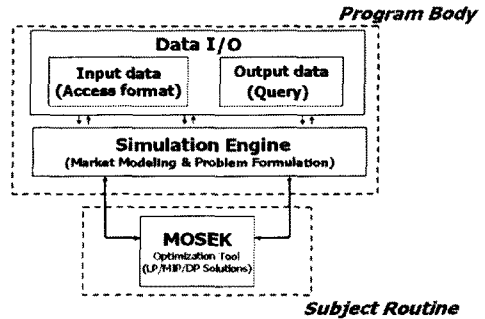


그림 2. EMPS 동작특성

단기시장모형 해석을 위한 전력시장가격 시물레이터인 EMPS의 주요 특징은 다음과 같다.

- (1) 객체 기준(Object-based modeling)의 전력시장 모델링 및 데이터 구동방식(Data-driven)
- (2) 수학적 모델링 기준의 프로그램 기법(Linearized LP model 구현) 적용
- (3) .NET Framework(v1.1) 적용을 통한 시장시물레이션의 속도 향상
- (4) 한글 입력을 포함한 시장데이터의 액세스 기반 DB 구성 및 시장모형 요약정보 제공 기능
- (5) 가격 모의를 위한 다양한 시물레이션 옵션 선택 및 데이터 스택(Stack) 곡선 분석 가능
- (6) 그래픽 툴(Chart FX .NET)을 이용한 다양한 결과 분석용어(다중 window 적용 및 그래프 제공)
- (7) CSV 포맷의 입력 파일 입력 가능 및 시물레이션 결과의 파일 저장 가능
- (8) 국내시장규칙(Market Code) 기준의 입찰데이터 구성, 가격결정 및 정산 알고리즘 적용
- (9) 전력시장 모의 해석을 위한 시각화 모형 제시(교육적 기능 제공 및 Visualization)

4. 전력시장 가격산정을 위한 시물레이션

4.1 MCP 산정을 위한 12 모션 시장모형

MCP 산정을 위해 12모션 시장모형[3]을 대상으로 8개의 발전사업자와 7개의 전력구매자가 각각의 입찰데이터를 제출하는 시나리오를 가정하여 그림 3에 12모션의 전력시장이 구현된 시각화 모형을 나타내었고 EMPS 프로그램의 전체적인 구성도 나타내었다. 그림 3의 왼쪽 화면은 입력 DB를 트리 뷰(Tree View) 형태로 입력하고 시장모형을 구성하게 된다. 또한, 오른쪽 화면은 입력데이터의 세부 내용을 Data Grid 형태로 보여주고 시물레이션 결과를 그림으로 보여주는 영역이다. 12모션의 경우 시각화 모형으로 구현하여 사용자의

교육, 훈련기능을 담당하도록 하였다. 시각적 모형에서 사용자가 해당 객체(발전기/부하/선로)의 데이터 변경을 통해 다양한 시뮬레이션이 가능하다. 그림 3의 아래 창은 최적화 및 시장시뮬레이션 과정을 사용자에게 전달하는 기능을 담당한다.

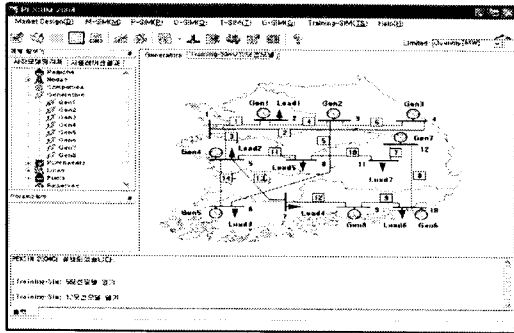


그림 3. 12 모선 모형 시뮬레이션

본 시장모형은 M2의 가격결정 기법을 이용하여 MCP를 결정하도록 되어있다. EMPS 프로그램에서는 MCP를 결정하기 위해 사회적 이득의 최대화를 목적으로 하여 제약조건을 포함한 정식화를 구성하고 최적화(LP) 솔루션에 해당하는 mosek을 호출하여 최적화 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 입력데이터를 표 3에 나타내었다.

표 3. 12 모선 입찰데이터(발전사업자/전력구매자)

Gen	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
GP1	8.14	8.08	8.34	11.35	11.38	8.36	13.41	5.39
GP2	8.58	8.46	8.81	11.66	11.71	8.88	13.78	5.65
GP3	8.93	8.81	9.25	11.97	12.02	9.32	14.09	5.87
GQ1	200	200	200	100	100	200	40	300
GQ2	300	300	300	150	150	300	80	450
GQ3	400	400	1200	400	600	400	200	500
RU	20	20	20	10	10	20	10	30
RD	20	20	20	10	10	20	10	30

Pur	Pur1	Pur2	Pur3	Pur4	Pur5	Pur6	Pur7
LP1	50	50	50	50	50	50	15.5
LP2	50	50	50	9.01	8.57	50	13
LP3	8.45	50	8.37	8.64	8.44	8.8	8.5
LQ1	200	100	200	120	130	150	50
LQ2	230	100	230	160	150	180	80
LQ3	260	100	270	280	160	220	100

EMPS의 최적화 과정을 통해서 결정된 MCP는 8.81 won/MW이고 각 발전기별 출력(급전) 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 살펴보면 한계가격이 높은 G4, G5 그리고 G7은 가격결정에 참여하지 않기 때문에 발전기 급전에서 제외되었다.

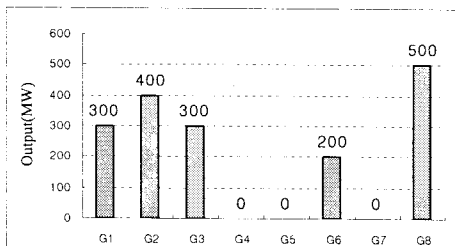


그림 4. MCP 결정을 통한 각 발전기별 출력결과

4.2 SMP 산정을 위한 CBP 시장모형

현재 국내 전력시장은 CBP 전력시장이 운영중이며 당분간 국내 여건상 CBP 전력시장이 유지될 전망이다. 이에 따라 CBP 전력시장의 효율적이고 경제적인 운영을 위해 CBP 시장에 대한 분석이 시급히 요구되고 있으며 EMPS의 경우, M3의 가격결정 기법을 이용하여 SMP를 산정하고 있다. 그림 5에 2002년 CBP 전력시장에서의 입찰발전기의 비용곡선을 선형화 한 후 스택을 쌓은 결과를 나타내고 있다.

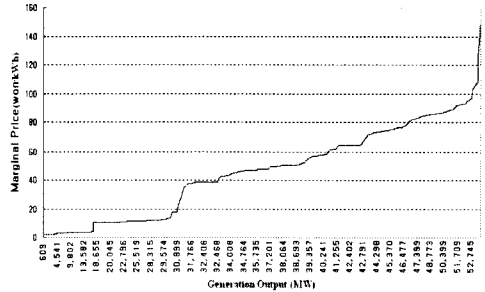


그림 5. 입찰에 참여한 발전기의 공급곡선

그림 6에 하루 동안의 수요예측데이터를 나타내고 있다. 하루 동안의 수요데이터의 변동은 35,689 MW에서 41,992 MW 범위 내에서 변동 특성을 나타내고 있다. 수요예측데이터는 EMPS 프로그램에서 CSV 파일 형태로 입력된다. 입력된 데이터를 이용하여 EMPS에서 공급곡선과 수요예측데이터를 이용하여 발전비용 최소화를 정식화로 구성한 목적함수와 계통 제약조건을 구성하여 최적의 해를 찾게 된다.

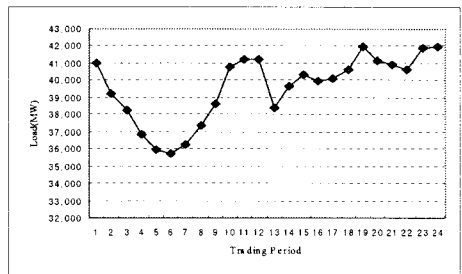


그림 6. 수요예측데이터

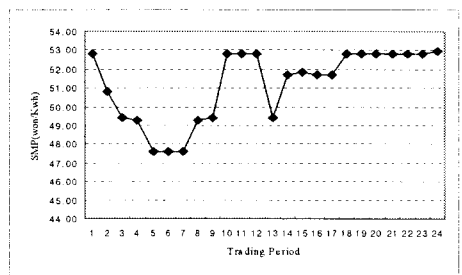


그림 7. SMP 산정 결과

그림 7에 SMP 산정결과를 나타내었다. 수요예측데이터가 1시간 단위로 24개의 변동 특성을 갖기 때문에 SMP 역시 24개의 가격이 결정되었다. 그림에서 SMP 결과를 살펴보면, 부하의 변동특성에 따라 SMP는 47.6 원/kWh에서 53.0 원/kWh의 변동 특성을 갖고 있으며 하루 동안의 SMP 평균가격은 51.2 원/kWh의

로 산정되었다. SMP 산정결과를 기준으로 다양한 시나리오를 적용하여 시장지배력 등 시장분석이 가능하다.

4.3 LMP 전력시장 모형

CBP 시장에서의 SMP 산정과 양방향입찰시장에서의 MCP 산정은 선로 계약을 고려하지 않은 비계약에서 가격결정 메카니즘을 가지고 있고 또한 국내 전력시장 규칙에 따라 단일가격 체계에 의해 가격이 결정되었다. 하지만 해외 전력시장의 경우, 모선별 한계가격인 LMP를 도입하여 운영중이며 국내 전력시장의 경우에도 향후 환경적 변화에 따라 송전제약을 고려한 모선별 한계가격에 대한 분석이 필요하다. LMP에 대한 기술적인 정의는 자발적이고 입찰을 기준으로 안전도 계약을 고려한 경제급전(security-constrained economic dispatch) 시장이며 한계발전가격을 중심으로 한 특정지역에서의 에너지 자원은 5모선 전역으로 혼잡비용 등을 결정한다. 모선별 한계비용과 선로의 잠재가격(Shadow Price) 분석을 위해 EMPS에서 LMP 기능을 추가하여 개발하였다. EMPS 프로그램에서 LMP의 기능을 분석하기 위해 그림 8과 같은 5모선 전력시장 모형을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였고 표 5에 전력시장을 구성하는 발전기, 부하, 선로계약에 대한 객체의 입력데이터를 나타내었다.

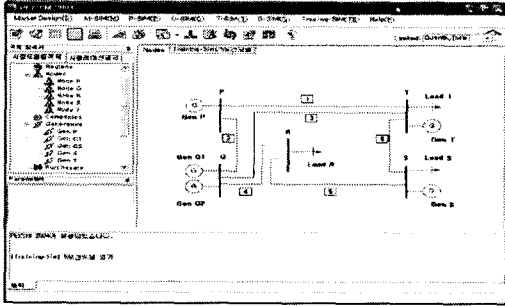


그림 8. 송전제약을 고려한 5모선 전력시장 모형

표 4. 5모선 시장모형 입력데이터

발전사업자 /부하	공급입찰가격 (won/MW)	공급입찰용량 (MW)	송전선로	계약 (MW)
Gen P	10	600	Line 1	150
Gen Q1	15	100	Line 2	425
Gen Q2	14	110	Line 3	300
Gen S	30	520	Line 4	200
Gen T	30	200	Line 5	300
Load R/S/T		233	Line 6	200

LMP 시뮬레이션을 수행하기 위해 모선 P를 기준모선(Reference Node)으로 설정하였고 EMPS 프로그램의 EMPS에서 산정한 모선별 가격을 표 6에 나타내었다.

표 5. 5모선 계통에 대한 LMP 산정결과

모선	LMP (won/MW)	선로	잠재가격 (won/MW)
P	10	Line 1	4
Q	14	Line 2	4
R	30	Line 3	0
S	30	Line 4	16
T	14	Line 5	0
		Line 6	16

표 5에서 볼 수 있듯이 모선 P가 가장 낮은 한계가격을

나타내고 있고 모선 R과 S는 가장 높은 한계가격을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 송전제약에 따른 LMP 정보를 이용하여 설비투자자에 대한 평가 및 분석을 할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 단기 전력시장 모형에 대한 시장가격을 다양하게 모의할 수 있는 시뮬레이터 EMPS의 개발을 설명하였다. EMPS 프로그램의 가장 큰 장점은 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째는 일반적으로 기존의 해외 전력시장에서의 사용되는 상용 시뮬레이터는 사용하기가 어렵고 기본적으로 모든 시장구조에 맞도록 개발되었지만 세부적으로 살펴보면 시장 모델링(입력 DB 구성)과 정산부분에 수정이 불가피하다. 하지만 EMPS의 경우, 데이터 구동방식의 시장모델링과 시뮬레이션을 수행하는 과정을 사용자 편의를 고려하여 설계를 하였고 시각적 모형 개념을 도입하여 시장참여자들이 쉽게 시장시뮬레이션에 접근하도록 설계하였다. 또한, 국내시장규칙을 기반으로 작성되었기 때문에 국내 시장분석에 용이하고 시장규칙의 변경 등에 능동적으로 대응할 수 있다. 둘째로 EMPS에 구현된 메카니즘은 모두 선형계획법(LP) 기반의 최적화 문제를 구성하여 정확한 해를 도출하도록 개발하였고 시뮬레이션 결과는 결과 트리뷰 기법을 도입하여 다양한 시장시뮬레이션 분석이 가능하도록 하였다. 또한, 방대한 양의 시장데이터, 다양한 시나리오 적용에 따른 계산속도 그리고 향후 프로그램의 확장성을 고려하여 닷넷 프레임워크를 기본 플랫폼으로 설정하여 개발하였다.

EMPS 프로그램을 기본으로 한국형 시장시뮬레이터를 개발하는 연구를 추가적으로 시행하고 있다. 현재 시뮬레이터 프레임 설계가 완료되었고 일부 모듈의 구현이 진행되고 있으며 송전혼잡을 해석하는 T-SIM, 운전계획과 관련된 O-SIM 그리고 입찰전략 수립을 위한 G-SIM 개발을 완료하여 전체적인 한국형 시장시뮬레이터 개발을 완료할 계획이다. EMPS의 개발은 기본적으로 시뮬레이터 개발에 큰 목적이 있지만 시뮬레이터 개발과 더불어 시장시뮬레이션 기술의 확보와 시장데이터베이스의 구축하는 것이 매우 중요하다. 한국형 시뮬레이터의 개발로 다양한 시장시나리오에 대한 시장모의 및 분석을 통하여 정책개발 및 시장규칙 개선에 활용할 수 있으며 시장참여자에게 입찰전략에 따른 이익증대와 교육수단으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 허진, 강동주, 국경수, 김태현, 이정호, 문영환, "한국형 Market simulator 개발(I)", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, Vol. 1, pp.108-110, 2002
- [2] 허진, 강동주, 국경수, 김태현, 이정호, 문영환, "한국형 Market simulator 개발(II)", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp.665-657, 2003
- [3] G. B. Shrestha, Song Kai and L. K. Goel, "An efficient power pool simulator for the study of competitive power market," Proceedings of the IEEE Power Engineering society winter meeting, vol.2, pp.1365-1370, 2000.