

차세대 전력거래소(KPX) 및 민간 재생에너지 입찰 시스템 구축을 위한 전략 연구 보고서: 제주 시범사업 및 전국 확대 대비 시나리오 및 제품 요구사항(PRD)

1. 서론: 에너지 전환과 전력 시장의 패러다임 변화

대한민국 전력 시장은 현재 역사적인 변곡점에 서 있다. 과거 화력 및 원자력 발전 중심의 '비용 기반 풀(CBP, Cost-Based Pool)' 시장에서, 변동성 재생에너지(VRE)의 비중 확대에 따른 '실시간 시장' 및 '이중 정산(Two-Settlement)' 체제로의 전환이 진행 중이다. 특히 제주도에서 선행적으로 시행되고 있는 **재생에너지 입찰제도**는 단순한 정책 변화가 아니라, 민간 발전사업자(IPP)와 전력중개사업자(VPP)에게 고도의 기술적 대응을 요구하는 생존의 문제로 다가오고 있다.¹

본 보고서는 이러한 시장 환경 변화에 대응하기 위해, KPX와 민간 사업자 간의 입찰 시스템 구축을 위한 포괄적인 가이드를 제공한다. 단순한 소프트웨어 개발 명세서를 넘어, 실제 운영 시나리오를 기반으로 한 타임라인 분석, 상세 제품 요구사항(PRD), 그리고 이를 시각화하기 위한 이미지 가이드를 포함하여, 시스템 개발자와 사업 전략가가 즉시 활용할 수 있는 수준의 구체성을 담았다.

특히 본 보고서는 제주 시범사업의 운영 규칙을 기반으로 하되, 향후 전국 확산을 염두에 둔 확장성 있는 아키텍처를 제안한다. 재생에너지의 간헐성(Intermittency)을 극복하고, 급전지시(Dispatch)에 능동적으로 반응하며, 정산 폐널티를 최소화하기 위한 알고리즘적 접근 방식을 심도 있게 다룬다.

2. 시장 구조 및 규제 환경 분석

입찰 시스템 설계의 선결 과제는 KPX가 제시하는 시장 규칙(Market Rules)의 완벽한 이해와 이를 로직(Logics)으로 전환하는 것이다. 시스템은 규제의 기술적 구현체여야 한다.

2.1. 하루전 시장과 실시간 시장의 이중 구조 (Two-Settlement System)

기존 전력 시장은 하루 전 예측된 수요를 바탕으로 발전 계획을 수립하고, 실제 운전과의 오차를 사후적으로 조정하는 방식이었다. 그러나 재생에너지의 급증은 하루 전 예측의 정확도를 현저히 떨어뜨렸다. 이에 KPX는 제주 시범사업을 통해 **하루전 시장(Day-Ahead Market, DAM)**과 **실시간 시장(Real-Time Market, RTM)**을 병행 운영하는 이중 정산 체계를 도입했다.¹

- 하루전 시장 (**DAM**): 거래일 하루 전(D-1)에 입찰을 마감하여, 1시간 단위로 낙찰량과 가격(SMP)이 결정된다. 이는 발전사업자에게 재무적 헛지(Hedge) 수단을 제공하는 '계약'의 성격을 가진다.
- 실시간 시장 (**RTM**): 거래 당일 실시간 수급 여건을 반영하기 위해 15분 단위로 운영된다. 재생에너지의 실제 출력 변동성을 반영하여 추가적인 낙찰이나 감발(Buy-back)이 이루어지며, 이는 실시간 가격으로 정산된다.¹

시스템적 함의: 개발될 입찰 시스템은 두 개의 서로 다른 타임라인(D-1일 10:00 마감, 당일 매 15분 마감)을 동시에 관리해야 하며, 하루전 낙찰량과 실시간 예측량 사이의 델타(Δ)를 계산하여 최적의 입찰 전략을 자동 수립해야 한다.

2.2. 급전가능 재생에너지(**Dispatchable Renewable Energy**)의 요건

시스템의 주 사용자는 '급전가능 재생에너지'를 보유한 민간 사업자이다. KPX 규정에 따르면, 단독 설비 용량 3MW 초과 또는 VPP 모집 용량 1MW 초과 자원은 급전가능 자원으로 등록하여 입찰에 참여해야 한다.¹

- **기술적 제약:** 급전가능 자원은 단순히 전기를 생산하는 것을 넘어, KPX의 급전 지시(Set Point)에 따라 출력을 제어할 수 있어야 한다. 이는 입찰 시스템이 발전소 현장의 RTU(Remote Terminal Unit) 및 SCADA와 양방향 통신이 가능해야 함을 의미한다.
- **데이터 전송:** 20MW 초과 설비는 4초 주기, 그 외는 1분 주기로 실시간 데이터를 KPX에 전송해야 하며, 이는 입찰 시스템의 데이터 수집 레이어(Data Ingestion Layer) 성능에 직접적인 요구사항이 된다.¹

3. 입찰 프로세스 운영 시나리오 및 타임라인

사용자의 요구사항을 반영하여, 가상의 VPP 사업자가 입찰 시스템을 활용하여 하루를 운영하는 시나리오를 타임라인별로 재구성하였다. 이 시나리오는 시스템의 UX(User Experience) 설계의 기초가 된다.

【시나리오 배경】

- 운영자: (주)솔라원드 VPP 관제실
- 자산: 제주도 내 태양광 20MW, 풍력 10MW (총 30MW 급전가능 자원)
- 상황: 거래일(D-Day) 오후 14:00~15:00 구간에 급격한 기상 악화가 예보되어 발전량 급락이 우려됨.

3.1. 09:00 - 전략 수립 및 하루전 입찰 (**Strategic Phase**)

09:00:00 - 기상 데이터 수집 및 예측

입찰 시스템의 'AI 예측 모듈'이 기상청 및 민간 기상 정보 제공사의 API를 호출하여 내일(D-Day)의 시간대별 일사량과 풍속 데이터를 수집한다. 머신러닝 모델은 내일 14시에 풍력 발전량이 평소의 40% 수준으로 떨어질 것을 예측한다.

09:30:00 - 입찰 곡선(Bid Curve) 생성

시스템은 예측된 발전량을 바탕으로 10개의 입찰 구간(Segment)을 자동 생성한다.

- **1~3구간 (저가):** 확실시되는 발전량(Base Load). 가격을 0원 또는 매우 낮게 설정하여 우선 낙찰을 유도한다 (Price Taker).
- **4~7구간 (중가):** 변동 가능성이 있는 발전량. 한계비용(Marginal Cost)을 고려하여 SMP 예상치 주변으로 가격을 설정한다.
- **8~10구간 (고가):** 발전 가능성이 희박하지만, 만약 생산된다면 높은 수익을 얻기 위한 구간. 상한가격(Bid Cap)에 근접하게 설정한다.¹
- **검증 로직 작동:** 시스템 내부의 '유효성 검사기(Validator)'가 입찰 가격의 단조 증가(Monotonicity) 여부와 용량의 누적 증가 여부를 확인한다.¹

09:50:00 - 하루전 입찰서 제출

운영자는 시스템이 생성한 전략을 최종 승인한다. 시스템은 KPX의 e-Power Market API 서버로 XML 형태의 입찰서를 전송한다. 이때 공인인증서(NPKI/GPKI) 기반의 전자서명이 패킷에 포함된다.³

18:00:00 - 하루전 시장 낙찰 결과 수신

KPX로부터 하루전 발전계획(Day-Ahead Schedule)이 수신된다. 14시 구간에 대해 15MW가 낙찰되었다. 이는 내일 14시에 최소 15MW를 공급해야 한다는 재무적 의무가 확정되었음을 의미한다.

3.2. 12:45 - 실시간 시장 대응 (Operational Phase)

12:45:00 - 실시간 재예측 및 입찰 수정 (T-75분)

14:00 거래 시간에 대한 실시간 입찰 마감 75분 전이다. 최신 위성 영상을 분석한 결과, 기상 악화가 예상보다 심각하여 14시 발전량이 10MW에 그칠 것으로 재예측되었다. 하루전 계약량(15MW)보다 5MW가 부족한 상황이다.

12:50:00 - 실시간 입찰서 제출

시스템은 '임밸런스 페널티(Imbalance Penalty)'를 피하기 위해, 실시간 입찰량을 10MW로 하향 조정하여 제출한다.

- 정산 메커니즘: 하루전 계약된 15MW 중 부족한 5MW는 실시간 시장 가격으로 '재구매(Buy-back)'하는 정산이 이루어진다. 만약 실시간 가격이 하루전 가격보다 높다면 손실이 발생하지만, 페널티보다는 유리하다.¹

13:45:00 - 급전 지시(Dispatch Instruction) 수신 (T-15분)

KPX의 EMS(에너지관리시스템)로부터 14:00~14:15 구간에 대한 급전 지시가 내려온다. "출력 상한 10MW 유지". 시스템은 즉시 현장 RTU에 신호를 보내 인버터의 출력 제한을 준비한다.

3.3. 14:00~15:00 - 발전 및 제어 (Execution Phase)

14:05:00 - 출력 제어 및 모니터링

실제 발전이 시작된다. 돌풍으로 인해 순간 출력이 12MW까지 튀어 오르려 한다. 시스템의 '자동 발전 제어(AGC)' 알고리즘이 4초 단위로 인버터를 제어하여 출력을 지시값인 10MW 이내로 억제한다. 이를 어길 경우 급전지시 불이행 페널티가 부과된다.⁴

14:15:00 - 계량 데이터 저장

15분 단위 거래가 종료된다. 정밀 계량기(Meter)가 측정한 발전량 데이터(MGO)가 데이터베이스에 저장되고, 동시에 KPX로 전송된다.

3.4. 10:00 - 정산 및 분석 (Settlement Phase)

10:00:00 - 정산금 확인 및 이의 신청

KPX로부터 예비 정산 명세서가 도착한다. 시스템은 자체 계산한 예상 수익과 KPX 데이터를 대조한다.

- 검증 포인트: 하루전 정산금 + 실시간 정산금 - 임밸런스 페널티.
- 수익 보전 확인: 출력 제어로 인해 발전하지 못한 기회비용(예상 이익 정산금)이 제대로 산정되었는지 확인한다.⁴ 오차가 0.1% 미만임을 확인하고 정산을 확정한다.

4. 제품 요구사항 정의서 (PRD: Product Requirements Document)

위 시나리오를 기술적으로 구현하기 위한 상세 요구사항을 정의한다. 이 PRD는 개발팀과 QA팀의 기준 문서로 활용된다.

4.1. 시스템 개요

- 제품명: RE-BMS (Renewable Energy Bidding & Management System)
- 목적: KPX 제주 시범사업 및 차기 전력 시장 규격에 맞춘 재생에너지 입찰 자동화, 실시간 관제 및 정산 관리.
- 타겟 사용자: VPP 운영자, 재생에너지 발전사업자, 전력 트레이더.

4.2. 기능적 요구사항 (Functional Requirements)

4.2.1. 자원 관리 및 등록 (Resource Management)

- ** 자원 구성 및 매핑:** 사용자는 개별 발전소(Resource ID)를 등록하고, 이를 논리적인 그룹(VPP)으로 묶을 수 있어야 한다. 1MW 초과 및 3MW 초과 자원에 대한 급전 가능 여부 속성을 관리해야 한다.¹
- ** 기술적 특성 입력:** 각 자원의 최대/최소 발전 용량, 증감발률(Ramp Rate, MW/min), 기동/정지 시간 등의 물리적 제약 조건을 입력하고 저장해야 한다. 이 데이터는 입찰서 작성 시 유효성 검증의 기준이 된다.¹

4.2.2. 입찰 자동화 (Bidding Automation)

- ** 10구간 입찰서 생성:** 예측된 발전량을 기반으로 사용자가 설정한 전략(공격적/보수적)에 따라 10개 구간의 가격(원/kWh)과 용량(MW)을 자동 생성해야 한다.
 - 제약 조건: \$Capacity_{n} > Capacity_{n-1}\$, \$Price_{n} \geq Price_{n-1}\$ (단조 증가 조건).¹
 - 제약 조건: 마지막 구간의 용량은 해당 시간대의 공급 가능 용량과 일치해야 함.²
- ** 입찰서 유효성 사전 검증:** KPX 서버로 전송하기 전, 로컬에서 데이터 정합성을 검증해야 한다.

- 입찰 상한가/하한가 위배 여부 확인.
- 램프 레이트(증감발률)가 물리적으로 가능한 범위인지 확인.
- ** API 연동 및 보안:** KPX의 REST API (e-Power Market)와 연동하여 XML/JSON 포맷으로 입찰서를 제출해야 한다. 이 과정에서 회원사 공인인증서(NPKI)를 이용한 전자서명과 SSL/TLS 암호화 통신을 수행해야 한다.³

4.2.3. 실시간 관제 및 제어 (Real-Time Operations)

- ** 급전 지시 수신 및 알림:** KPX EMS 또는 웹 시스템으로부터 급전 지시(Set Point)를 수신하면 1초 이내에 운영자 대시보드에 시각/청각적 알람을 발생시켜야 한다.
- ** 출력 제어 명령 하달:** 급전 지시가 현재 발전량보다 낮을 경우, 시스템은 연동된 RTU/Gateway를 통해 인버터에 출력 제한 명령(Active Power Limit)을 전송해야 한다.

4.2.4. 정산 및 리포팅 (Settlement)

- ** 이중 정산 시뮬레이션:** 아래 공식을 적용하여 예상 수익을 실시간으로 계산해야 한다.¹

$$\text{ $$\text{정산금} = (Q_{\{\text{DA}\}} \backslash \text{times} \text{ SMP}_{\{\text{DA}\}}) + ((Q_{\{\text{Actual}\}} - Q_{\{\text{DA}\}}) \backslash \text{times} \text{ SMP}_{\{\text{RT}\}}) $$}$$
- ** 폐널티 모니터링:** 예측 오차율과 급전 지시 불이행률을 계산하여 '임밸런스 폐널티' 부과 가능성을 경고해야 한다. (제주 시범사업 기준 허용오차 12% 적용).⁶

4.3. 비기능적 요구사항 (Non-Functional Requirements)

- ** 가용성:** 실시간 시장 대응을 위해 시스템 가동률은 99.99% 이상이어야 한다.
- ** 성능:** 입찰 마감 직전 트래픽 폭주 시에도 입찰서 생성 및 전송은 2초 이내에 완료되어야 한다.
- ** 데이터 무결성:** 모든 입찰 및 제어 이력은 '감사 로그(Audit Log)'로 5년간 보존되어야 하며, 위변조가 불가능해야 한다(블록체인 기술 도입 고려 가능).⁷

4.4. UI/UX 가이드라인 및 이미지화 시나리오

개발자와 디자이너의 이해를 돋기 위해 주요 화면의 구성 요소를 묘사한다.

이미지 1: 통합 관제 대시보드 (The Command Center)

- **개요:** 운영자가 로그인했을 때 처음 접하는 화면. 전반적인 시장 상황과 자산 상태를 한눈에 파악.
- **시각적 구성:**
 - **상단 헤더:** 현재 시장 시간(KPX Time), 실시간 SMP, 다음 입찰 마감까지 남은 시간(카운트다운 타이머).
 - **중앙 맵(Map):** 제주도 지도가 표시되고, 각 발전소 위치에 핀(Pin)이 찍혀 있음. 핀의 색상(초록/노랑/빨강)은 현재 운전 상태 및 통신 건전성을 나타냄.
 - **하단 그래프:** 시계열 그래프. X축은 시간(0~24h). Y축은 MW.
 - 파란색 실선: 하루전 낙찰량(계획).
 - 주황색 점선: 실시간 발전 예측량.
 - 초록색 영역: 실제 발전량.

- 빨간색 가로선: 현재 급전 지시 상한선.
- 우측 패널: 주요 알림(Alerts). "발전소 A 통신 두절", "15:00 구간 입찰 마감 임박" 등의 메시지가 리스트로 나열됨.

이미지 2: 전략적 입찰 설정 화면 (The Bidding Matrix)

- 개요: 입찰 담당자가 가격과 물량을 설정하는 핵심 작업 공간.
- 시각적 구성:
 - 좌측 설정창: 입찰 대상 자원 선택 드롭다운, 대상 날짜 및 시간 선택. 전략 템플릿 선택 버튼 ("수익 극대화", "안전 제일", "페널티 회피").
 - 중앙 스프레드시트: 엑셀과 유사한 그리드. 행(Row)은 시간(01~24), 열(Col)은 1~10구간의 가격과 용량.
 - 우측 시각화 (**Bid Curve**): 사용자가 그리드에 숫자를 입력하면 즉시 반응하는 '계단형 차트(Step Chart)'.
 - X축: 누적 용량(MW), Y축: 입찰 가격(원).
 - 인터랙션: 차트의 계단을 마우스로 드래그하여 가격이나 물량을 조절하면 그리드의 숫자가 자동으로 변경됨.
 - 오류 검출: 만약 3구간 가격을 4구간보다 높게 설정하면, 해당 셀이 붉은색으로 깜빡이며 "단조 증가 위배" 툴팁이 표시됨.

5. 기술적 구현 전략 및 데이터 아키텍처

안정적인 시스템 구축을 위해 데이터의 흐름과 통신 규격을 명확히 한다.

5.1. 데이터 모델 및 API 스키마

입찰서 제출을 위한 데이터 구조는 KPX의 XML/JSON 스키마를 엄격히 준수해야 한다. 아래는 API 페이로드(Payload)의 예시 구조이다.

필드명 (Field)	데이터 타입	설명 및 제약조건	비고
MarketType	String	DA (하루전) 또는 RT (실시간) 구분	필수
TradingDate	Date (ISO8601)	거래 대상 일자 (YYYY-MM-DD)	필수
GenCode	String	KPX에서 부여한 발전기 코드 (예: JEJU_PV_001)	10자리 내외

BidSegment[1..10].Price	Float	해당 구간의 입찰 가격 (원/kWh)	$\$P_n \backslash ge P_{\{n-1}\}$
BidSegment[1..10].Qty	Float	해당 구간까지의 누적 용량 (MW)	$\$Q_n > Q_{\{n-1}\}$
RampUpRate	Float	분당 출력 증가 가능량 (MW/min)	물리적 특성 반영
RampDownRate	Float	분당 출력 감소 가능량 (MW/min)	물리적 특성 반영

5.2. 시스템 아키텍처 다이어그램 (논리적 설계)

1. 현장 레이어 (Edge Layer):

- **RTU/Data Logger:** 인버터와 DNP3.0 또는 Modbus 프로토콜로 통신.
- 보안 게이트웨이: 수집된 데이터를 암호화하여 클라우드로 전송. 인터넷망 단절 시 로컬 버퍼링 기능 필수.

2. 플랫폼 레이어 (Cloud Core):

- **Message Broker (Kafka/RabbitMQ):** 초당 수천 건의 발전 데이터 트래픽 처리.
- **TimeSeries DB (InfluxDB):** 시계열 발전 데이터 및 기상 데이터 고속 저장.
- **Bidding Engine:** 입찰 알고리즘 수행 및 XML 생성, 유효성 검증 로직 탑재.

3. 외부 인터페이스 (External Interface):

- **KPX Adapter:** KPX e-Power Market API와의 통신 전담. 공인인증서 관리 및 세션 유지, 재시도(Retry) 로직 수행.
- **Weather Adapter:** 기상청 등 외부 기상 데이터 수집.

5.3. 비상 시 대응 프로토콜 (Emergency Protocol)

KPX 시스템 장애 또는 인터넷 망 장애 발생 시의 대응 절차를 시스템에 내재화해야 한다.⁸

- **입찰 시스템 장애 시:** 시스템은 자동으로 가장 최근의 유효한 입찰 데이터(Default Bid)를 로드하거나, 사전 설정된 '보수적 입찰값'을 준비하여 운영자에게 승인을 요청한다.
- **통신 장애 시:** KPX의 전력거래 정지 선언 시, 시스템은 즉시 '비상 모드'로 전환되어 입찰 제출을 중단하고 마지막 급전 지시 상태를 유지하도록 현장에 명령한다.

6. 정산 및 폐널티 관리 로직 상세

사업성 확보를 위해 가장 중요한 정산 알고리즘 상세이다. 시스템은 다음 로직을 통해 예상 수익을 계산한다.

6.1. 임밸런스 페널티 (Imbalance Penalty) 계산

제주 시범사업에서는 발전 실적과 급전 지시 간의 오차가 허용 범위(예: 12%)를 초과할 경우 페널티가 부과된다.⁶

- **로직:** 매 15분 단위로 |발전실적 - 급전지시| / 설비용량 을 계산.
- **페널티 적용:** 오차율이 12%를 초과하는 구간에 대해서는, 해당 구간 정산금에서 페널티 계수를 곱한 금액을 차감.
- **시스템 기능:** 실시간 발전량이 허용 오차 한계선(10~11%)에 도달하면 경고를 보내, 운영자가 즉시 대응할 수 있도록 해야 한다.

6.2. 부가 정산금 (Additional Settlement)

단순 에너지 정산 외에, 계통 기여도에 따른 부가 수익을 계산해야 한다.

- **용량 정산금 (CP):** 입찰에 참여하여 공급 가능함을 입증한 용량에 대해 지급되는 고정비 성격의 정산금.
- **예측 제도 인센티브:** 기존 예측 제도가 입찰 제도로 이행됨에 따라, 입찰 참여 자원에게는 1년간 기존 예측 정산금의 50%를 보전해 주는 과도기 규정을 적용하여 수익에 합산해야 한다.¹

7. 결론 및 제언

KPX와 민간 사업자 간의 입찰 시스템 구축은 단순한 IT 프로젝트가 아니라, 민간 발전사가 '수동적 에너지 생산자'에서 '능동적 에너지 트레이더'로 진화하는 핵심 수단이다.

성공적인 시스템 구축을 위해서는 다음 세 가지가 필수적이다.

1. 규제 준수 (**Compliance**): KPX의 이중 정산 규칙과 입찰 데이터 검증 로직(단조 증가, 램프 레이트 등)을 시스템 레벨에서 강제하여 인적 오류를 원천 차단해야 한다.
2. 연결성 (**Connectivity**): 현장 RTU부터 KPX API 서버까지 끊김 없는 데이터 파이프라인을 구축하고, 특히 보안(PKI)과 가용성에 만전을 기해야 한다.
3. 지능화 (**Intelligence**): 단순한 입찰서 제출을 넘어, 기상 예측 오차를 실시간 입찰 전략으로 보정하여 임밸런스 페널티를 최소화하고 수익을 극대화하는 알고리즘이 핵심 경쟁력이 될 것이다.

본 보고서에서 제시한 타임라인 시나리오와 PRD, 그리고 아키텍처 설계를 기반으로 개발을 착수한다면, 급변하는 전력 시장에서 경쟁 우위를 점할 수 있는 강력한 플랫폼을 확보할 수 있을 것이다.

참고 자료

1. 전력시장 제도개선 제주 시범사업 운영규칙(안) - 전력거래소, 12월 18, 2025에 액세스, https://new.kpx.or.kr/boardDownload.es?bid=0209&list_no=70470&seq=1
2. 제주 시범사업 ④ 실시간시장 및 재생E 입찰 - YouTube, 12월 18, 2025에 액세스, <https://www.youtube.com/watch?v=HU0q1oD7Hfg>

3. [전력시장 회원가입 방법 매뉴얼] 두 번째, 전력거래 이파워마켓 신청 - YouTube, 12월 18, 2025에 액세스, https://www.youtube.com/watch?v=pVfQZKj_nfs
4. Korean Renewable Energy Bidding System, 12월 18, 2025에 액세스, <https://www.shinkim.com/eng/media/newsletter/2215>
5. OPENAPI Detail | OPEN DATA PORTAL, 12월 18, 2025에 액세스, <https://www.data.go.kr/en/data/15076302/openapi.do>
6. 급전가능재생에너지 자원 등록 절차 안내 - 전력거래소, 12월 18, 2025에 액세스, https://www.kpx.or.kr/boardDownload.es?bid=0042&list_no=72758&seq=1
7. Korea's energy market adopts blockchain for bidding process - Ledger Insights, 12월 18, 2025에 액세스, <https://www.ledgerinsights.com/koreas-energy-market-adopts-blockchain-for-bidding-process/>
8. 비상시 전력시장 운영 절차, 12월 18, 2025에 액세스, https://marketrule.kpx.or.kr/lmxdata/attach/2025/5/upload_5127126665285383397_p145.pdf