

---

차기EMS 설계 및 구축 반영을 위한

# 해외EMS 기술동향 조사 국외출장 결과보고

[MISO, ERCOT, BC Hydro]

---

2022. 06.

---

정보기술처	실장	최영민
차기IT추진실	차장	박민령
	대리	김세실
중앙전력관제센터	팀장	최홍석
수급운영팀	차장	김장근

---

# 목 차

1	출장목적	1
2	출장개요	1
3	해외ISO EMS운영 조사	2
	가. MISO社	2
	나. ERCOT社	4
	다. BC Hydro EMS 프로젝트 조사	6
	라. 출장결과 차기EMS 적용방안	7
4	해외ISO 관제운영 조사	9
	가. 전력관제센터 구성	9
	나. 실시간 관제조직	9
	다. 계통운영 현황	9
	라. 하루전발전계획 적용 현황	10
	마. 관제운영 기술 현황	10
	바. 출장결과 관제운영 기술 적용방안	11
5	향후계획	12
붙임 1.	MISO社 운영조사 세부내용	13
2.	ERCOT社 운영조사 세부내용	20
3.	BC Hydro社 기관 개요	26
4.	계통 및 관제운영 조사 세부내용	27
5.	Questionnaire 및 현지 발표자료	40
6.	출장 관련 주요 회의 사진	42
7.	접촉인물	44
8.	기타 출장관련 사항	45

## 1 출장목적

- 전력계통 환경변화 대응 북미ISO현황 및 EMS 기술동향 조사
  - 재생E 확대에 따른 대응기술 식별 및 차기EMS 적용방안
  - 전력계통 변동성 대응 전력관제 업무체계 및 운영방안 등

## 2 출장개요

- 출장기간 : '22.6.4(토) ~ '22.6.12(일), 7박 9일
- 방문기관 : MISO, ERCOT, BC Hydro 및 Powertech
- 출 장 자

구분	부서	직위(직책)	성명
전력IT 분야	정보기술처 차기IT추진실	부장(실장)	최영민
		차장	박민령
		대리	김세실
계통·관제 분야	중앙전력관제센터 수급운영팀	부장(팀장)	최홍석
		차장	김장근

## □ 주요일정

날짜	출발지	도착지	방문	업무수행내용	접촉인물
6월3일(금)	나주	서울	-	■ 출국 준비(코로나 검사 등) 위한 사전이동	-
6월4일(토) 6월5일(일)	인천 공항	인디애나 폴리스	-	■ 출국(인천→아틀랜타환승→인디애나폴리스) ■ 해외ISO 방문 대비 사전 실무협의	-
6월6일(월)	인디애나 폴리스		<b>MISO</b>	■ MISO 실무자 접견 ■ EMS기술 및 MISO 운영현황 조사 ■ 현지 관제센터 방문	Brian (Manager)
6월7일(화)	인디애나 폴리스	텍사스 오스틴		■ 이동(인디애나폴리스공항→오스틴공항)	-
6월8일(수)	텍사스 오스틴		<b>ERCOT</b>	■ ERCOT 실무자 접견 ■ EMS기술 및 ERCOT 운영현황 조사 ■ 관제 및 계통운영 기술이슈 협의	Huang, Fred (Director)
6월9일(목)	텍사스 오스틴	밴쿠버		■ 이동(오스틴공항→달라스공항→밴쿠버공항)	-
6월10일(금)	밴쿠버		<b>BC Hydro, Powertech</b>	■ BC Hydro & Powertech 실무자 접견 ■ EMS기술 및 BC Hydro 운영현황 조사 ■ KPX Presentation(차장 박민령) - New IT Project Overview, New EMS Functions	Xi Lin (Director)
6월11일(토) 6월12일(일)	밴쿠버	인천		○ 귀국(밴쿠버공항→인천공항)	-

### 3 해외ISO EMS운영 조사

#### 가. MISO社 (세부내용 붙임1 참조)

##### □ MISO(Midcontinent ISO) 개요

- 서비스 권역 기준 북미 최대 규모 ISO (PJM 대비 2.5배 수준)
  - 미국 중부 15개 주 및 캐나다 매니토바주 전력서비스 제공
- 38개 지역수급관리기관(Balancing Authority) 연계 및 통합 운영
- '99년 설립, '05년 에너지 시장 및 '09년 예비력 시장 개설

##### □ 전력계통 운영 현황

- (규모) 국내대비 발전설비 규모 약15배, EMS데이터취득 규모 약2배
- (연계) 미 중부 11개 지역과 융통선로 통해 연계 운영
- (전원) 가스(42%), 석탄(28%), 풍력(15%), 원자력(7%)순
  - 국내 전원 Mix와 유사하며 5MW 이상 발전자원을 관리 중

최대수요(MW)	발전설비	회원사	SCADA Points	융통지역
127,125('11.7월)	<b>6,773</b>	471	295,924	11개

- (주파수) CPS1<sup>1)</sup> 기준 128.5, KPX(171) 보다 다소 낮은수준
- (SE품질) KPX와 동일한 오차 허용범위(±50MW) 적용

##### □ 재생E 운영 관련

- (출력제한) 재생E 보조서비스 시장 참여가 가능하며, 전력 시장 기반으로 출력제한량 결정되어 별도 보상체계는 없음
- (예측) 실시간 가격에 영향을 주는 재생E 예측값의 객관성 확보를 위해 풍력·태양광에 대한 외부 예측서비스 활용
- (배전연계) EMS와 배전연계 필요성은 인식하나 현재까지 구체적인 방안은 마련되지 않은 상황

##### □ (PMU) 전력계통 진동 감시 등 용도로 운영

- EMS와 분리하여 별도 운영(약 360여개 설치)

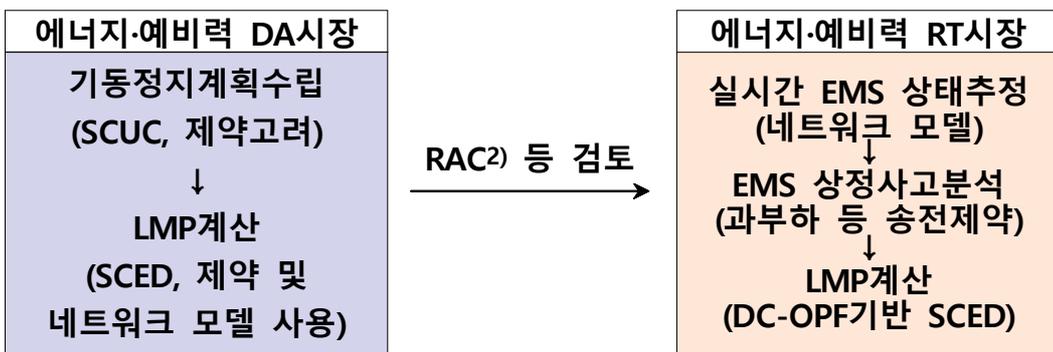
1) Control Performance Standard : 정상 및 외란 시 목표주파수 충족 여부 지표 (NERC기준)

□ 전력시장 운영 현황

- 하루전(DA) 및 실시간(RT) 에너지/예비력시장 운영
- 하루전 시장과 실시간 시장 각각에 대하여 계통제약을 고려한 지역한계가격(LMP) 산정
  - (DA) 안전제약기동정지계획(SCUC), 안전제약경제급전(SCED) 활용, 상정사고, 송전제약(오프라인모델)을 고려한 하루전 시장 LMP 산정
  - (RT) 실시간 EMS 상태추정, 제약반영경제급전(SCED)을 통해 상정사고, 송전제약을 고려한 실시간 시장 LMP 산정

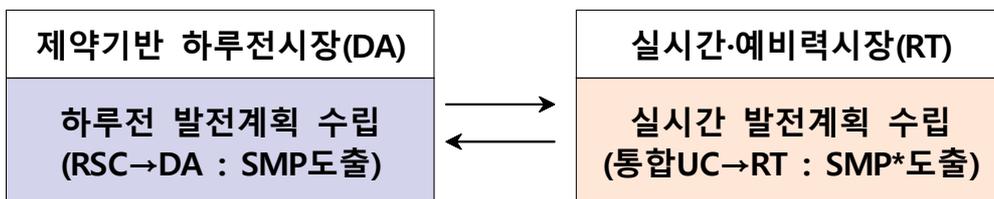
☞ 하루전(DA) 시장과 실시간(RT) 시장 간 가격 편차 최소화

【MISO社 DA-RT시장 사용SW 및 가격결정 흐름도】



- ①DA SCUC수행→발전기 기동정지계획 ②DA SCED수행→발전기 급전계획량 및 LMP계산 ③DA/RT RAC수행(SCUC기반 안전도 검토)
- ④EMS 실시간 자료 취득, 상태추정(SE) 수행, 상정사고(CA) 분석
- ⑤RT SCED수행(5분주기)→발전기 급전계획량 및 LMP계산
- ⑥EMS AGC 수행(4초단위) ⑦정산(DA-LMP 및 RT-LMP간 이중정산)

【참고 : 제주 실시간·예비력시장 사용SW 및 가격결정 흐름도】



\* 전력시장 정산은 DA-SMP와 RT-SMP간 이중정산 적용

2) Reliability Assessment Commitment : 사전 시장(계통) 신뢰성 검토

## 나. ERCOT社 (세부내용 붙임2 참조)

### □ ERCOT(Electric Reliability Council of Texas) 개요

- 텍사스주 대부분에 전력서비스를 제공하는 전력계통운영자
- 북미에서 전기 소비량이 가장 높은 지역으로 국내와 유사하게 다른 지역과 송전계통이 분리된 독립 전력계통 형태

### □ 전력계통 운영 현황

- (규모) 국내 대비 발전설비 약1.5배, 최대수요는 82% 수준
- (연계) 독립 전력계통. 직류 융통선로 4개 보유
- (전원) 가스(51%), 풍력25%), 석탄(13%), 원자력(5%)순  
- 1MW 이상 발전자원을 관리 중

구분	최대수요(MW)	발전설비	송전선로	변압기	모선
ERCOT	74,328	710	7,173	1,967	6,717

- (주파수) 북미 최고 수준 주파수 제어품질(CPS1 168) \*KPX(171)
- (SE품질) 높은 수준의 SE 허용범위 적용( $\pm 15$ MW) \*KPX( $\pm 50$ MW)

### □ 재생E 운영 관련

- (출력제한) 재생E 보조서비스 시장 참여가 가능하며, 전력 시장 기반으로 출력제한량 결정되어 별도 보상체계는 없음  
- 주로 야간 풍력 과발전으로 인한 선로용량 제약으로 발생  
- 재생E 출력제한 실적 : 풍력 5%, 태양광 10%('20년 기준)
- (예측) 실시간 가격에 영향을 주는 재생E 예측값의 객관성 확보를 위해 풍력·태양광에 대한 외부 예측서비스 활용
- (배전연계) EMS와 배전연계 필요성은 동의하나 현재까지 구체적인 방안은 마련되지 않은 상황

### □ (PMU) 20MVA 이상 발전설비 PMU 설치 의무화('17.1월)

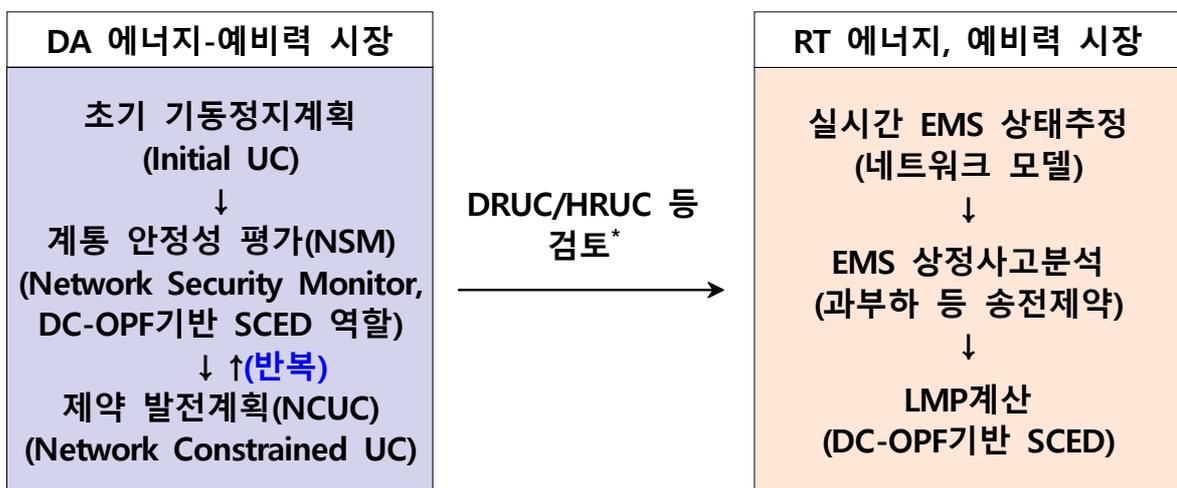
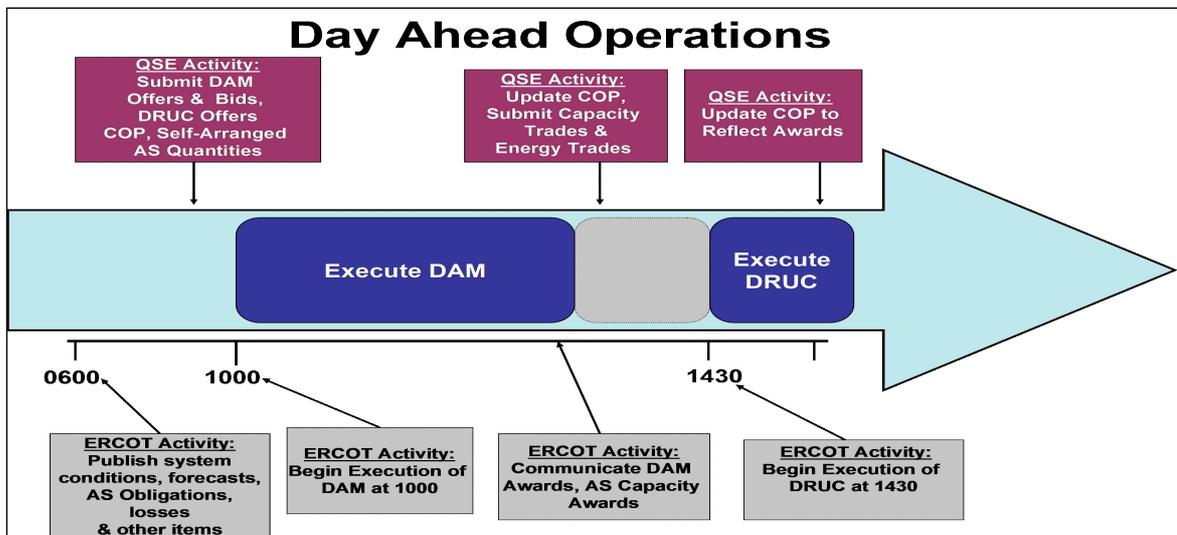
- EMS와는 분리하여 별도 운영(총 109개(47개 장소) 설치)

## □ 전력시장 운영 현황

- 쌍무계약시장(Bilateral Market), 하루전(DA) 에너지/예비력시장 및 실시간(RT) 에너지시장, 예비력시장 운영(LMP기반)
- (DA)계약반영기동정지계획(NCUC), 안전계약경제급전(SCED) 활용, 상정사고, 송전제약을 고려한 하루전 시장 LMP 산정
- (RT)실시간 EMS 상태추정, 계약반영경제급전(SCED)를 통해 상정사고, 송전제약을 고려한 실시간 시장 LMP 산정

## ☞ 하루전(DA) 시장과 실시간(RT) 시장 간 가격 편차 최소화

【ERCOT社 DA-RT시장 사용SW 및 가격결정 흐름도】



\* DA 이후 RT 까지 지속적으로 수급 및 계통 안정성 평가(하루전 및 1시간 단위)

## 다. BC Hydro EMS 프로젝트 조사 (세부내용 붙임3 참조)

### □ BC Hydro 개요

- 캐나다 브리티시콜롬비아주 정부 소유의 전력 유틸리티
- Powertech(연구소) 및 Powerex(도매전력거래) 자회사 보유
- 현재 EMS 신규 구축 프로젝트 (GE社) 진행중

### □ EMS 신규 구축 프로젝트 비교

- 전체 사업규모, 추진체계 면에서 차기EMS 구축사업과 유사
- 주로 EMS제작사의 SW 업그레이드 및 지원중단 이슈로 EMS 교체를 추진하였고, 벤더 기술종속을 문제로 언급
- EMS 구축인력이 충분치 않은 것을 사업수행 리스크로 인식
  - 실시간 계통운영/IT유지관리/EMS프로젝트 수행 등 분야별 전문 인력 구성, 외부 PMO조직 활용 등으로 보완

구분	BC Hydro	KPX
제작사	·GE社	·K-EMS(LS일렉트릭社 등)
배경	·현행 버전 제작사 지원중단 ·신규 버전 업그레이드 필요	·현행 EMS 수명연한 도래 ·에너지 전환 신규기능 개발
교체 주기	·약 7년	·약 10년
내용	·EMS Ver.3→Ver.3.3 업그레이드 ·커스터마이징 기능의 이관 ·하드웨어 전면 교체	·기존EMS 기능 이관 ·재생E안정도평가 등 신기능개발 ·하드웨어 전면 교체
규모	·\$33million(약 420억원) *최초\$20million에서 설계변경으로 증액	·371억원(기본계획 기준) *차기CBP 등 차기IT사업 전체 888억원
수행 인력	직전EMS프로젝트 수행 실무자, 실시간운영 및 유지관리 인력 등(9명)	·차기IT추신실 EMS 담당(5명)
PMO	·외부 PMO조직 운영 -표준개발방법론 및 계획에 따른 프로젝트 진행여부 관리	·외부계약에 의한 PMO조직 운영 -기획, 집행, 사후 단계 프로젝트 관리 지원(전자정부법 근거)
의사 결정 조직	·Steering Committee운영 - 운영파트 부사장 등	·사내 TF운영 - 전력계통운영 본부장 등
사업 일정	·설 계 : 22개월 ·구 현 : 15개월 ·테스트 : 12개월 (총58개월) ·안정화 : 9개월 * '24년 8월 준공 예정	·설 계 : 12개월 ·구 현 : 14개월 ·테스트 : 5개월 (총33개월) ·안정화 : 2개월 * '25년 9월 준공 예정

## 라. 출장결과 차기EMS 적용방안

- ❖ (실시간·예비력 시장 도입 대비) EMS SCED 추가 신규 개발 검토
  - 송전제약 반영을 위한 DC 및 AC OPF기반 검토용 SCED 기술 개발
- ❖ (계통상황이 유사한) ERCOT 수준 실시간 품질감시 기준 상향
  - 상태추정(SE) 허용오차 기준 상향 및 품질감시 방안 설계 반영
- ❖ (재생E관련) 재생E 변동성 대응을 위한 차기EMS 설계내용 추진
  - 안정도 기반 재생E한계량 평가, 재생E 부하 모델링 및 추정 등
- ❖ (차기EMS신기술) 해외적용 사례 없는 기술로 확인
  - AI 토폴로지 오류체크, GPU기반 고속조류계산, 과부하해소 자동탐색 등

### □ 향후 전력시장 개선 대비 SCED\* 개선 등 관련 기술개발 검토

- (기반영) 현행 SCED에 발전기 모션 LMP\* 계산기능 추가

\* SCED(안전도제약경제급전), LMP(지역한계가격) 등 관련 설명은 붙임 참조

- (구현방안) DC 및 AC-OPF 기반 검토용SCED 기술 개발 검토

- 북미ISO(MISO, ERCOT, PJM 등) 하루전 및 실시간 시장에서 활용 중인 SCED 기술 조사내용 고려
- 발전기 및 부하모션LMP 모의 분석 등 향후 시장 진화 대비
- AC-OPF 기반 SCED 기술 개발로 전압문제 대비 등 계통해석 정확도 향상 및 기술 선진화 도모

☞ 차기IT 종합설계·검토TF 통해 조사내용 공유 및 개발 여부 결정

### □ 선진 수준의 계통해석 품질기준 적용

- (구현방안) ERCOT社 상태추정 허용오차와 동일 수준 상향

- 차기EMS 설계 시 실시간 품질 평가 및 감시기능 강화
- 상태추정(SE) 허용오차 : (현행)  $\pm 50$  → (차기EMS)  $\pm 15$ MW

□ 차기EMS 선행평가 신규기능 활용 재생E 변동성 대응능력 제고

- 재생E 변동성 대응을 위해 재생E 램핑리스크(급격한변동) 감시 도구 활용 확인
  - ERCOT社, CAT(Capacity Assessment Tool) : 부하 패턴 자료 등을 기반으로 향후 6시간 재생E 램핑리스크 판단 후 추가 예비력 확보 등
- (구현방안) 차기EMS에 이와 유사한 계통선행평가 기능 등 재생E 관련 신규 개발기능에 대한 상세설계 및 개발 추진
  - 통합UC 발전기 기동정지, 발전기 휴전계획 등 계획데이터 연계를 통해 정확도 확보에 노력

【재생E 관련 차기EMS 주요 신규 개발기능】

기능명	주요내용
전력계통선행평가	재생E변동성 대응을 위한 미래계통 평가(향후 2시간)
재생E 안정도 평가	실시간동적안정도 평가를 통한 재생E 출력제어량 산정
재생E 부하모델 구성	재생E 변동성 반영을 위한 재생E 부하모델 반영

□ 신기술 기반 차기EMS 신규기능 개발로 EMS기술 선도

- 차기EMS에서 채택한 시스템 분산처리 기술, GPU활용 및 AI기술 등은 조사 대상 ISO에서 적용되지 않은 기능
- EMS 신뢰도, 기능의 확장, 전력계통 운영 유용성 및 활용도 측면에서 필요성에 대한 공감
- (구현방안) 차기EMS 상세설계 및 개발로 기술적 완성도 제고

【신기술 기반 차기EMS 신규 개발기능】

기능명	주요내용
분산 및 병렬처리	호스트 부하 경감 위한 고확장·고가용성 구조 도입
AI기반 토폴로지 에러탐지	차단기상태정보 취득오류 자동탐지 및 정보제공
조류계산 고속연산방식	GPU기반 조류해석 성능 개선
최적화기반 AGC	예비력, 송전제약을 고려한 최적화 기반 AGC 수행
스위칭기반 과부하탐색	선로스위칭을 포함한 과부하 해소방안 탐색 수행

#### 4 해외ISO 관제운영 조사

##### 가. 전력관제센터 구성

국가	기관	관제센터 위치			거리	비고
		중앙센터 (①)	후비센터 (②)	제2후비센터 (③)		
미국	ERCOT	Taylor	Bastrop	-	①~② 43km	-
	MISO	Carmel 인디애나 폴리스 州	Sheridan 인디애나 폴리스 州	Little Rock 아칸소 州 (관제편입)	①~② 27km ①~③ 970km	-
캐나다	BC Hydro	Fraser Valley	Okanagan	-	①~② 320km	Dual Primary

##### 나. 실시간 관제조직

구분	MISO	ERCOT	BC Hydro
관제부 인원	9명	8명	19명(배전망 포함)
근무시간	12시간(5~17시), 2교대	12시간(5~17시), 2교대	12시간(6~18시), 2교대

\* 자격취득 조건 필요하며 별도의 휴게시간 부여 없음, 6주 근무 후 2~3주 휴가

##### 다. 계통운영 현황

###### □ 수요 및 신재생 예측

- (공통) 수요예측 부서가 별도로 존재, 기상예측은 수요예측 부서에서 담당
- (MISO, ERCOT) 신재생 예측은 외부 기상예측 전문회사에 서비스를 받으며, 비용은 거래비용으로 회수함

###### □ 실시간 운영

- (MISO) 1분 주기 상태추정, 4초 주기 실시간 제어, 13,000개의 상정고장해석 처리하며, Constraint Management를 통해서 관제사의 수동 개입 가능
- (ERCOT) 1MW 이상의 발전설비 정보를 취득, 송전부분 4초, 배전부분 1분8주기 취득, 4초 주기 실시간 제어, SCED상태별로 관제사의 수급 개입 가능

## 라. 하루전발전계획 적용 현황

### □ MISO, ERCOT

구 분	DAM (Day Ahead Market)	RUC (Reliability Unit Commitment)
전력수요	사업자가 입찰한 수요(MISO)	예측한 전문가 보정 수요
	LSE가 입찰한 수요(ERCOT)	
계통제약	반영	계통상황에 따른 추가 반영(MISO)
		좌측과 동일하게 반영(ERCOT)
운영예비력	동일하게 반영	

## 마. 관제운영 기술 현황

### □ 시각동기위상측정장치(PMU) 계통운영 활용

- (MISO, ERCOT) 관내 전기사업자가 설치한 PMU 실시간 정보를 운영기관에 제공하여야 하는 규정이 있으며, 정보를 보다 효과적인 활용방안 모색중
- (BC Hydro) PMU 정보를 가장 잘 활용, 미국서부와 연계 되는 장거리 송전선로 동요(Oscillation) 감시 등에 활용

### □ 동적선로용량(DLR, Dynamic Line Rating) 계통운영 적용

- (MISO, ERCOT) 미국 FERC(연방에너지위원회)는 Order881-A를 발표, DLR을 2025년까지 적용토록 법제화하여 현재 관내 30~80% 적용 중이며, 약 10% 용량 증대 효과 가능

### □ 실시간 계통관성(Inertia) 감시

- (MISO, ERCOT) 감시시스템을 탑재하여 운영중
- (BC Hydro) 감시시스템이 현재는 없으며, 향후 고려 사항

### □ 전력전자 기반 재생E 계통 온라인 동적안정도 평가 기술

- (Powertech) 기술적인 솔루션을 제공하고, 안정도 평가 기술에 대한 맞춤형 기술을 개발하여 적용

## 바. 출장결과 관제운영 기술 적용방안

- ❖ (시각동기 위상측정기술(PMU) 관제운영 구현) 한전 PMU 데이터의 제공 협력
  - 신재생 취약계통, 동·서해안 발전단지 집중 감시 기술 개발
- ❖ (송전선로 동적선로용량 도입 검토) 신재생 수용성 및 안정화 기술
  - 한전 정보제공, 거래소 관제운영, 한전공동 시범사업 추진
- ❖ (저주파수공진 실시간 평가 Tool 도입) 동해안 등 전력전자 설비 안정성 감시
  - 기존 온라인 DSA(Dynamic Security Assessment)에 추가기능 구현

### □ 한전의 시각동기위상측정장치(PMU) 취득자료 관제운영 연계

- (국내 현황) '22년 기준 한전 217대(연구용 51, Fault Record용 166대) 운전 중, 정보제공 의무 규정 부재, 산업부 고시 제18조에 서는 선언적인 상호협력 규정만 명시

\* 산업부고시 제18조(시각동기 위상측정 기술의 적용 확대) 전력거래소와 전기사업자는 시각동기 기반의 위상측정 기술을 정밀 계통감시, 고장분석 및 전력설비 특성자료 검증에 적극 활용하고 기술개발을 위해 상호 협력하여야 한다.

- (구현방안) 한전-거래소간 자료공유 협력, 동해안 취약계통 저주파동요 감시 개발, 광역계통감시 화면 공유 등

### □ 국내 동적선로용량 (DLR, Dynamic Line Rating) 도입 검토 필요

- (국내 현황) '12년 제주SG 한전 실증사업 수행, DLR 산정방식(센서 취득값 또는 계산값) 선택 가능, 송전사업자(한전)의 DLR 정보 제공 및 거래소 관제운영에 대한 본격 논의 필요
- (구현방안) 신재생 용량 한계선로(전남지역)에 대한 선별적 시범적용으로 신재생E 수용성과 안정성 제고 가능

### □ 온라인 동적안정도 평가(DSA) 추가 기능 구현

- (국내현황) 중앙전력관제센터 내에 DSA를 활용한 안정도 평가 및 감시 중, 최근 울진 산불 발생시 평가 및 감시되지 못한 동해안 저주파수 공진 사례 발생

\* '22.3.4 삼척화력, 한울원전에 저주파공진 현상 발생 분석(계통운영처)

- 전 세계적으로 전력전자기반 설비 증가로 저주파수공진(SSR: Subsynchronous Resonance)에 대한 대책과 관심 증가
- (구현방안) 현행 온라인 미소신호안정도 검토모듈에 SSR 검토모듈의 단계별 추가 탑재(Add-On)
  - (1단계) 가장 도전적인 과제는 정밀한 인근 계통 모델링과 검증(1년)
    - \* HVDC, TCSC 등 제작사 제공 모델, 사용자 정의 모델에 대한 검증사업 필요
  - (2단계) 검증된 모델링 기반 실시간 SSR 검토 모델 탑재(1년)

## 5 향후계획

### □ 6월말 : 해외출장 결과 내부공유

- 차기IT 종합설계·검토TF 3차 회의(6.30)
- 해외EMS기술조사 사내 공유 세미나(7.5)
  - \* 회의 및 세미나 일정은 상황에 따라 변동될 수 있음

### □ 7월~9월 : 차기EMS 기능설계 반영

- TF의견 등 반영하여 상세 기능요구사항 작성
- 차기EMS 사업 시행계획 수립(9월)

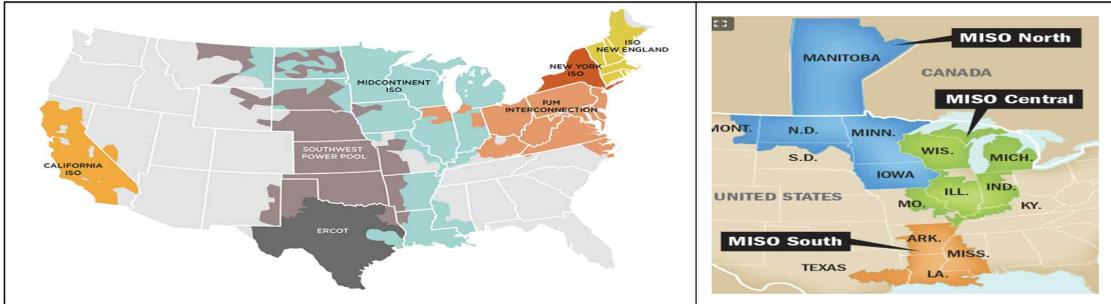
### □ 10월~12월 : 사업발주 및 사업자 선정

- 붙임 1. MISO社 조사 세부내용
2. ERCOT社 조사 세부내용
  3. BC Hydro社 조사 세부내용
  4. 관제센터 운영 관련 조사 세부내용
  5. Questionnaire 및 KPX 차기IT Project 발표자료(영문)
  6. 출장 및 기술회의 사진
  7. 접촉인물
  8. 기타 출장관련 사항. 끝.

[붙임1]

## MISO社 운영조사 세부내용

- (개요) 미 중부 15개 주 및 캐나다 일부 지역 관할 (북미 최대 관할 3))
  - (시장) '99년 설립, '05년 에너지 시장, '09년 예비력 시장 개설
    - '13년 Midwest ISO에서 Midcontinent ISO 사명 개명
    - 38개의 지역수급관리기관(Local BA(Balancing Authority)) 연계



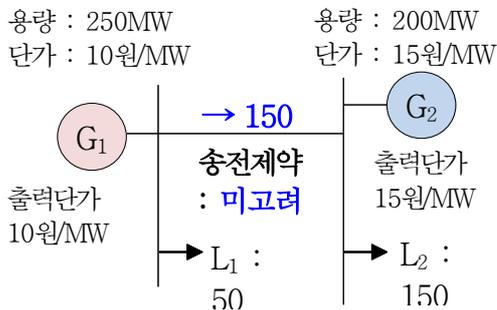
- (전원MIX) 가스(42%), 석탄(28%), 풍력(15%), 원자력(7%), 태양광(1%)

최대수요(MW)	발전설비	회원사	SCADA Points	용통지역
127,125('11.7월)	6,773	471	295,924	11개

### <참고> 지역 한계가격(LMP)

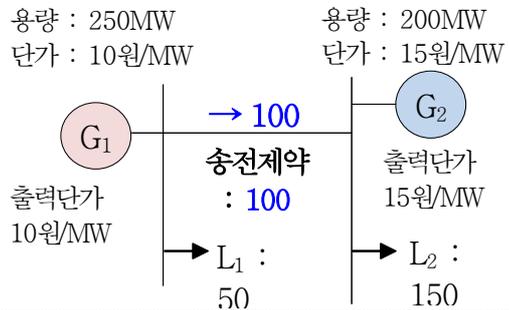
- LMP(Locational Marginal Price) : 북미 실시간 전력시장 LMP 적용
  - 1MW 부하 변경시 송전손실과 송전혼잡을 고려한 증분비용(Incremental Cost)
    - 만약 송전선로 손실이나, 송전용량 제한이 없다면 모든 부하의 LMP는 동일하지만 실제로는 송전손실과 송전혼잡으로 인해 부하의 LMP 계산결과가 달라짐
    - (국내 적용 시) 대규모 전원단지와 원거리인 수도권 LMP가 상승, 발전-수요간 차액은 송전선로 확충(Investment)등으로 활용

#### < ㉠ 송전제약 미고려 >



- 출력결정 : G<sub>1</sub>(200MW), G<sub>2</sub>(0MW)
- 발전비용 : 2,000원
- LMP<sub>1</sub> : 10원, LMP<sub>2</sub> : 10원

#### < ㉡ 송전제약 고려 >



- 출력결정 : G<sub>1</sub>(150MW), G<sub>2</sub>(50MW)
- 발전비용 : 2,250원
- LMP<sub>1</sub> : 10원, LMP<sub>2</sub> : 15원

3) 서비스 권역 약 900,000 square miles

□ (시장운영절차) 하루전(DA) 및 실시간(RT) 에너지-예비력 시장

【MISO社 에너지-예비력 시장 Timeline】

시작시간	종료시간	주요 절차
<b>사전 실시간 에너지-예비력 시간 신뢰성 검토(RAC/LCA)<sup>①</sup></b>		
D-7 00:00	D-1 24:00	사전 실시간 시장(계통) 신뢰성 검토 -RAC(Realiablity Assessment Commitment) -LCA(Look Ahead Commitment)
<b>하루전 에너지-예비력(DA) 시장 운영<sup>②</sup></b>		
D-7 00:00	D-1 10:30	DA 시장 준비
	D-1 10:30	DA 시장 종료
	D-1 13:30	DA 시장 결과('사전 LMP, MCP*' 가격 포함) 공표 *MCP(Market Clearing Price) : 예비력 가격
D-1 13:30	D-1 16:30	DA 시장 '사후 LMP, MCP' 공표
<b>DA 이후(Post) 실시간 에너지-예비력(RT) 시장 신뢰성 검토(RAC)<sup>③</sup></b>		
D-1 13:30	D-1 14:30	DA 조정
	D-1 18:00	DA 이후 RAC 수행
D-1 18:00	D 00:00	기동정지 공표(RAC 검토결과)
<b>당일 실시간 에너지-예비력(RT) 시장 신뢰성 검토(RAC)<sup>④</sup></b>		
D-1 20:00	D 24:00	당일 RAC 검토 시간 영역
<b>실시간 에너지-예비력(RT) 시장 운영<sup>⑤</sup></b>		
D-1 23:30	D (실시간)	실시간 RT 시간 영역
	D (-30분)	실시간 RT 시장 종료
	D (매5분)	발전기 기준출력 송출(Local BA EMS) 및 공표
	D (실시간)	4초 단위 AGC 목표값 송출

## ① 사전 실시간 에너지/예비력 시간 신뢰성 검토(RAC/LCA)

- (목적) 최대 7일간 전력수급 및 예비력 적정성 등 평가
- (RAC) SCUC 사용(1시간 단위), 목적함수는 비용 최소화
  - 유통스케줄, 예비력 요구사항, 발전기 특성 등을 제약으로 고려
  - 기동 소요시간이 긴(24시간 이상) 자원에 대한 스케줄링
  - 발전 및 송전 휴전, 고장 등 필요시 수행

☞ 수급 불균형(과부족) 조건 발생시 시장참여자 상황 전과 등 대처

- (LAC) SCUC 사용(15~30분 단위), 비용 최소화
  - 운영시간 4시간 전 ~ 실시간 급전 15분 전, 필요시 수행

☞ 수급 불균형 조건 발생시 비상(Emergency) 한계치 적용 고려 등

### <참고> MISO社 SCUC

□ SCUC(Security Constrained Unit Commitment) : 안전도 제약 기동정지계획

- 혼합정수법\*(MIP, Mixed Integer Programming) 기반 솔버 사용
  - Dual Gap\*\*은 최대 0.1% 허용(DA 시장에서 대부분 0.1% 이하에서 수렴)
  - \* 혼합정수법 : 모든 제약조건을 정수형(On/Off) 및 실수형(MW) 변수의 선형결합으로 표현하여 해를 찾는 방법 (KPX 통합UC와 동일)
  - \* Dual Gap(%) : MIP의 해찾기에서 사용하는 상한-하한의 차이, 0%일 때 최적해
- 주요 고려 제약 (비용(가격)은 선형화 사용)
  - 발전제약 : 기동시간, 최소운전시간 등 발전기 물리적 특성 및 운영예비력 등
  - 송전제약 : 사전 지정 송전선로 한계치 대상 민감도\*(Shift Factor) 방식 적용
    - \* 민감도 : 특정 발전기 출력을 1MW 변화시켰을 때, 특정 선로의 조류 변화율로 MISO사 SCUC의 경우 네트워크 토폴로지를 적용하지는 않음

SCUC 최적화 수식 :

MINIMIZE {기동비용, 에너지 비용, 예비력 비용 등}  
With (발전제약, 송전제약 등)

- 결과 : 발전기 기동·정지 플래그 및 예비력 플래그 등 ※ 시장가격 미산출

## ② 하루전 에너지-예비력(DA) 시장 운영

- (시장참여자) 발전자원, 수요 등 시장참여자 DA 시장 입찰
- (MISO) SCUC와 SCED를 사용하여 발전기 기동·정지 스케줄링 및 LMP·MCP(사전/사후\*) 계산

\* 사전/사후 LMP 차이점 : 일부 고속기동자원(Fast Start Resouce) 고려 여부 등

### <참고> MISO社 SCED

□ SCED(Security Constrained Economic Dispatch) : 안전도 제약 경제급전

- 최적화는 선형계획법(LP, Linear Programming) 사용, DC-OPF 기반
  - \* DC-OPF(Optimal Power Flow, 최적조류계산) : 유효전력 대상 최적화를 수행하며 발전 및 부하 등 모든 모선에 대한 LMP 계산이 가능(네트워크 모델 사용)
- (DA)SCUC 시간별 기동정지 계획(결과)에 대해 SCED 수행 → LMP 계산
  - 전력계통 데이터 : 오프라인 네트워크 토폴로지 사용(분기별 갱신)
- (RT)5분 주기로 10분 후(수요예측)에 대해 SCED 수행 → LMP 계산
  - 전력계통 데이터 : EMS 실시간 상태추정 네트워크 토폴로지 사용
- 주요 고려 제약 (비용(가격)은 선형화 사용)
  - 발전제약 : 발전기 상하한 등 발전기 특성 및 운영예비력 등
  - 송전제약 : 모선 입출력 평형, 송전선로 한계치, 상정고장(민감도 방식) 등

SCED 최적화 수식 :  
MINIMIZE {에너지 비용, 예비력 비용 등}  
With (발전제약, 송전제약 등)

- 결과 : 발전기별 급전계획값, 시장가격(LMP, MCP) 등

## ③ DA 이후(Post) RT 시장 신뢰성 검토(RAC)

- (RAC) SCUC 사용(1시간단위), 익일에 대한 분석 진행
  - 18시 이후 발전기 기동정지(최소출력 포함) 계획 공표

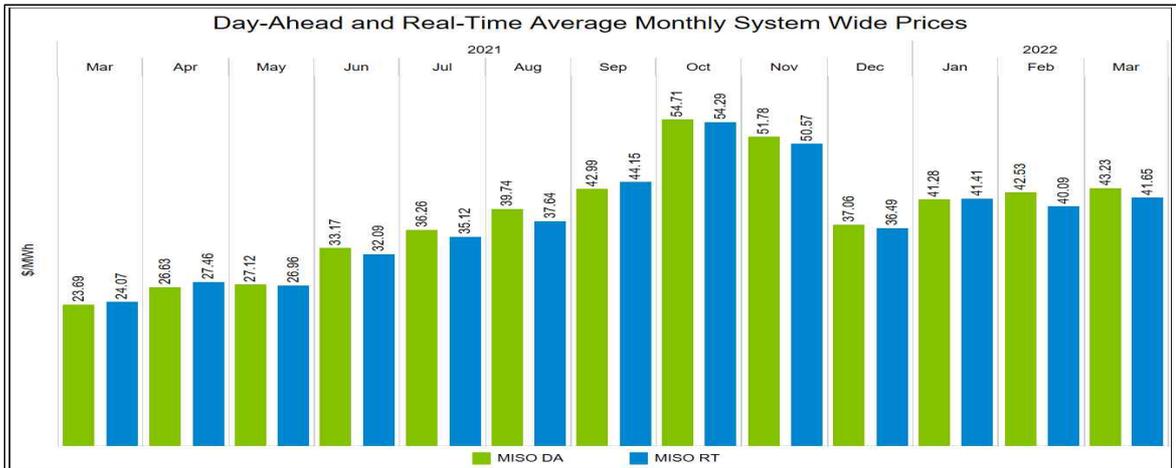
## ④ 당일 RT 시장 신뢰성 검토(RAC)

- (RAC) D-1 18시~D 24시까지 필요시 검토
- (LAC) 운영시간 4시간 전 ~ 실시간 급전 15분 전 필요시 수행

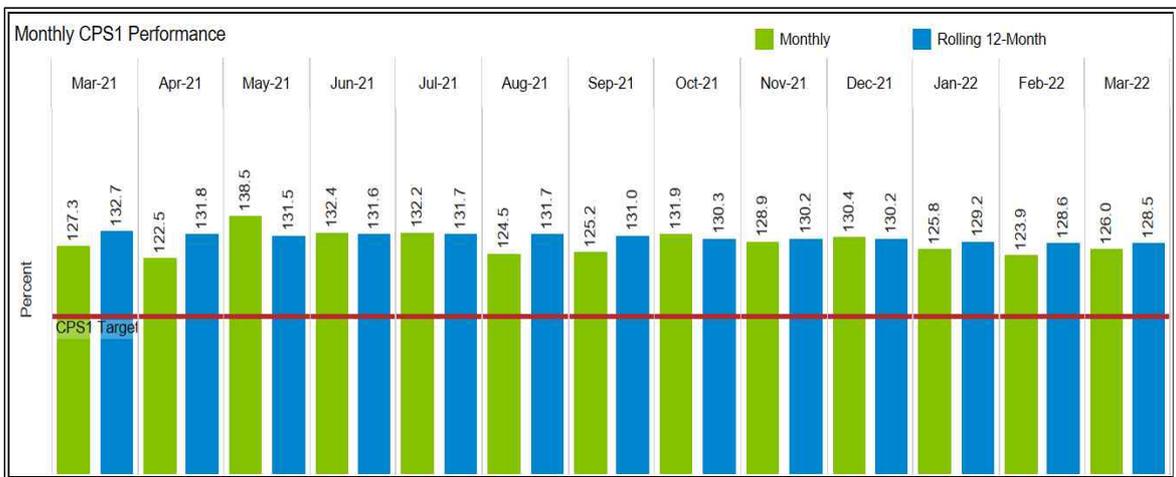
## ⑤ RT 시장 운영

- (시장참여자) 발전, 수요 등 시장참여자 30분 단위 입찰
- (MISO) SCED 사용, 5분 단위 LMP·MCP(사전/사후) 계산
  - EMS AGC를 통해 4초 단위로 발전기 제어

【MISO 월별 평균 전력가격 (DA-RT 차이 평균 -2%)】



□ (주파수 품질) 주파수 제어 품질은 CPS1\*으로 감시되며, '22년 3월 기준 12개월 평균값이 128.50 (참고로 KPX는 174)



\* CPS1(Control Performance Standard)  

$$CPS1 \text{ 산출식} = 2 - \frac{(\Delta F_{min})^2}{\epsilon^2}$$
 (기준 만족 조건 :  $1.0 < CPS1 < 2.0$ )  
 •  $\Delta F_{min}$  : 계통주파수 - 기준주파수(60Hz), • 주파수허용편차( $\epsilon$ ) : 0.018Hz (MISO 기준)

□ EMS 전력계통 모델 규모(2019년 기준)

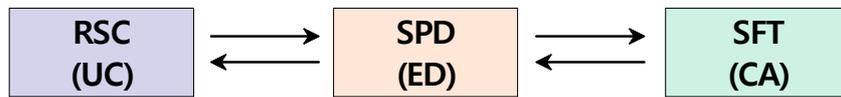
[단위 : 개]

구분	내부	외부	합계
Network Buses	18,400	30,200	48,600
SCADA data points	158,600	135,700	294,300
Generating Units	1,700	4,900	6,600
Loads	14,100	25,500	39,600

**<참고> PJM社 하루전 시장운영 SW**

- RSC(Resource Scheduling & Commitment) : 안전도 제약 기동정지계획
  - 혼합정수법(MIP, Mixed Integer Programming) 기반 솔버 사용
  - 주요 고려 제약
    - 발전계약 : 기동시간, 최소운전시간 등 발전기 물리적 특성 및 운영예비력 등
    - 송전계약 : 사전 지정 송전선로 제약 적용 (민감도 방식으로 추정)
  - 결과 : 발전기 기동·정지 계획 등 ※ 시장가격 미산출
- SPD(Scheduling, Pricing & Dispatch) : 안전도제약경제급전 개념
  - RSC 시간별 기동정지 계획에 대해 발전기 출력 결정 → LMP\* 계산
  - \* DC-OPF 기반으로 추정(모든 발전소 및 부하에 대해 LMP를 계산)
- SFT(Simultaneous Feasibility Test) : AC 기반 상정사고분석 등 안전도 평가
  - SPD ED값 기반 상정사고(CA) 과부하, 전압위반 등 분석 후 결과송부(→SPD)

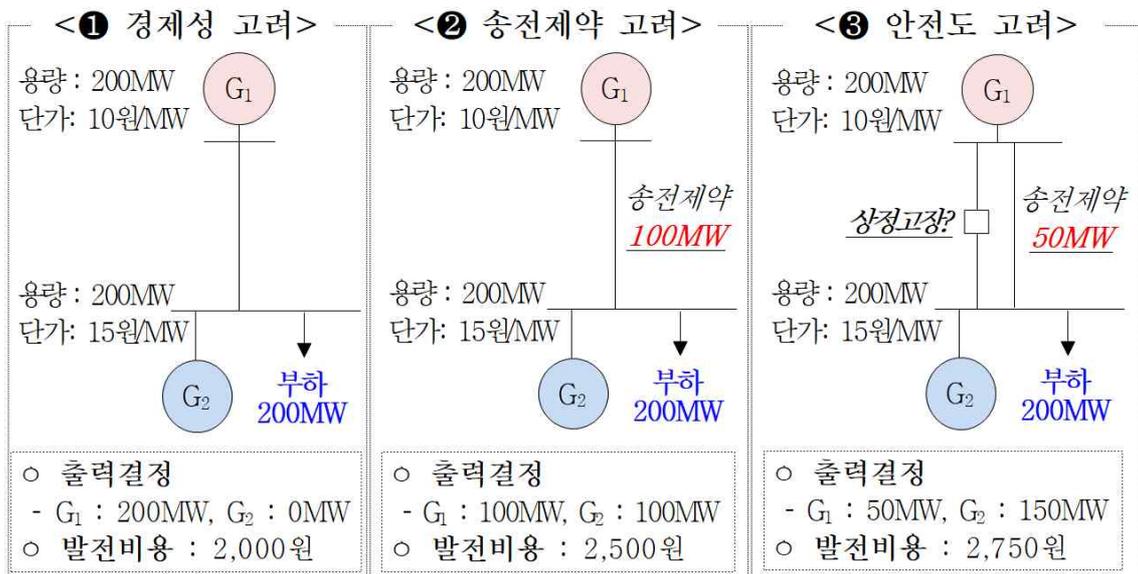
<PJM社 DA SW 흐름도>



※ AC기반 전력계통 평가(전압 고려 가능)를 통해 DC-OPF 기반의 한계를 극복 하기는 했지만, 동시 최적화(UC+ED+CA)는 아니기에 일정 한계는 존재

**<참고> SCED(안전도제약경제급전)**

- 전력계통의 경제성<sup>①</sup>(Economic)과 제약<sup>②</sup>(Constrained) 및 안전도<sup>③</sup>(Security)를 동시 고려한 최적화(국내의 경우 민감도 기법\* 사용) 기능



※ 민감도(Shift Factor) : 특정 발전기 출력을 1MW 변화시켰을 때, 특정 선로 조류 변화율

❖ 조사내용 요약

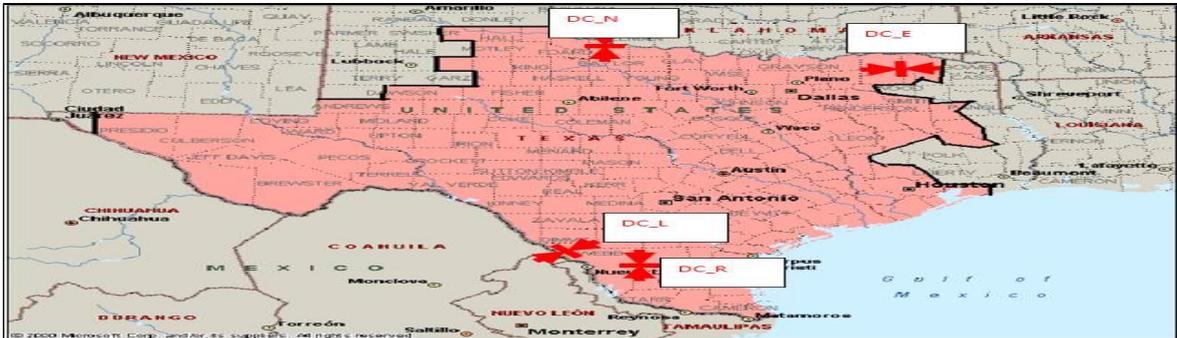
구분	조사 내용	시사점
계통 형태	연계계통	·미중부 15개 주 및 캐나다 일부지역 관할, 11개 용통선로 보유 등 최대영역 서비스 →(국내대비)발전설비 약15배, EMS취득 약2배
전원 MIX	석탄(33%), 가스(28%), 풍력(20%), 원자력(15%), 수력(2%), 기타(1%)	·석탄, 가스, 풍력 위주 운영 (5MW이상 발전자원 관리) →국내 전원MIX와 유사한 구조
전력 시장	하루전에너지-예비력시장 실시간에너지-예비력시장 (Co-Optimization)	·KPX가 추진 예정인 AS 및 실시간 시장 운영 →송전제약까지 고려한 하루전시장운영 →실시간시장과 가격 편차 최소화 (DA SCUC 및 DA SCED 활용)
주파수 품질 (CPS1)	128.5%	·최저 관리 수준(100%) 보다 약간 높은 주파수 품질 유지 →KPX 유지수준(171)보다 다소 낮은 수준
SE 품질	허용오차(±50MW)	→KPX와 동일한 오차허용 범위
재생E 출력 제한	전력시장기반 출력제한	·재생E AS참여 가능, 별도 보상체계 無 →(차기EMS) IoT기반 재생E 취득제어, DSA기반 재생E 출력제한 기능 개발예정. 다만, 출력제한 기준 등 관련제도 마련 필요
재생E 예측	풍력·태양광 외부예측서비스 활용	·실시간 가격에 직접적 영향을 주는 재생E 예측값 객관성 확보 →(차기EMS)재생E관제시스템(재생E예측, KPX내부시스템)과 데이터 연계제공 예정
배전 연계	현재 미고려	·EMS와 배전연계 필요성은 동의하지만, 구체적 방안은 논의 중 →(차기EMS)한전SCADA경유 배전시스템 데이터 연계는 가능
PMU 활용	약 360개 규모 설치	·전력계통 진동감시 등에 활용 (현재 활용범위가 높지는 않지만 전기적 아일랜드 발생 등 활용가능) ·EMS와는 분리하여 운영 →(차기EMS)별도시스템 개발시 연계가능
신기술 (AI 등)	현재 미고려	·전력계통 제약예측 등에 활용 희망 →(차기EMS)분산처리, AI기술 등 신규 개발 기능은 방문기관 적용사례 없음

[붙임2]

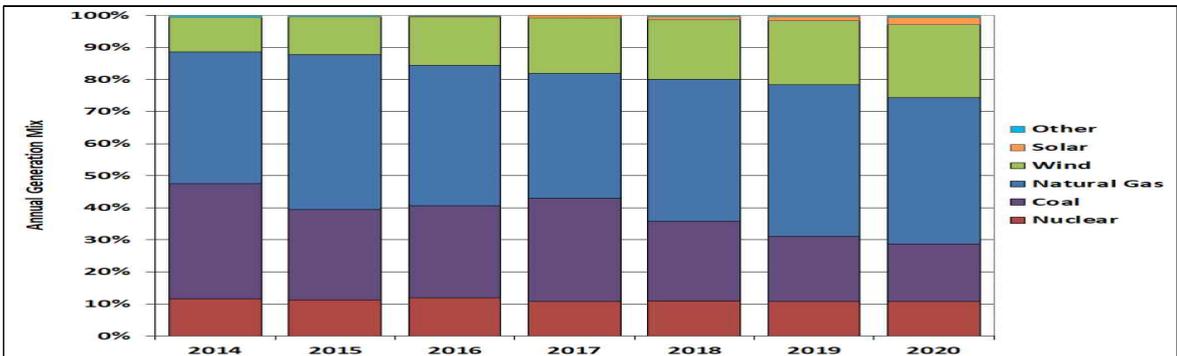
## ERCOT社 운영조사 세부내용

- (기관개요) 텍사스州 대부분에 전력서비스를 제공하는 전력 계통운영자
- (계통특징) 미국에서 전기 소비량이 가장 높은 지역으로 국내와 유사하게 다른 지역과 송전계통이 분리된 독립 전력계통 형태 (단, 북부-서부 등 4개의 직류송전선로(DC, 양방향 가능) 보유, 필요시 융통)

【ERCOT 직류연계선로】



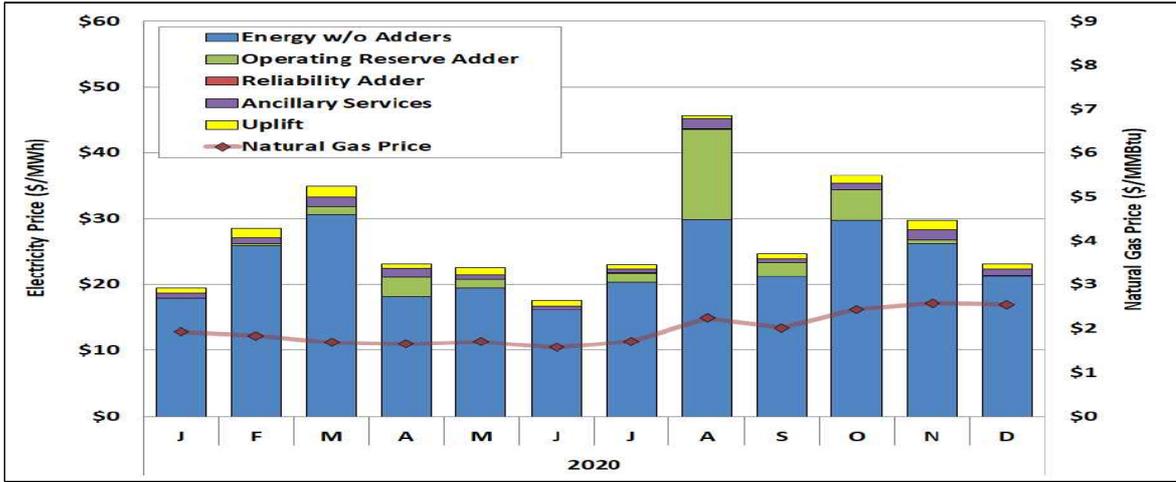
- (전원MIX) 가스(51%), 풍력(25%), 석탄(13%), 원자력(5%), 태양광(4%)
  - 재생E(7.7GW 신규), 가스(0.4GW 신규) 증가, 석탄 감소(0.1GW) ('20년 기준)
  - \* ERCOT 미등록 소형 발전기 용량은 1,227MW(태양광 : 1,153, 풍력 : 5.5, 기타 : 68.5)



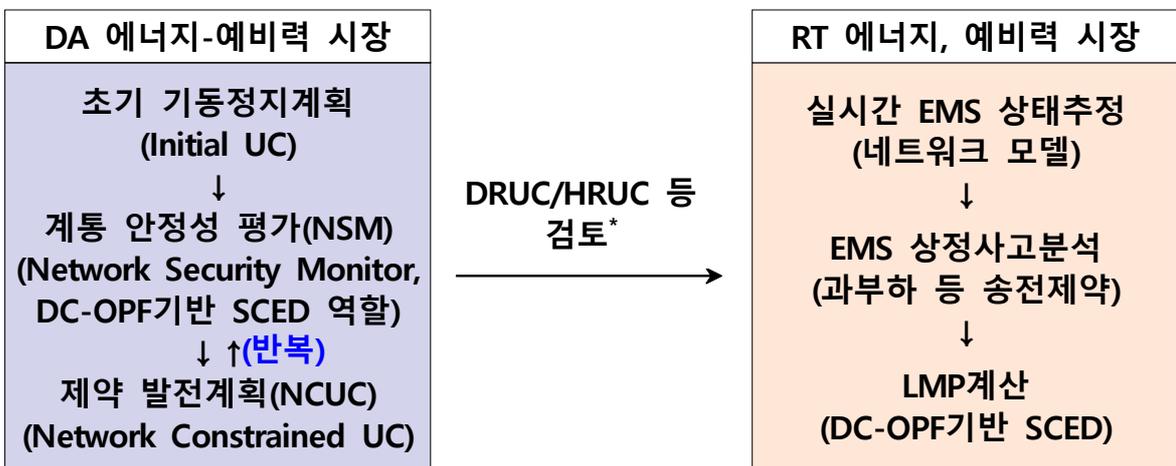
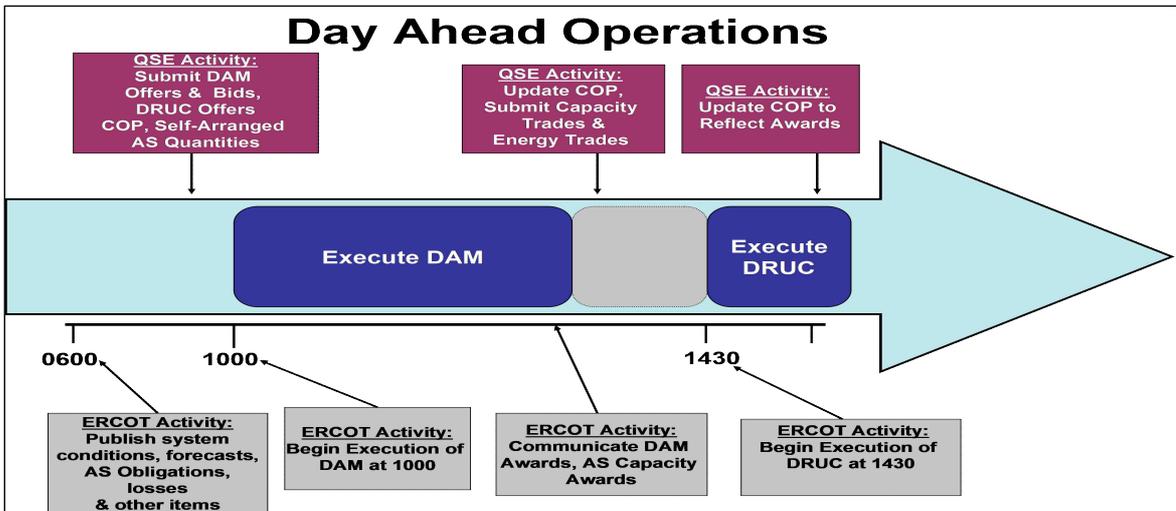
구분	최대수요(MW)	발전설비	송전선로	변압기	모선
ERCOT	74,328	710	7,173	1,967	6,717
(참고)KPX	89,091	437	2,561	4,090	3,269

- (시장운영) ①쌍무계약시장(Bilateral Market), ②하루전 보조서비스(AS) 시장, ③하루전 에너지 시장, ④실시간 에너지 시장

【ERCOT 전력가격 구성】



- (절차) 하루전(DA) 에너지-예비력 시장 및 실시간(RT) 에너지 시장



\* DA 이후 RT 까지 지속적으로 수급 및 계통 안정성 평가(하루전 및 1시간 단위)

□ (주파수 품질) 주파수 제어 품질은 CPS1\*으로 감시되며, '21년 9월 기준 12개월 평균값이 168.70 (북미에서 가장 좋은 품질, 참고로 KPX는 174)

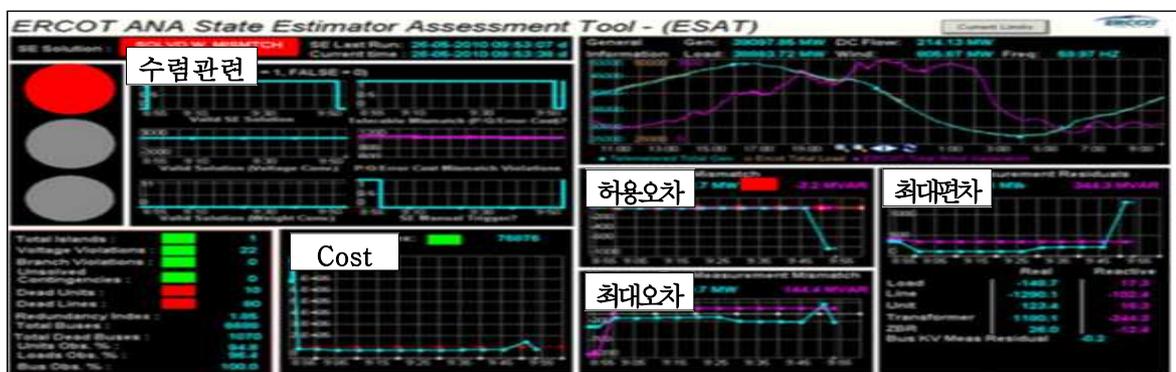


\* CPS1(Control Performance Standard)  
 • CPS1 산출식 =  $2 - \frac{(\Delta F_{min})^2}{\epsilon^2}$  (기준 만족 조건 :  $1.0 < CPS1 < 2.0$ )  
 •  $\Delta F_{min}$  : 계통주파수 - 기준주파수(60Hz), • 주파수허용편차( $\epsilon$ ) : 0.03Hz (ERCOT 기준)

□ (상태추정(SE) 품질) 다수 Index 활용, 상태추정 품질 실시간 감시  
 ○ 상태추정(State Estimation)은 실시간 에너지 시장에서 가격결정을 위한 안전도제약경제급전(SCED, Security Constrained Economic Dispatch)의 중요자료 생성

구분	수렴여부	Cost <sup>①</sup>	허용오차 <sup>②</sup>	최대오차 <sup>③</sup>	최대편차 <sup>④</sup>
ERCOT	감시	감시	±15MW	감시	감시
(참고)KPX	감시	미감시	±50MW	감시	미감시

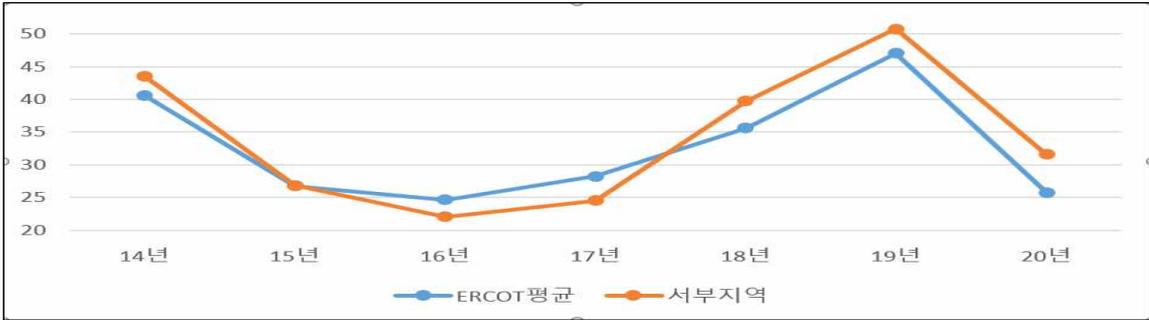
- ① Cost : 상태추정에서 활용하는 목적함수로 취득값과 추정값의 차이를 최소화
- ② 허용오차(Bus Mismatch) : 모선단위 MW 및 MVar의 합산값(참값은 0이어야 함)
- ③ 최대오차 : 허용오차 중 최대값 (월단위 평균오차 : 7.5MW, '21.12월 기준)
- ④ 최대편차 : 취득값과 추정값 간 최대편차(일단위 편차 : 120MW, '22.1.19일 기준)



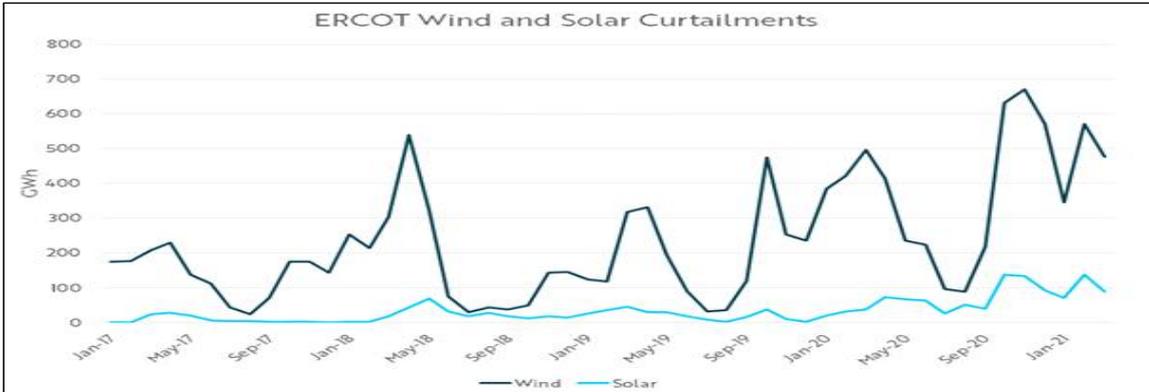
□ (재생E 출력제한) 재생E 출력제한(Curtailment)는 주로 송전선로용량 제약 및 풍력 등 과발전(야간)으로 발생

○ 두 경우 모두 전력시장 기반으로 결정(SCED 제약조건)되기 때문에 출력제한에 대한 별도 보상체계는 없음

- '18년 이후 재생E 출력제한이 발생하자 서부(ERCOT 4개 지역 중 가장 높은 재생E 자원 보유)지역 시장가격이 ERCOT 평균보다 상승

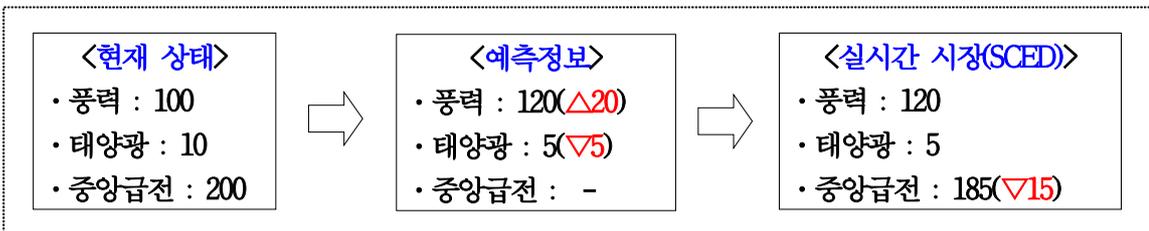


【연간 재생E 출력제한 사례('20년 기준, 전체 풍력 발전량 5%, 태양광 10%)】



□ (재생E 예측) 풍력 및 태양광 예측은 외부업체(2개 이상)의 예측 서비스를 사용하여 SCED에서 활용

○ ERCOT(실시간 출력 등 제공) ↔ 외부업체(168시간 풍력, 태양광 예측)



\* 만약 출력조정 가능 재생E 시, 중앙급전발전기로 취급하여 SCED 제어 시행

□ (재생E 대응기술) 재생E 불확실성 고려를 위해 CAT (Capacity Availability Tool) 활용

- 과거 부하패턴 자료 등을 기반으로 향후 6시간 내 재생E로 인한 램핑 Risk가 높다고 판단 시 추가 예비력 확보(관제사 판단)
- 가상발전소(VPP)는 현재도 논의 중으로, 발전 VPP는 미허용 중이나 부하자원 VPP는 제한적\*으로 허용

\* 부하자원집합(aggregation)은 해당 부하존(zone)의 하계 최대부하 5% 이하 제한

□ (배전연계) EMS와 배전시스템(DAS)간 직접적 연결은 현재 까지 미고려

□ (PMU) 20MVA 이상 발전설비 PMU 설치 의무화('17.1월)

- 현재 총 109개 PMU(47개 장소)가 설치 운영중으로 EMS와 분리하여 별도 운영 중

【PMU를 통한 풍력 발전기 출력진동(Oscillation) 확인 및 조치】



- \* PMU(Phasor measurement Unit) : 동기화된 위상 초단기(msec) 측정을 통해 안정도 해석 등에 활용하며 국내는 약 50여개소('17년 기준) 설치(신재생 기술팀 연구과제 진행 중)

□ (대규모 프로젝트 사례) '05년 Zonal → Nodal시장 전환 프로젝트

- (비용) \$125,000,000 → \$550,000,000(약 6,600억원)으로 증가
- (기간/구축범위) 6년 / EMS 및 시장운영시스템 등
  - 구축업체 : AREVA(EMS), ABB(MMS), Simens(NMMS), Nexant(CRR) 등

## ❖ 조사내용 요약

구분	조사 내용	시사점
계통 형태	독립계통 (직류용통선로(4) 보유)	·KPX와 동일한 독립계통으로 운영 ·용통선로 보유로 유사시 대응력 유리
전원 MIX	가스(51%), <b>풍력(25%)</b> , 석탄(13%), 원자력(5%), <b>태양광(4%)</b>	·재생E 3020과 유사한 전원분포 (1MW이상 발전자원 관리)
전력 시장	쌍무계약시장 하루전에너지-AS시장 실시간에너지시장	·KPX가 추진 예정인 AS 및 실시간 시장 운영 ·실시간에너지-AS시장 연계는 고려중 (Co-Optimization)
주파수 품질 (CPS1)	168% (북미 최고수준)	·재생E 비율(29%)을 고려시 상당한 주파수 품질 유지(용통선로 최소한 활용)
SE 품질	허용오차(±15MW) 실시간 품질 감시	·실시간 가격(LMP) 정확성 확보를 위해 높은 수준의 품질 유지(KPX 허용오차 ±50MW) → <b>차기EMS 품질감시 및 제고방안 반영</b>
재생E 출력 제한실적 (연간)	풍력발전량 : 5% 태양광발전량 : 10%	·재생E AS서비스 참여가능 ·Curtailment는 전력시장 기반으로 결정, 주로 선로용량 제약으로 발생(야간 풍력 과발전) ·별도 보상체계는 없음
재생E 예측	풍력·태양광 외부예측서비스 활용	·실시간 가격에 직접적 영향을 주는 재생E 예측값 객관성 확보
재생E 대응	재생E로 인한 Ramping Risk 감시 도구 활용	·재생E 변동성 대응 도구(tool)로 → <b>차기EMS 전력계통 선행평가 기술과 유사</b>
배전 연계	현재 미고려	·EMS와 배전연계 필요성은 동의하지만, 구체적 목표는 논의 중
PMU 활용	PMU설치 의무화 (20MVA이상)	·발전기 특성자료 검토 및 재생E 진동감시 등에 활용 ·EMS와는 분리하여 운영
신기술 (AI 등)	현재 미고려	·보수적 전력분야에서 AI 등 신기술 도입까지는 시간이 필요해 보임

## BC Hydro社 기관 개요

### □ 기관개요

- 1961년 브리티시콜롬비아주 정부가 BC Electric company와 BC Commission을 통합하여 BC Hydro 설립
- 브리티시콜롬비아주 정부 소유의 전력 유틸리티(발전/송전/배전 통합운영)로 유틸리티위원회인 BCUC의 규제 하에 있음
- Powertech Labs(연구소) 및 Powerex(도매전력거래) 자회사 소유

### □ 계통운영

- 캐나다에서 3번째로 큰 에너지 공급자
  - BC주 95%, 약 4백만명 이상 인구에 전력 공급
- 발전원 대부분은 수력으로 구성
  - 수력(98%), 석탄(0.9%), 천연가스(0.5%)

최대수요(MW)	설비용량(MW)	발전설비(개)	변전소(개)
10,194	12,204	50	300

\* BC주 정책상 전체 전력 생산량의 90%이상을 클린 에너지로 공급 해야함

- 발전, 송전, 배전 및 외부 인터커넥션을 가지고 100kV 이상 전압레벨 운영
  - 송전선로 20,000km, 배전선로 55,000km 이상
- 2019년 9월 신뢰도조정자(Reliability Coordinator)로 지정
  - BC주 안정적 계통운영을 위한 최상위 권한과 책임을 부여
  - Western Electricity Coordinating Council region 관리

### □ 제어센터

- 2개의 제어센터 운영(Fraser valley, Southern Interior)
- EMS, DMS 등 GE社 프로그램으로 실시간 전력계통 운영

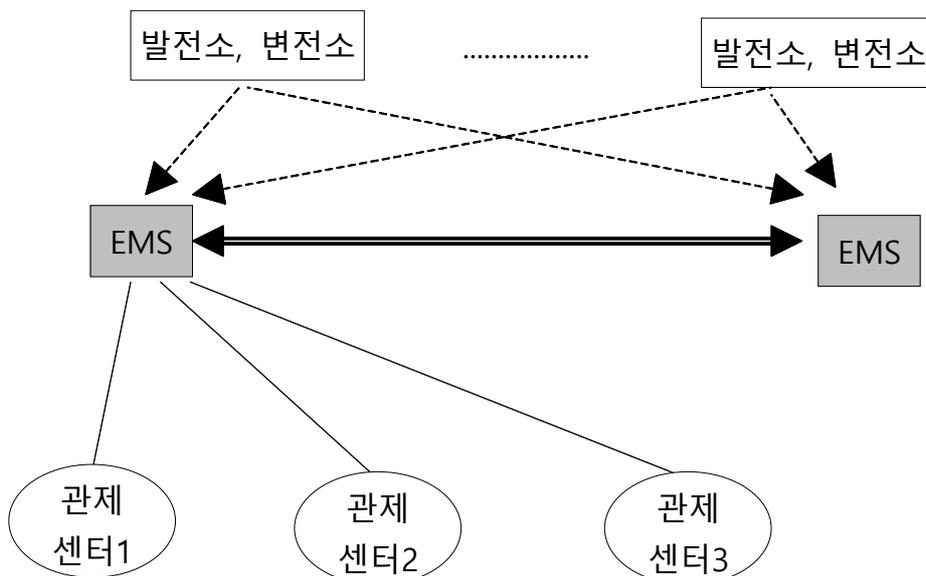
## 계통 및 관제운영 조사 세부내용

### □ 전력관제센터 구성

국가	기관	관제센터 위치			거리	비고
		중앙센터 (①)	후비센터 (②)	제2후비센터 (③)		
미국	ERCOT	Taylor	Bastrop	-	①~② 43km	-
	MISO	Carmel 인디애나폴리스 州	Sheridan 인디애나폴리스 州	Little Rock 아칸소 州 (관제편입)	①~② 27km ①~③ 970km	-
캐나다	BC Hydro	Fraser Valley	Okanagan	-	①~② 320km	Dual Primary

### MISO

- 총 3개소의 전력관제센터를 운영, 2개소에 EMS를 설치 및 상호 백업
- 전력관제센터는 하나의 EMS로부터 데이터를 취득하는 구조, 관제센터간의 백업기능과 EMS 기능정지시 잔여 EMS로부터의 자료취득 대응
- ☞ 한국과는 다른 EMS와 관제체계 구성이 다름, 장점에 대한 분석 필요



## ERCOT

- 총 2개소의 전력관제센터를 운영, 30mile 떨어진 곳에 소재함, 오스틴 공항근처 사무실(법률분야 등, 외부회의 주로 시행)을 포함하여 3개소의 분리된 사무공간 운영

## BC Hydro

- 총 2개소의 전력관제센터를 듀얼 프라이머리로 운영
- 캐나다 동부 British Columbia州的 전력공급을 담당하는 발전, 송전, 배전 및 판매를 모두 수행하는 수직 독점회사임

## □ 실시간 관제조직

### MISO

- 1개 근무조에 9명 근무, 12시간(05시~17시) 맞교대
  - Shift Manager, Reliability Coordinator, Reliability Engineer, Generation, UDS(Unit Dispatch System, 5분주기 실시간 UC)담당
- 12시간 맞교대로 근무강도 높음, 6주 근무 후 3주 휴가, 전반적으로 젊은 세대는 근무를 기피하는 반면, 많은 휴가 및 높은 보상에 15년 이상 고경력자도 다수임
- 야간근무시간 동안 별도의 휴게시간 부여하지 않아, 수면剥夺 등의 근무 공간은 없음

### ERCOT

- 1개 근무조에 8명 근무, 12시간(05시~17시) 맞교대
  - Shift Manager(1), Generation(2), Transmission(2), RUC(Reliability Unit Commitment, 15분 주기 실시간 UC(1), Reliability&Renewable Engineer(1), Shigt Engineer(1)

- 12시간 맞교대로 근무강도 높음, 6주 근무 후 2주 휴가, 야간 근무시간 동안 별도의 휴게시간 부여하지 않아, 수면剥夺 등의 근무 공간은 없음

## BC Hydro

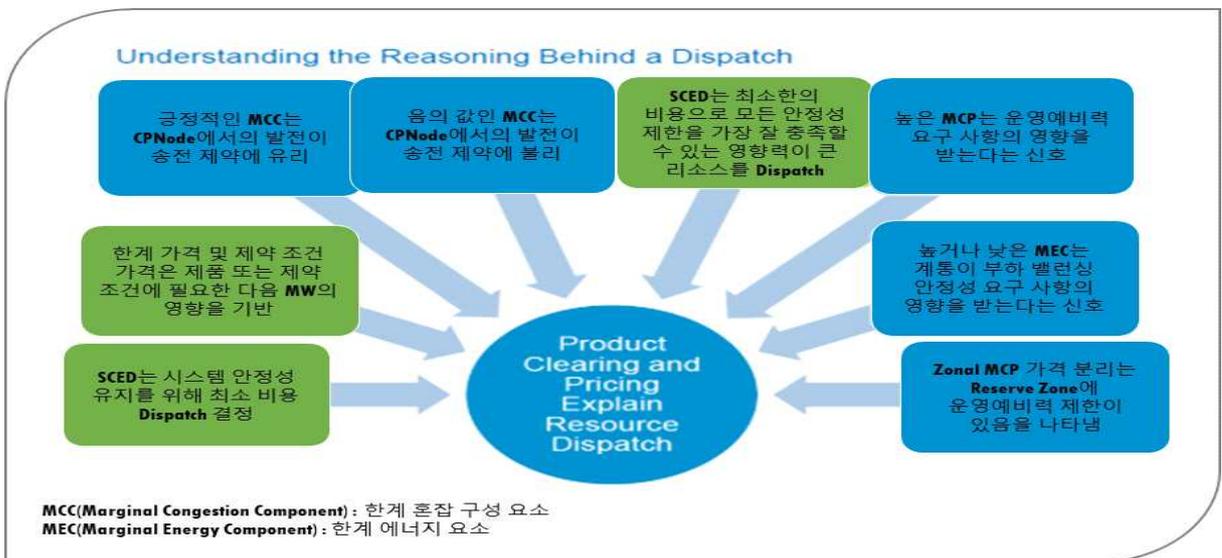
- 관제센터에는 배전망 및 송전망을 함께 관제하며, 1개 근무조에 총 19명이 12시간(06시~18시) 맞교대형태로 근무함
  - Shift Manager(1), Distribution(10), Transmission(4), Transmission Coordinator(1), Plant Operator(1, 50MW ↓ 소규모 발전기), Generation(1, AGC 운영), Interchange Operator(1)
- 야간근무시는 Distribution(2), Transmission(2) 로 인원이 줄어듦
- 12시간 맞교대로 근무강도 높음, 총 6주 근무 후 2주 휴가 (D-D-M-M-X-X-X-X를 4회 반복후 15일 휴가), 야간근무 시간 동안 별도의 휴게시간 부여하지 않아, 수면剥夺 등의 근무 공간은 없음
- ☞ 관제센터에 별도의 Wall Board가 없고, 각 자리에 8개의 화면으로 계통운영하고 있는 점이 타 ISO와 다름
- ☞ BC Hydro는 별도의 관제사 훈련팀은 없으나, 훈련담당 Manager를 1명 지정하고 있으며, NERC의 70시간 과정 수료 자격증 취득을 통한 훈련을 시행하고 있음. 또한 급전훈련원시스템(DTS) 운용인력이 3명으로 사후 계통의 재현과 새로운 시나리오 개발에 활용

## □ 실시간 계통운영

### MISO

- 1분 주기 상태추정(SE. Unified Single Pass State Estimation), 2분 주기 RTC(실시간 제어), 13,000개의 상정고장해석 처리, Cascading Contingency(n-1-1)처리하는 알고리즘 탑재

- ☞ 국내의 4,000개 수준의 상정고장 처리의 3배 수준의 연산을 빠른속도로 처리함, 이는 36개 CPU를 통한 가상연산(virtual)과 병렬연산(Parallel Process) 기법을 적용함
- Constraint Management를 통해서 관제사의 수동개입을 할 수 있도록 되어 있음
- 실시간 급전지시



## ERCOT

- 10MW 이상의 1,240대의 발전기에 대한 정보취득, GF운전을 통하여 관제
- 송전부분 4초 주기, 배전부분 1분 주기의 실시간 자료 취득
- 북미계통은 동부, 서부, 텍사스 계통으로 3개로 구분됨, 로키 마운틴등 지리적 제약에 따른 전기적 계통분리 형태
- 텍사스계통은 DC로 3개 선로로 멕시코와, 2개 선로로 동부계통과 연계됨, DC도 Back-to Back 방식의 설비이며, STATCOM, Series Capacitor, 동기조상기 설비가 관내에 설치되어 있음
- 고장전류가 너무 작아서 동기조상기를 운영
- ESS는 59.91Hz에 1% 와 5% droop 특성으로 응답하는 설비 운영

○ 실시간 급전지시



**BC Hydro**

- 미국 서부 계통을 관장하는 CAISO와 전력망이 연계되어 있으며, 수력발전을 기반으로 저가의 전력을 수출하고, 캘리포니아의 태양광 전력이 급상승하여 관내 공급이 어려울 때 저가로 매입하고 있음
- 전력설비(발전기, 변압기, 계전기 등)은 글로벌 제품들로 다양하게 도입되어 운영되고 있으나, 이를 관제하는 배전운영시스템(DMS), 계통운영시스템(EMS)은 GE社의 제품을 사용하여 일관성을 확보하고 있으며, 7년 주기로 업그레이드 주기를 가지고 있음

□ 시각동기위상측정장치(PMU)의 계통운영 활용

**MISO**

- MISO 관내 전기사업자가 설치한 360개의 PMU는 실시간 정보를 MISO에 제공하여야 하며, 이를 규정에서 정하고 있음
- 제공받은 PMU 정보를 보다 효과적으로 활용하기 위한 방안을 모색 중임

**ERCOT**

- ERCOT 관내 전기사업자가 설치한 PMU는 실시간 정보를 ERCOT에 제공하여야 하며, 이를 규정에서 정하고 있음
- 제공받은 PMU 정보를 보다 효과적으로 활용하기 위한 방안을 모색 중임

**BC Hydro**

- BC Hydro는 PMU는 실시간 정보를 가장 잘 활용하고 있는 대표적인 사례로써, 미국서부와 연계되는 장거리 송전선로로 인한 동요(Osilation)감시 등에 활용하고 있음
- 제공받은 PMU 정보를 보다 효과적으로 활용하기 위한 방안을 모색 중임

**□ 하루전발전계획의 적용 방법**

**MISO**

- 하루전 및 당일, 실시간 전력시장을 운영중, 제반 발전계획(UC) 시스템도 개별 시장에 따라 구비되어 운영중
- 하루전 시장은 가격결정을 위한 DAM(Day Ahead Market)과 신뢰도 발전계획인 RUC(Reliability Unit Commitment)로 구성됨

구 분	DAM(Day Ahead Market)	RUC(Reliability Unit Commitment)
전력수요	사업자가 입찰한 수요	MISO가 예측한 전문가 보정 수요
계통제약	반영	계통상황에 따른 추가 반영
운영예비력	동일하게 반영	

☞ 우리나라의 실계통운영기반 하루전시장 도입에 있어 가격결정과 계통운영을 위한 UC에서 고려하는 방식은 참조 필요

**ERCOT**

- 하루전 및 당일, 실시간 전력시장을 운영중, 제반 발전계획(UC)시스템도 개별 시장에 따라 구비되어 운영중
- MISO, PJM은 유사한 시장형태이나, ERCOT는 미국내에서도 상이하며, 선도시장이 활발히 발달되어 있음, QSE(Qualified Sheduling Entity), LSE(Load Serving Entity)가 제출한 수요와 발전계획을 기반으로 변동사항에 대한 Balancing하는 수급운영을 시행함, 하루전 시장은 가격결정을 위한 DAM(Day Ahead Market)과 신뢰도 발전계획인 RUC(Reliability Unit Commitment)로 구성되어 있음

구 분	DAM(Day Ahead Market)	RUC(Reliability Unit Commitment)
전력수요	LSE가 입찰한 수요	ERCOT가 예측한 전문가 보정 수요
계통제약	반영	좌측과 동일하게 반영
운영예비력	동일하게 반영	

- 보조서비스시장 체계는 Responsive reserve(GF)와 Regulation Up/Down service(AGC)와 Non-spinning reserve(30분이내)로 구분되어 있으며, AGC의 경우 예비력의 확보 시간에 대한 제약이 없음. 각각의 최소 확보해야할 확보량은 매년 이사회(Board)를 통해서 정하며, GF예비력은 2,300MW/2,800MW(Peak), Non-spinning은 1,430MW로 정하며, 특이한 것은 AGC는 별도로 최소 확보량을 정하지 않음

□ 수요 및 신재생 예측 관련 현황

**MISO**

- 수요예측부서가 별도로 존재하며, 기상예측은 수요예측 부서 내에서 담당

- 기상전문가(Meteorologist)는 1명이 있음
- 신재생예측은 자체적으로 하지는 않으며, 외부 기상예측 전문회사(독일회사)로부터 서비스를 받으며, 비용은 거래비용에서 회수함
  - 기상회사에 신재생 관련 설비정보 등을 제공하면, 기상회사는 필요한 시간대의 예측값을 제공

### ERCOT

- 수요예측부서가 별도로 존재하며, 기상예측은 수요예측 부서 내에서 담당
- 기상전문가는 1명이 있음
- 신재생예측은 자체적으로 하지는 않으며, 외부 기상예측 전문회사로부터 서비스를 받으며, 풍력은 VI社, Energy Mepo社, 태양광은 Mexa社 로부터 제공을 받고 있으며, 비용은 거래비용에서 회수함

### BC Hydro

- 수요예측부서가 별도로 존재하며, 기상예측은 수요예측 부서내에서 담당
- 기상전문가는 총 4명이 있으며, BC Hydro의 수요예측은 난이도가 높지 않으며, 이는 전원의 대부분을 차지하고 있는 수력의 수자원 운용을 위한 예측과 운영계획 수립을 위해 채용됨
- 소규모 비중을 차지하는 신재생 풍력은 별도의 예측을 하지 않고 있음

## □ 신재생 확대 대응 관제운영 기술

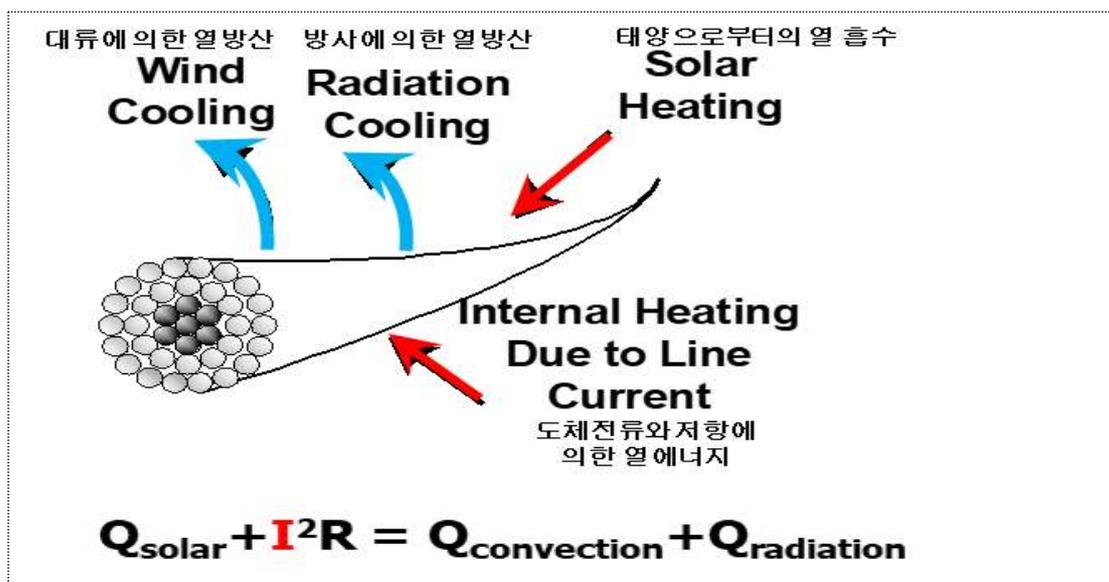
### 가. 동적선로용량(DLR, Dynamic Line Rating) 계통운영 적용

#### MISO

- 미국 FERC(연방에너지위원회)는 지난 5월19일 Order881-A를 발표하였으며, 송전선로용량에 대한 정확도와 투명성을 개선하는 방안으로 DLR을 적용토록 법제화하여, 2025년까지 적용하도록 함

- 송전선로의 동적용량을 산정하는 방법은 두 가지임. 송전선로에 센서를 취부하여 측정하는 방식과 산식에 의한 IEEE 계산방식임, 관내 송전선로의 72~80%가 적용되고 있었으며, 10%정도의 용량 증대 효과가 있었음
- FERC는 송전사업자는 DLR값을 제공해야 하며, 보호계전기 정정값 조정을 시행할 것을 지시함
- ☞ 신재생 수용성 확대를 위한 신기술의 대표사례로 송전선로 DLR은 매우 고무적인 사례, 정부 법제화를 통한 송전선로 확장의 투자와 운영의 효율성은 국내 도입 검토가 필요한 사례임

○ 동적선로용량(DLR) 산정방식



ERCOT

- 미국 FERC(연방에너지위원회) Order881-A에 의해 DLR이 공식화 됨
- ERCOT은 이미 현장에 적용를 수년전부터 해오고 있으며 69kV 송전선로의 30%, 138kV 선로의 85% 정도에 적용, 송전사업자 (TSP, Transmission Service Provider)가 관련 정보를 제공함

## 나. 실시간 계통관성(Inertia) 감시

### MISO

- 실시간에서 계통관성을 감시하는 시스템을 탑재하여 운영중

### ERCOT

- 실시간에서 계통관성을 감시하는 시스템을 탑재하여 운영중
- 하루전 계획에서 계통관성을 미고려하여 발전계획을 수립

### BC Hydro

- 계통관성 감시시스템은 현재 없으며, 향후 고려 사항임
- ☞ BC Hydro의 경우 관성(H)이 큰 수력기의 발전량 비중이 98%가 되는 상황에서 신재생 확대에 따른 관성 문제는 현안 사항이 아님
- ☞ 기후변화의 영향으로 캐나다의 강수량은 점점 더 많아지고, 기온은 올라, 캐나다 서북쪽의 얼음이 녹는 속도가 빨라져서 하류의 수자원이 넘치는 (Flooding)되는 상황을 우려

## 다. 전력전자 기반 재생E 계통 온라인 동적안정도 평가기술

### Powertech

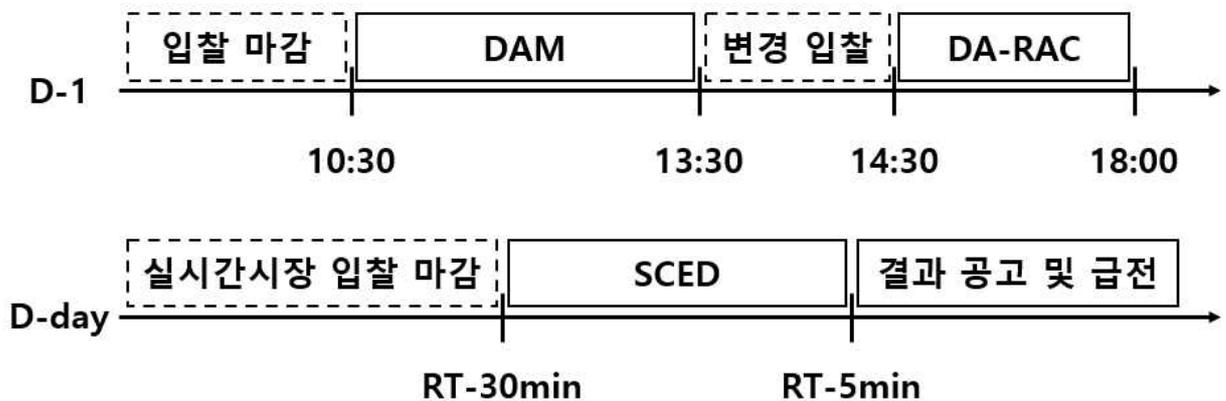
- DSA(Dynamic Security Assessment) 소프트웨어 개발사로 잘 알려진 Power Tech는 한국의 전기연구원과 전력연구원을 통합된 기능을 수행하는 BC Hydro의 자회사임
- BC Hydro의 기술적인 솔루션을 제공하고, 안정도 평가 기술에 대한 맞춤형 기술을 개발하여 적용하고 있음
- 한국은 온라인 SSAT(미소신호 안정도)를 최초로 도입하여 적용한 바 있으며, 현재 SSR(저주파 공진)을 온라인으로 접목하려는 접촉을 시도하고 있음

- 온라인 SSR의 가장 큰 도전 과제는 인근 FACTS, HVDC설비 등의 모델링과 온라인 자료 취득에 있어, 향후 한국의 온라인 SSR 적용의 사전 기초 연구로, 모델링 구축 연구가 선행 필요

## □ 전력도매시장 구조

### MISO

- 전력도매시장 연표



- 하루 전 시장

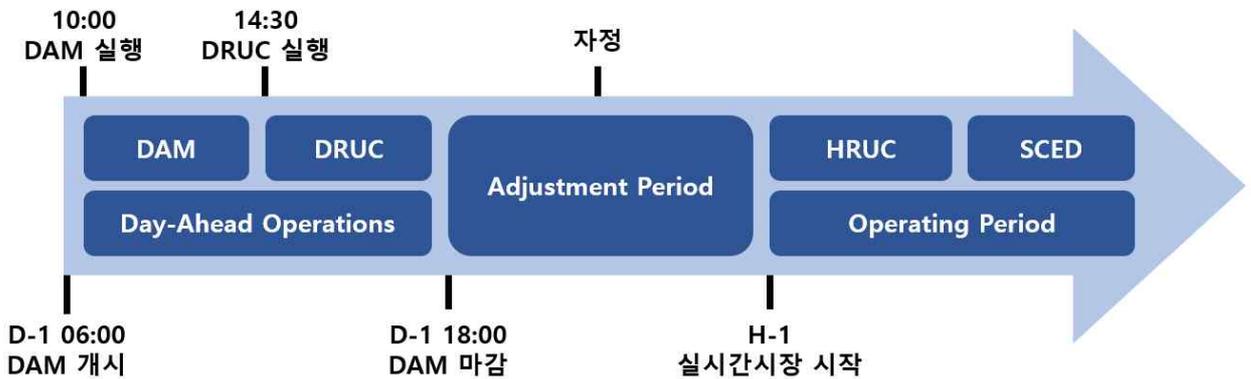
- (입찰) 하루 전 시장 입찰 마감(오전 10시 30분) 전까지 1시간 단위 입찰자료 제출
  - 하루 전 시장 발전계획 결과 공고 이후 PJM과 마찬가지로 변경 입찰(13:30~14:30) 진행, 변경 입찰을 실시간 시장 입찰로 대체하는 것으로 추정(1시간 단위 입찰)
- (DA-RAC, Day-Ahead Reliability Assessment Commitment) 변경 입찰을 기반으로 신뢰도기반 발전계획 수립
  - 입찰 부하가 아닌 **예측 부하**를 이용하여 발전계획 수립
  - 오후 6시까지 결과 공고
- (RAC-intraday) DA-RAC 결과 공고 이후(오후 6시)부터 자정 사이 실행 가능한 신뢰도 발전계획
  - **예측부하**를 기반으로 발전계획 수립

○ 실시간 시장

- (LAC, Look Ahead Commitment) 운영시점으로부터 4시간 전 ~ 15분 전에 실행 가능한 신뢰도발전계획
  - 예측부하를 기반으로 발전계획 수립
- (급전지시) 5분단위 급전지시 및 가격 결정

ERCOT

○ 전력도매시장 연표



○ 하루 전 시장

- (입찰) 하루 전 시장 입찰 마감(오전 10시) 전까지 1시간 단위 입찰자료 제출
  - QSEs(Qualified Scheduling Entities)가 발전기와 부하를 대신해 입찰 진행, 기동비용, 무부하비용, 공급곡선 세 개 항목 제출
- (DRUC, Day-ahead Reliability Unit Commitment)
  - 수요예측 자료를 기반으로 발전기 추가기동계획 수립
  - RUC에서는 공급곡선 입찰은 고려하지 않고 기동비용, 무부하비용 입찰을 기반으로 수립
- (조정기간) 하루 전 시장 마감 이후(오후 6시)부터 실시간시장 시작 1시간 전까지 15분 단위 입찰자료 제출
  - 입찰변경 사항 및 QSE 간 쌍무계약 결정량 제출

- 실시간 시장
  - (HRUC, Hourly-ahead Reliability Unit Commitment)  
기동시간이 짧은 발전기를 대상으로 기동정지 결정
    - DRUC와 마찬가지로 기동비용, 무부하비용 입찰을 기반으로 수립
  - (급전지시) 5분단위 급전지시 및 가격 결정
    - 공급곡선 입찰을 기반으로 발전량 배분

# Questionnaire 및 현지 발표자료

## □ 사전 질의서 작성

- 계통운영, EMS 기능 등 거래소 내부 조사를 통한 질의서 사전 송부
- Questionnaire 송부 → 방문 기관별 내부 자료공개 정책에 따라 설명자료 준비 → 현지 프리젠테이션 및 Q&A 진행

분야	질의서 주요내용
시스템 운영규모	설비용량, 최대부하, 계통 데이터베이스 규모 등
운영품질	주파수 품질, 상태추정 품질 등
응용기능 적용	경제급전, 안전도제약경제급전, DSA, AI기술 도입 등 응용기능 개발 및 활용 관련 11개 질의사항
외부연계	외부시스템 연계현황, PMU 적용 및 활용현황 등
기타	향후 기능개선 방향 등에 대한 자유기술

**EMS Technology Survey Questionnaire**

This Questionnaire will be used for KPX internal reference only. No need to answer all the questions but to answer the questions you can answer. It will really help for our upcoming EMS Project. Thanks for your cooperation.

The Korea Power Exchange (KPX) is pushing to improve the functions of the currently operating Energy Management System (EMS).  
 The purpose of this query is to review the direction of discovery and improvement of new technologies by referring to your institution's valuable EMS operation information and experience.  
 The query items consist of system operation size, operation quality, applied method of applications, external system connection status, and interface technology. The "Note (Blue Letter)" item is a new technology that KPX is considering, and if you give us your opinion on the content, we will refer to it.  
 Please answer individual questions, and if necessary, you can tell us additional matters regardless of the type of answer. If you introduce an expert of the institution directly, we will listen to your opinion through individual contact.

**6. Renewable energy**

Monitoring

No.	Question	KPX	Response
1.	Connected Grid 1)	Trnasmisson grid.	O.
		Distrubution grid.	X.
2.	Measurment Method 2)	Tranmisson Grid. (interval)	direct. (2second, 1minute)
		Distribution grid. (interval)	-

1) The Grid connected to renewable energy generator.

(Note) KPX is trying to measure the real time information of renewable energy generators in distribution gid via tranmisson and distribution operator.(KEPCO).

2) Please answer the measurement method and interval.

- measurement method : 'direct' and 'indirect' ( via other systems )

- (interval) : measurement interval.

(Note) Currently, KPX acquires data from renewable generators every 2 seconds if they are more than 20MW and every 1 minute if it is less than that.

**Question**

There is an increasing need for DMS linkage and BTM (Behind the meter) estimation to acquire and control.  
 Please give us your opinion about the operation status and improvement direction concerning renewable energy, such as how to link renewable energy data, how to process BTM, or how to connect with DMS in your ISO.

# □ KPX 발표자료

- 방문기관 요청에 따라 거래소 현황 등 설명
- 발표자 : 차기IT추진실 차장 박민령
- 발표내용
  - KPX 기관 소개 및 미션
  - 전력시장, 전력계통 운영 현황 및 통계
  - 차기 전력IT Project 개요 및 주요 개발 기능 등
- 발표자료

**KPX & New IT Project Overview**

2022. 6.  
Min-ryong Park  
EMS Project Team

**Mission & History of KPX**

**Mission:** Grid Operation & Real-time Stability Management, Electricity Market Operation, Electricity Policy Support

**History:**

- 2001.4 Establishment of KPX(CBP market launching, 10 member)
- 2002.4 Signed MOU with CAISO
- 2003.2 Signed MOU with ERCOT
- 2004.5 Completed a New Jeju Branch Office building
- 2007.3 Signed MOU with PJM
- 2007.6 Completed a New Central Branch Office building
- 2010.4 Implemented dftt, electricity pricing sys.(Mainland / Jeju)
- 2010.10 Successful development of the K-EMS(our's own tech.)
- 2014.11 Launched the Demand Response Resource Market
- 2014.12 Transferred to a New HQ Office in NAU(Jimp., K-EMS)
- 2015.4 Joining of 1,000<sup>th</sup> member company in electricity market
- 2017.3 Launched the bi-directional REC trading market
- 2017.12 Established a Renewable Control system at Jeju Office
- 2018.12 Launched the Small-scale generation brokerage market
- 2019.12 Launched the National DR Program
- 2021.4 Joining of 4000<sup>th</sup> member company in electricity market

**Market Operation**

Day Ahead Energy Market (Hourly SMP from Capacity Bidding&Demand), Settlement (considering Real metering, Uplift, Capacity etc.)

Unit: MW

Unit: KRW/Wh

Market Price: High, Low

Available Supply/Capacity: Anthracite coal, Bituminous coal, Nuclear, CC, Oil, Anthracite coal, Bituminous coal

Hourly Demand: 47,745

Hourly Price: 56.30, 71.31, 71.54, 71.42, 71.43, 70.04

**System Operation**

Power System Operation with EMS

- SCADA, Generation Control and Network analysis
- 3 Control Centers in Na-ju, Kyung-in and Je-ju Island.

Generation, Transmission Substation, Distribution, Customers

**KPX's PowerIT Upgrade Project Overview**

PowerIT means two key IT systems of KPX, which are EMS for Power Operation and CBP system for market operation.

**Background & Objectives**

- Lifecycle of current PowerIT will be ended in 2025 (full change every 10 years, more or less)
- To develop a New System for New era under Carbon Free Policy (such as "2050 Carbon Neutral")

**PowerIT Introduction Timeline at KPX**

Power Operation: Dispatch Automation Sys. (ABB, U.S.), New EMS (ALSTOM, U.S.), New EMS (Commercialized Ver. of K-EMS)

Market Operation: CBP Sys., MDS (ABB, U.S.), New CBP Sys., KR System, Small Scale Gen. Brokerage Sys.

**KPX's PowerIT Upgrade Project Overview**

**EMS**

Energy Management System

State Estimation, A.G.C., SCADA, Data Acquisition, Real-time Monitoring, Control, Alarm, Reporting, etc.

APPLICATION: OS (LINUX)

**Look-Ahead Power System Analysis**

LA-PSA (every 15 min., to the next 2hours, 8 bands total)

Now, Ahead

Normal, Contingency

Time	Normal	Contingency
15:00 (Now)	Overload Alarm(0)	Overload Alarm(1)
15:15 (Ahead)	Balance Alarm(1), Overload Alarm(0)	Balance Alarm(1), Overload Alarm(5)
15:30 (Ahead)	Balance Alarm(1), Overload Alarm(0)	Ramp Alarm(1), Overload Alarm(5)

**Deep Learning based Topology Err. Check**

Automatic Detection of CB Acquisition(On/Off) Error

Transmission A, SCADA: 100, SE: 95

<Normal Topology → Normal Estimation>

<Bad Topology → Estimation Err.>

PowerSystem Node Info. → RGB Image (\* for applying to the Image Identifying Algorithm(CNN))

SCADA: 1000, SE: 19273

CB: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30

R, G, B, CB, SCADA, SE

[붙임6]

## 출장 관련 주요 회의 사진

### □ MISO 방문

\* MISO 정책 상 내부 시설 및 회의 사진 촬영 불가

○ 위치 : 720 City Center Dr, Carmel, Indiana, US

○ 회의 참석자

– Brian Kiefer(Operation Support Engineering Manager), Pavan Addepalle(Principal Engineer Advisor EMS and Market Engineering) 등 MISO 실무자 6명



### □ ERCOT 방문

\* ERCOT 정책 상 내부시설 및 회의 사진 촬영 불가

○ 위치 : 800 Airport Rd, Taylor, Texas, US

○ 회의 참석자

– Thinesh Devadhas Mohanadhas(Ops. Engineering & Application Support Manager), Hwang Fred(Manager) 등 ERCOT 실무자 4명



□ BC Hydro&Power tech 방문

○ 위치 : 12388-88th Ave. Surrey, British Columbia, Canada

○ 회의 참석자

- Paul Choudhury(System Operation Director, Djordje Atanackovic(Real Time Grid Operation Manager) 등 BC Hydro 실무자 3명, Xi Lin(Power System Director), Philip Horacek(Biz Operation Director) 등 Power tech 실무자 3명



[붙임7]

## 접촉인물

성명	소속	담당
Brian Kiefer	MISO	Manager, Ops Engineering Support
Olgar Kacmar	MISO	Client Services team
Pavan Addepalle	MISO	Market Engineer Advisor EMS
Thinesh Devadhas Mohanadhas	ERCOT	Manager, Ops Engineering Support
Huang, Fred	ERCOT	Director, Operations Support
Djordje Atanackovic	BC Hydro	Manager, Real-Time System
Paul Choudhury	BC Hydro	Director, System Operation
Xi Lin	Powertech	Director, Power System
Philip Horacek	Powertech	Director, Business Operations

## 기타 출장관련 사항

### □ 코로나 검사 내역

- 5.31 사전 코로나 검사 시행(감사실 권고)
- 6. 3 출국 1일 전 코로나 검사 시행(미국 입국전 필수사항)
- 6.11 캐나다 현지 코로나 검사 시행(한국 입국전 필수사항)
- 6.13 귀국 후 코로나 검사 시행(해외입국자 필수사항)

### □ 해외여비 사용 관련(숙박비)

- 코로나로 인한 장기간 봉쇄조치 후 해제되는 시점에 진행된 출장으로 기간 중 현지 숙소 확보에 어려움이 있었으며,
- 특히, 캐나다 출장지의 경우 높은 비용 등으로 1인당 숙박비 범위 내 숙소를 구하기 어려워 부득이 숙박비 추가지급 규정\*을 적용하고 2인 1실 사용(단, 여직원의 경우 1인실 배정)

\* 총무규정 제21조 제3항, 기준금액의 5할 범위 이내에서 추가지급 가능

### □ 국제회의비 사용 관련

- ERCOT社 기술회의 당일(6.8) 기술 및 인적교류를 위한 저녁식사 1회 시행

### □ 회사 기념품 전달

- 회사 기념품 15개(카드지갑) 수령하여 아래와 같이 전달
  - MISO社 : 5개 지급
  - BC Hydro社 & Powertech社 : 10개 지급

\* ERCOT社의 경우 자체 규정에 따라 거래소 기념품 전달 불가. 끝.