

IEEE PES GENERAL MEETING · 학회 참석 보고서

PES GM 2026 에서 본 전력망의 변화

대형부하 · 계통지원 기술 · 관측과 분석 · 계획과 운영 · 안정도와 복구

IEEE Power & Energy Society General Meeting

C² GRID HUB

연세대학교 스마트그리드 연구실

2026. 07. 19 - 07. 23

EXECUTIVE BRIEF

PES GM 2026 의 핵심 흐름

핵심 결론 PES GM 2026에서는 대형부하와 전력전자 기반 설비를 실시간 관측·다중 해석·운영·복구까지 연결해 다루는 흐름이 뚜렷했다.

전체 흐름을 보면 이번 GM에서는 단순히 '계통 해석'보다 더 넓은 범위에서의 연구에 대해 논의한다. AI 데이터센터는 부하의 속도와 규모를 바꾸고, GFM-E-STATCOM-HVDC는 전압·주파수·감쇠·복구를 지원하는 기술로 다뤄졌다. PMU와 현장시험은 실제 파형을 관측·검증하는 기반이 되고, digital twin·AI·광역 EMT는 계획과 운영의 판단 속도를 높인다. 이베리아 정전 논의에서는 이 모든 기술이 결국 전압안정도, 보호, 복구 절차와 운영 책임으로 이어져야 함을 보여줬다.

이 변화들은 각각 별개의 기술적 문제가 아니다. 대형부하와 전력전자 설비의 동특성이 계획 입력을 바꾸고, PMU와 현장시험이 실제 파형을 확인하며, RMS-impedance-EMT-digital twin이 검증의 깊이를 나눈다. 기술의 가치는 정상상태 성능뿐 아니라 사고 발생 이후의 보호, 운영 및 복구 과정까지 고려하여 평가되고 있었다.

전력망 변화의 다섯 축

변화	무엇이 달라졌나	실무적 의미
경계	AI 데이터센터와 IBR의 확대로 전원·부하·제어의 경계가 흐려졌다.	접속용량뿐 아니라 ramp, 보호, ride-through, 제어모드까지 계획 입력으로 다뤄야 한다.
계통지원	GFM-E-STATCOM-HVDC의 전압·주파수·damping·복구 기능이 함께 논의됐다.	장치명보다 제공 기능, 위치, 지속시간, current limit와 시험기준을 명시해야 한다.
관측	PMU·DFR·현장시험 데이터가 모델과 실제 계통 사이의 간극을 드러낸다.	진동 탐지, state estimation, 보호·제어 결과를 운영자가 쓸 수 있는 정보로 바뀌어야 한다.
판단	RMS-small-signal-impedance-EMT-digital twin-AI가 경쟁 도구가 아니라 역할별 stack이 됐다.	빠른 screening, 원인 설명, 비선형 확인, 현장 검증을 의사결정 단계에 맞게 배치해야 한다.
복구	이베리아 정전은 전압제어·진동·운영여유·데이터·복구 등 하나의 연쇄 문제임을 보여줬다.	정상상태의 경제성뿐 아니라 사건 전 완화, islanding 방지, black start와 재연계 설계가 필요하다.

전체 프로그램의 큰 그림

공개 기술 프로그램 세션의 경우, AI·데이터·디지털화(24.7%)의 비중이 가장 높았으며, 데이터센터·대형부하(15.8%), IBR·EMT·계통안정도(15.2%)가 그 뒤를 이었다. 특히 데이터센터가 하나의 독립적인

기술 주제로 부상한 점도 주목할 만하지만, 더 중요한 변화는 AI·디지털, IBR·EMT, 회복탄력성, 계획·운영 등 다양한 세션에서 대형부하 문제가 반복적으로 등장했다는 점이다.

1 차 주제	비중	읽을 때의 의미
AI·데이터·디지털화	24.7%	예측·운영·digital twin 뿐 아니라 AI 자체의 전력수요가 의제가 됐다.
데이터센터·대형부하	15.8%	연계 절차, 모델, ride-through, 유연성, 대량 탈락을 함께 다뤘다.
IBR·EMT·계통안정도	15.2%	converter-driven stability와 광역 EMT가 주류 분석 의제로 이동했다.
재생·저장·DER	11.4%	GFM·BESS가 출력자원뿐 아니라 계통지원 자원으로 논의됐다.
계획·시장·운영·송전	10.1%	대형부하의 빠른 건설 속도와 계통 인프라의 시간 축 차이가 핵심이다.
회복탄력성·신뢰도·기후	9.5%	사건 후 복구뿐 아니라 사전 적응과 데이터 거버넌스가 강조됐다.
기기·보호·배전·기타	13.3%	GFM fault response와 전자부하 보호 설정이 새 과제로 부상했다.

보고서를 읽는 가장 빠른 순서

- 전체 흐름: Executive Brief와 각 장 마지막의 '남는 질문'
- 새로운 부하·산업 AI: 1장의 모델 계층과 AI engineering workflow
- GFM·E-STATCOM: 2장의 성능기준·현장시험과 3장의 진동 분석
- PMU·digital twin·광역 EMT: 4장의 관측-모델-운영 workflow
- HVDC·대정전·복구: 5장의 유럽 계통전환과 이베리아 정전 사례

목차

장	주제	핵심 질문
1	대규모 전자부하와 데이터센터	어떤 모델이 어떤 현상을 책임져야 하는가?
2	약계통, GFM, 계통강도	어디에 어떤 지원자원을 얼마나 배치할 것인가?
3	진동, SSO, 임피던스	SCR 밖의 위험을 어떻게 찾아 원인까지 설명할 것인가?
4	관측·AI·광역 EMT와 모델 lifecycle	PMU와 현장 데이터를 계획·운영 판단으로 어떻게 연결할 것인가?
5	HVDC, 보호, 정전과 회복탄력성	전력전송·제어·보호·복구를 어떻게 하나의 시스템으로 검증할 것인가?
6	C2GRID 연구 로드맵	이번 GM의 관찰을 어떤 검증 가능한 연구 질문으로 바꿀 것인가?
A-C	세션 지도·용어·출처	원 세션과 근거를 어떻게 다시 찾을 것인가?

THEME 01

대규모 전력전자 부하: '부하'가 아니라 동적 시스템이다

모델 계층에서 시작해 연계 절차, AI 부하 진동, ride-through 와 유연성까지 연결한다.

이 장의 답 데이터센터를 하나의 P-Q 블록으로 두지 말고, 냉각·IT 전력전자·UPS 모드·보호·재접속을 현상별로 분리해 모델링해야 한다. 핵심은 가장 상세한 모델을 항상 쓰는 것이 아니라, 의사결정에 필요한 동작을 보존하는 모델을 배정하는 것이다.

대형부하 모델은 현상별로 역할을 나눠야 한다

대형부하 모델링 논의는 NERC 의 표준·실무 공백, RMS 와 EMT 모델, 데이터센터 신뢰도, utility 연계 절차, HIL 을 한 흐름으로 다뤘다. 핵심은 모델을 하나로 통일하는 것이 아니라 역할을 나누는 데 있다. 냉각과 일부 배전부하는 CMLD 로, 집합 전력전자 부하의 cease-reconnect 는 PERC1 으로, UPS 모드 전환·내부 DC bus-sub-cycle-harmonic-converter interaction 은 EMT 로, 실제 controller 와 보호 설정은 HIL 로 검증한다.

Large Load Modeling



PSSE: Composite Load Model (CMLD) and Power Electronic Reconnecting and Seizing (PERC1) Model

PSCAD: PNNL's Data Center Model Library

그림 1-1. 대형부하 모델 계층의 출발점: PSS/E 의 CMLD-PERC1 과 PSCAD 의 데이터센터 EMT library 를 구분한다.

분석층	표현하기 좋은 것	놓치기 쉬운 것	권장 사용
CMLD	모터·정적부하·배전 feeder·냉각의 집합 거동	UPS battery, 내부 DC bus, 세밀한 ride-through·recovery	배전/전압 안정도와 냉각 portion 의 1 차 모델
PERC1	undervoltage cease/reconnect, momentary cessation, 다단 V/f ride-through	harmonic, 고주파 상호작용, converter 내부 동특성	대규모 후보·사건의 RMS 기반 screening
generic EMT	UPS·PSU·케이블·변압기, sub-cycle, 제어 상호작용	switching-level 세부와 누락된 냉각 VFD	상세 연계·진동·FRT·reconnection 검증
HIL/field	실제 controller, relay, 통신지연, vendor 설정	모델 경계 밖의 설비·운영 절차	설정 승인, 재현, commissioning 전 검증

CMLD의 power-electronic block은 전압에 따라 P-Q가 감소하고 특정 전압 아래에서 탈락하는 단순 구조다. 이는 일반 배전부하를 위해 만들어졌기 때문에 hyperscale 데이터센터의 UPS 배터리 방전·재충전, recovery ramp, internal DC bus를 충분히 표현하지 못한다. PERC1은 이 공백을 메우는 interim model로서 세 가지 동작 옵션을 제공하지만, 역시 주파수 의존 임피던스와 광대역 공진을 대신하지는 못한다.

Composite Load Model Limitations



- Originally developed for aggregate distribution loads (motors, lighting, residential/commercial loads), not hyperscale data centers.
- Does not accurately represent power electronic load behavior
- UPS battery discharge and recharge
- Internal DC bus dynamics
- Ride-through (voltage and frequency), and recovery ramp/delay settings
- ERCOT therefore suggested an interim modeling approach for near term studies (PERC1)
- CMLD remains usable for the cooling portion in the interim approach

그림 1-2. CMLD의 적용 한계와 PERC1 interim 접근.

PERC1 Model



Option 1

- Undervoltage Cease and Reconnect

Option 2

- Momentary Cessation

Option 3

- Multi-Step Voltage/Frequency Ride-Through and Reconnection

그림 1-3. PERC1의 세 동작 옵션: undervoltage cease/reconnect, momentary cessation, multi-step V/f ride-through.

계획 문제: 부하의 크기보다 시간 축과 정보 비대칭이 어렵다

대형 데이터센터는 18~24개월 안에 건설될 수 있지만 송전·발전 인프라는 수년이 걸린다. utility는 접속점, 전압등급, 증설비용, 자원적정성, affected-system을 검토해야 하고, 고객은 사업 일정과 설계변경을 빠르게 확정하려 한다. 두 시간축의 불일치는 과도한 선투자와 접속 지연을 동시에 만들 수 있다. 그래서 PG&E는 serial study와 systemwide cluster를 병행하고, 연구·운영 단계에서 customer EMTP model과 power-quality/SSO 검토를 점진적으로 요구한다.

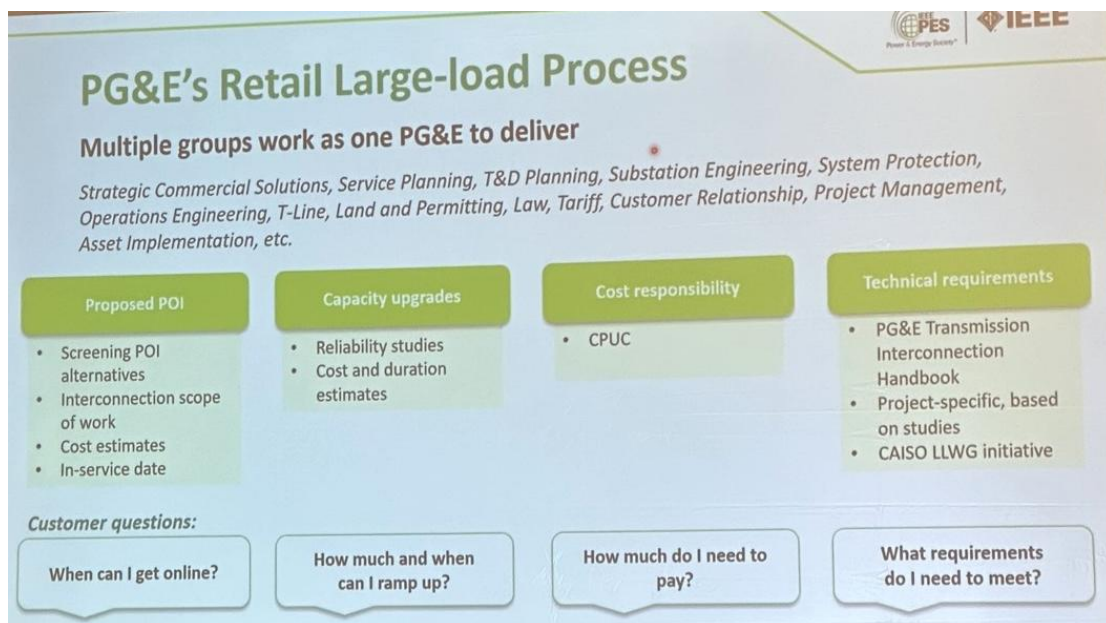


그림 1-4. PG&E 현장 발표의 대형부하 planning study roadmap. 접속 검토는 전력조류 한 번이 아니라 안정도-SSO-EMT로 깊어진다.

배전망도 예외가 아니다. 배전계통에서 10~30 MW 급 시설 하나가 BPS 에 미치는 영향은 작아 보일 수 있으나, 비슷한 보호·제어 설정을 가진 여러 시설이 같은 사건에 반응할 경우, 집단 탈락이 발생할 수 있다. 송전·배전 planning 간 정보 교환이 없으면 upgrade 를 과소 또는 과대 산정할 수 있기에 연결 위치의 MW 과 함께 보호 설정, ride-through curve, 재접속 지연, ramp limit, 내부 에너지 자원의 운전 정책이 함께 교환되어야 한다.

동특성 문제: AI workload 의 ramp 와 반복주기가 계통 모드를 건드린다

AI 데이터센터의 idle↔full 전환은 수 초 이하에서 반복될 수 있다. 위험은 step 의 크기만으로 정해지지 않는다. ramp rate, 반복주기, 접속점 임피던스, 인근 동기기의 전기·기계 모드, UPS 와 PSU 제어 대역폭이 결합한다. 발표들은 대략 0.1~2 Hz 의 저주파 모드, 5~50 Hz SSO, 1~100 Hz 제어 상호작용, 50 Hz 이상의 harmonic/resonance 를 구분해 접근했다. 경계가 절대값은 아니지만 분석도구를 배정하는 데 유용하다.

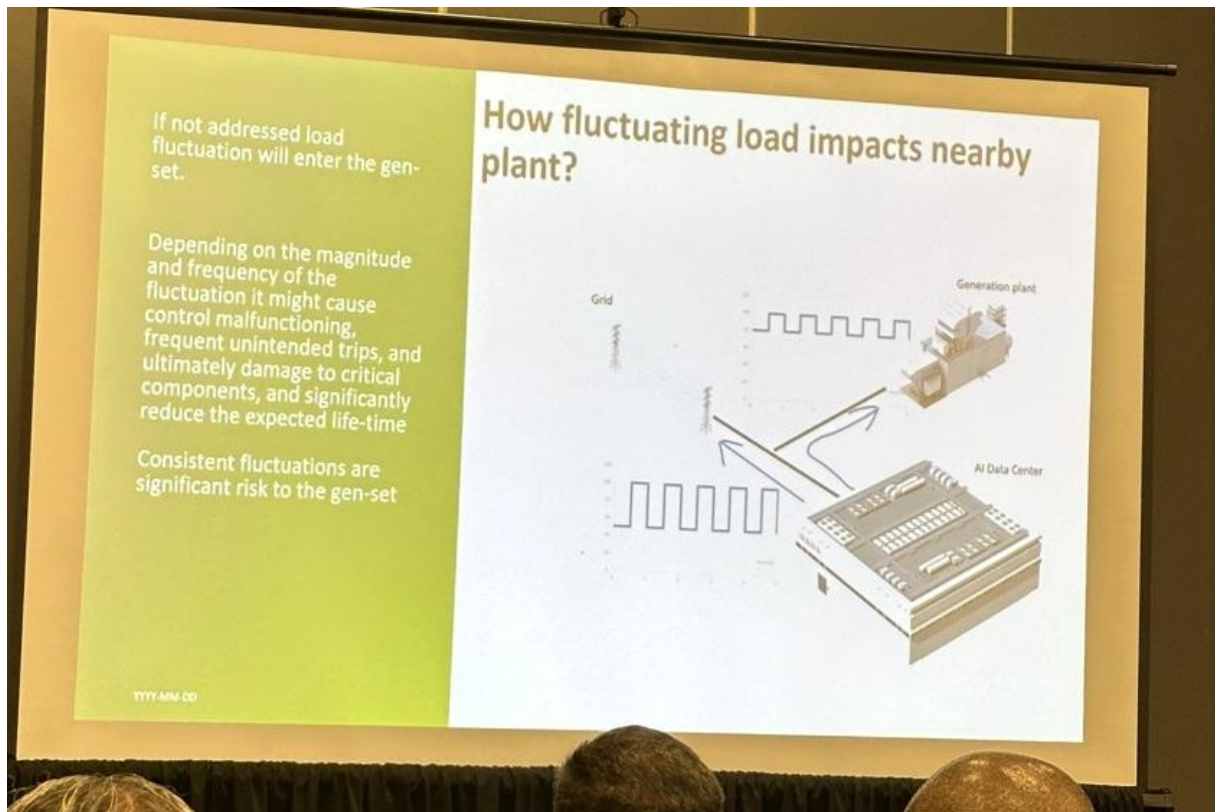


그림 1-5. AI 데이터센터의 빠른 부하 변동과 계통 안정도 문제를 설명한 현장 슬라이드. 부하의 시간 패턴이 계통 모드와 만나는 지점을 확인해야 한다.

현상 대역	대표 위험	우선 분석	완화 방향
0.1~2 Hz	발전기-계통 국부/광역 모드, plant controller delay	RMS-small-signal-PMU	POD, governor/AGC-PPC tuning
5~50 Hz	SSO/SSCI, torsional interaction, series compensation	topology screen-frequency scan-EMT	GFM/BESS/E-STATCOM, 제어 재튜닝, 보호

현상 대역	대표 위험	우선 분석	완화 방향
1-100 Hz	PLL-current loop-converter-load interaction	impedance/MIMO-black-box scan	제어 대역폭·지연·virtual impedance 조정
>50 Hz	harmonic resonance, cable/filter/UPS switching	EMT-harmonic scan-measurement	filter-switching-layout-parameter 개선

Ride-through 와 reconnection 은 하나의 요구조건이다

대형부하가 고장 중 연결을 유지하면 전압 회복을 저해할 수 있으며, 반대로 과도한 부하 탈락은 주파수 상승과 발전기 탈락으로 이어질 수 있다. 따라서 ‘무조건 버틴다’ 또는 ‘즉시 분리한다’가 정답이 아니다. 전압 구간별 소비 감축, UPS battery 전환, cooling 부하 유지, 보호 지연, 회복 후 재접속 ramp 를 하나의 사건 논리로 설계해야 한다. West Texas 2022 사례에서는 1,560 MW 부하 감소와 60.235 Hz 까지의 주파수 상승이 보고되었다. 이 수치는 발전기 사고와 다른 방향의 BPS 위험을 보여준다.

PG&E Collaboration with CAISO on Retail Large Loads



CAISO established the Large Load Working Group (LLWG) in Q4 2025. The approach is fundamentally policy- and reliability-driven rather than project specific, establishing a reusable framework that can evolve with system conditions and technological advancement.

The study examines four critical performance dimensions that define how large loads interact with the CAISO system during both normal operations and conditions. Each area addresses specific reliability concerns identified through stakeholder engagement with CAISO planners, protection engineers, and transmission operators.

1 Voltage ride-through (VRT)

Ability to remain connected during voltage sags, swells, and recovery. Critical for maintaining system stability during fault conditions and preventing cascading load loss that could compromise frequency response.

3 Load ramp-rate control

Management of step changes and modulation patterns. Rapid load variations can interact with governor response, AGC systems, and local generator dynamics, potentially causing operational challenges.

2 Frequency ride-through (FRT)

Capability to withstand frequency deviations without tripping. Essential for preserving load during generation-loss events and avoiding exacerbation of under-frequency conditions that could lead to load shedding.

4 Aggregate clustering impacts

Cumulative effects when multiple large facilities interconnect in proximity. Localized concentration amplifies individual facility impacts on voltage regulation, short-circuit duty, and protection coordination.

그림 1-6. 대형부하 신뢰도 요구의 묶음: VRT, FRT, ramp-rate, oscillation, 재접속을 함께 다룬다.

현장 세션에서는 GFM-BESS, POD-STATCOM, E-STATCOM, hybrid storage 가 반복적으로 제안됐다. 다만 장치 이름보다 위치·대역·지연이 중요하다. GFM 은 전기적으로 가까운 위치에서 강한 전압원 동작을 제공하지만 큰 정격이 필요할 수 있다. 부하를 직접 계측하는 E-STATCOM 은 변동분에 맞춰 정격을 줄일 수 있으나 통신·제어 지연이 제약이다. 저주파에는 POD 가 여전히 필요하고, 에너지 지속시간이 필요한 경우 BESS 가 STATCOM 보다 추가 역할을 한다.

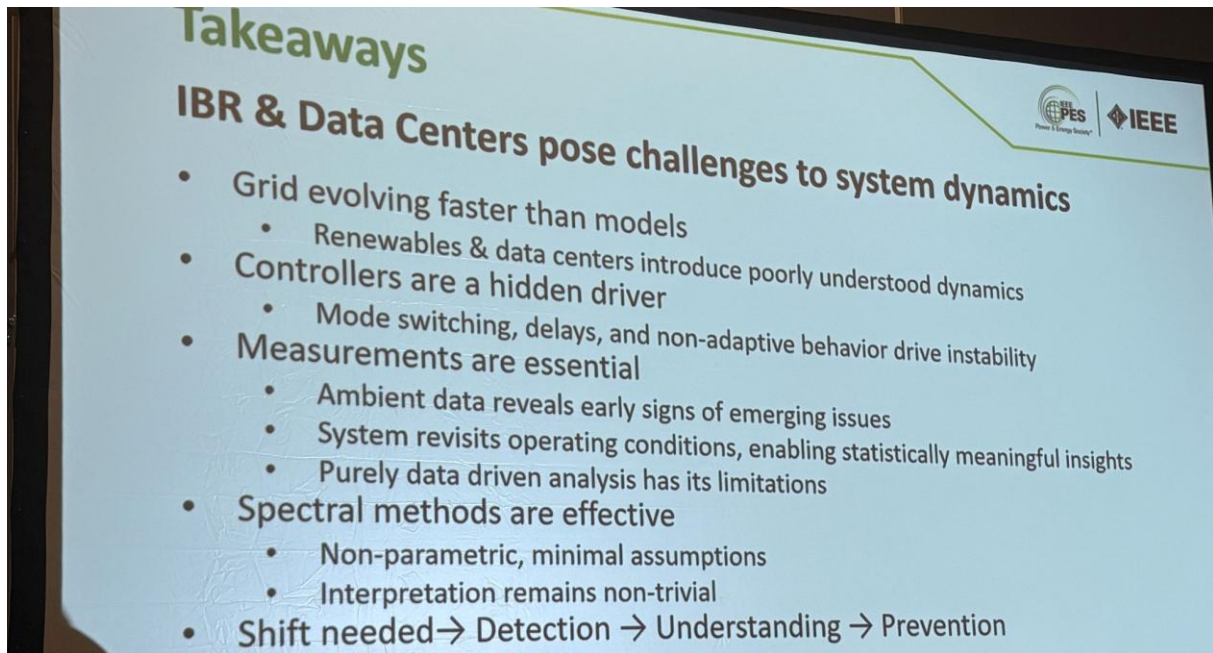


그림 1-7. IBR 과 데이터센터의 공동 과제를 정리한 현장 발표 takeaway. 모델, 감시, 복원력, 보호를 한 세트로 다룬다.

산업 AI 의 역할: 판단을 대체하기보다 engineering cycle 을 줄인다

추가 세션의 Hitachi Energy, MathWorks, Siemens, Eaton 발표는 AI 를 같은 의미로 사용하지 않았다. predictive ML 은 예측·고장탐지·digital twin 보정에, agentic workflow 는 요구사항 해석·모델 실행·결과 정리에, physics-informed model 은 부족한 데이터 안에서 전력계통 제약을 보존하는 데 쓰였다. 공통 메시지는 AI 가 계통운영자의 판단을 대신한다는 것이 아니라, 사람이 정의한 검증 절차와 모델을 더 빠르고 반복 가능하게 실행하도록 돕는다는 점이다.

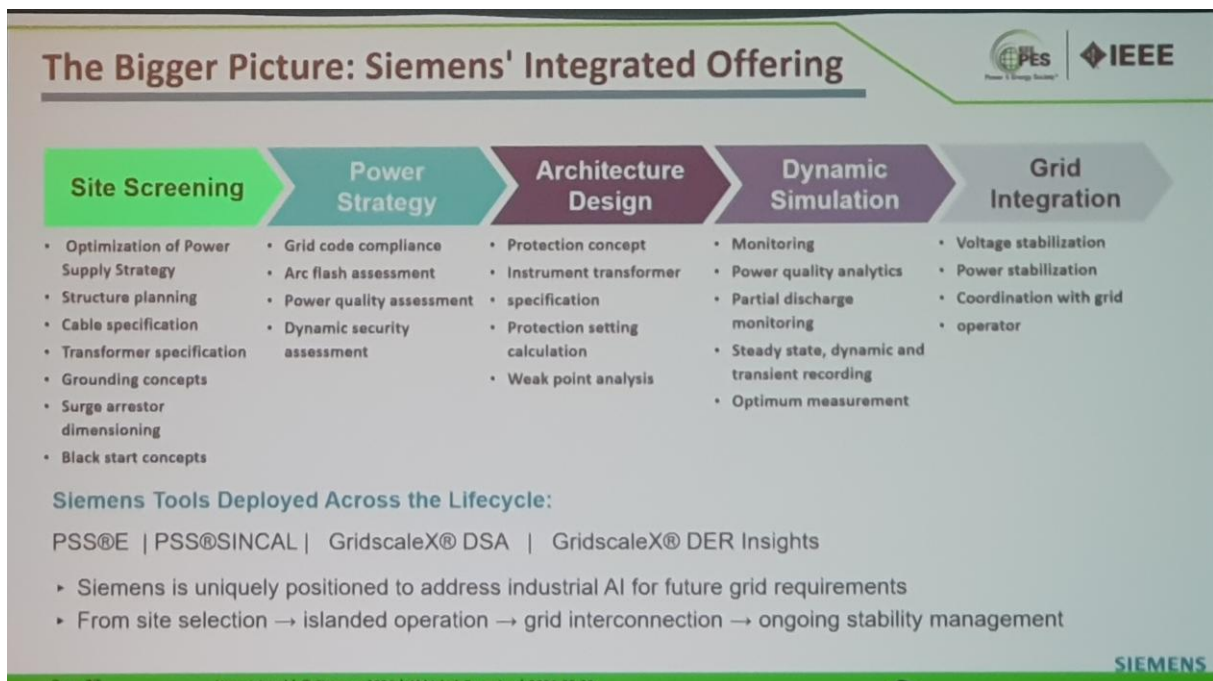


그림 1-8. 데이터센터 접속을 site screening–power strategy–architecture–dynamic simulation–grid integration 으로 연결한 산업계 workflow.

AI 적용 분야	활용 분야	분석 필요 분야
예측·digital twin	수요·고장·설비상태 예측, 실제 데이터로 모델 오차 갱신	학습범위, drift, 물리 한계와 불확실성
계획 자동화	접속 후보 생성, 반복 simulation, 결과 비교와 보고서 초안	입력 provenance, 실행 log, 승인 가능한 재현성
제어 설계	controller 후보 생성·튜닝·code generation	closed-loop stability, limit, HIL 과 현장 acceptance
운영 지원	진동·이상상태 탐지, 복구 playbook 검색	권한분리, fail-safe, 운영자에게 설명 가능한 근거

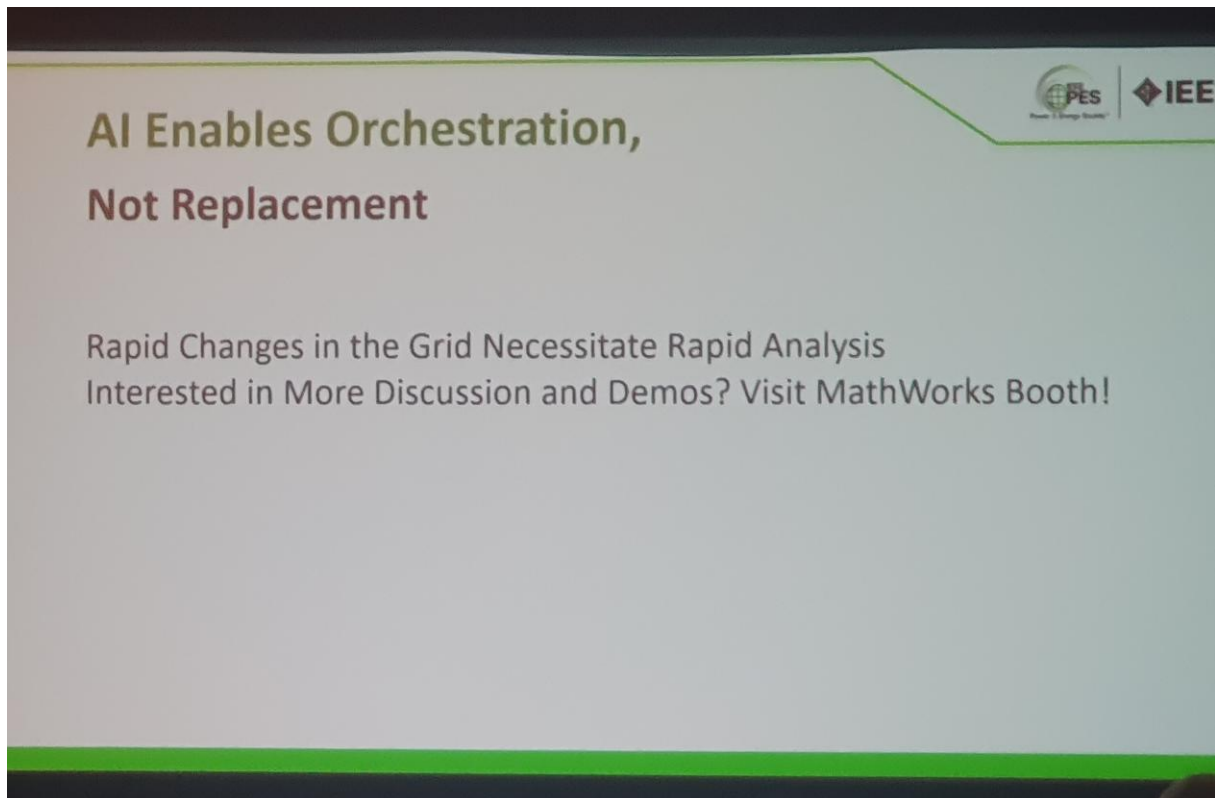


그림 1-9. 'AI enables orchestration, not replacement'라는 산업계 메시지. 빠른 분석을 위해 모델·도구·검증 절차를 연결하되 공학적 책임은 남겨야 한다.

이 장에서 남는 질문

- 동일 데이터센터를 CMLD, PERC1, 평균 EMT 로 표현할 때 어떤 의사결정이 보존되는가?
- ride-through, Momentary Cessation, UPS 전환, reconnection 을 검증가능한 하나의 state machine 으로 만들 수 있는가?
- AI workload spectrum 을 계통 모드와 연결해 위험한 ramp·주기를 사전 제한할 수 있는가?
- GFM-BESS 와 E-STATCOM 의 위치·정격·지연을 같은 목적함수로 비교할 수 있는가?
- 연계 절차에서 고객 기밀을 지키면서도 utility 가 필요한 동특성 데이터를 어떻게 표준화할 것인가?
- AI 가 생성한 모델·설정·보고서의 입력과 실행 이력을 사람이 다시 검증할 수 있는가?

계통강도는 단순한 숫자가 아니라 Screening 을 나타내는 지도다

Grid-forming tutorial, low-strength 사례, MISO·ERCOT 의 screening 을 연결해 '어디에 무엇을 둘 것인가'를 다시 정의한다.

이 장의 답 SCR 은 버릴 지표가 아니라 빠른 1 차 screen 이다. 다중 IBR, 기술별 제어, 주파수 의존 상호작용을 반영하려면 WSCR·SCRIF·NSCR·impedance 분석으로 단계적으로 확장하고, 최종 결정은 large-signal EMT 와 HIL 을 통해 최종 결정을 확인해야 한다.

GFM 은 '전압원처럼 보이는가'로 평가한다

GFM 은 단순한 droop controller 이름으로 정의되지 않는다. 핵심은 'PLL 에 의존하지 않고 전압의 크기와 위상 기준을 형성하며, 외란 중에도 current limit 안에서 voltage-source behavior 를 유지하는가'이다. WECC generic model 은 droop, VSM, hybrid 등 다양한 제어 방법을 제공하지만 실제 성능은 OEM 제어·한계기·보호·plant controller 와 함께 검증해야 한다.

WECC Standard Library Grid-Forming Inverter Models

- Different Entities involved with developing Grid-forming models
 - PNNL (Pacific Northwest National Laboratory),
 - WECC (Western Electricity Coordinating Council), and
 - UNIFI (Universal Interoperability for Grid-Forming Inverters) Consortium
- Models represent different grid-forming control strategies.
- Designed for large-scale power system stability studies
- Approved WECC "Generic" models (Positive-Sequence Models):
 - REGFM_A1: P-f and Q-V droop control
 - REGFM_B1: Virtual Synchronous Machine (VSM) Control
 - REGFM_C1: GFM + GFL Hybrid Control



[W. Du et al. Unifi Consortium Standard Library Grid-Forming Hybrid Control Inverter-Based Resource Model Specification (REGFM_C1), Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Nov. 2025. [Online]. Available: <https://docs.nrel.gov/docs/fy26osti/97443.pdf>] [W. Du et al. Unifi Consortium, Virtual Synchronous Machine Grid-Forming Inverter Model Specification (REGFM_B1), NREL/TP-5D00-90260, National Renewable Energy Laboratory, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/90260.pdf>]

그림 2-1. WECC/PNNL/UNIFI 의 generic GFM model landscape. 모델 이름보다 제어 방법과 적용 목적을 구분해야 한다.

Generic model 은 아직 과도 상태의 한계조건을 조정 중이다. 기존 IEEE 2800 의 ride-through 요구는 GFL 을 전제로 설계된 부분이 있어 GFM 의 voltage-source behavior 와 current limiting 을 동시에 만족시키기 어렵다. ENTSO-E 와 VDE FNN 은 current limit 중에도 전압원 거동을 유지하는 방향을 제시하고, IEEE P2800 계열은 GFM 기능과 성능 검증 틀을 보완하고 있다. 결국 ‘fault 중 Q priority’ 같은 한 줄 요구보다 Phase jump, positive/negative sequence, current clipping 시간과 안정 복귀를 함께 시험해야 한다.

Main Takeaways



- Existing IBR voltage disturbance ride-through requirements are developed with grid following technology in mind.
- Those requirements may be barrier to grid forming technology.
- There is a need for revision of grid codes and IBR interconnection standards to remove barriers/establish new requirements for grid forming.
- [IEEE P2800 series of standards](#) seek to address the need. Key questions are:
 - What does the bulk power system need from an IBR during fault?
 - What can an IBR do during a fault?
- How to join IEEE P2800 Series Standards:
 - <https://development.standards.ieee.org/myproject-web/public/view.html#/interest/8899>
 - Sign up for SG4 (response to abnormal conditions): [Click here to sign up for SG4 listserv](#)

그림 2-2. 기존 GFL 중심 ride-through 요구와 GFM capability 사이의 간극.

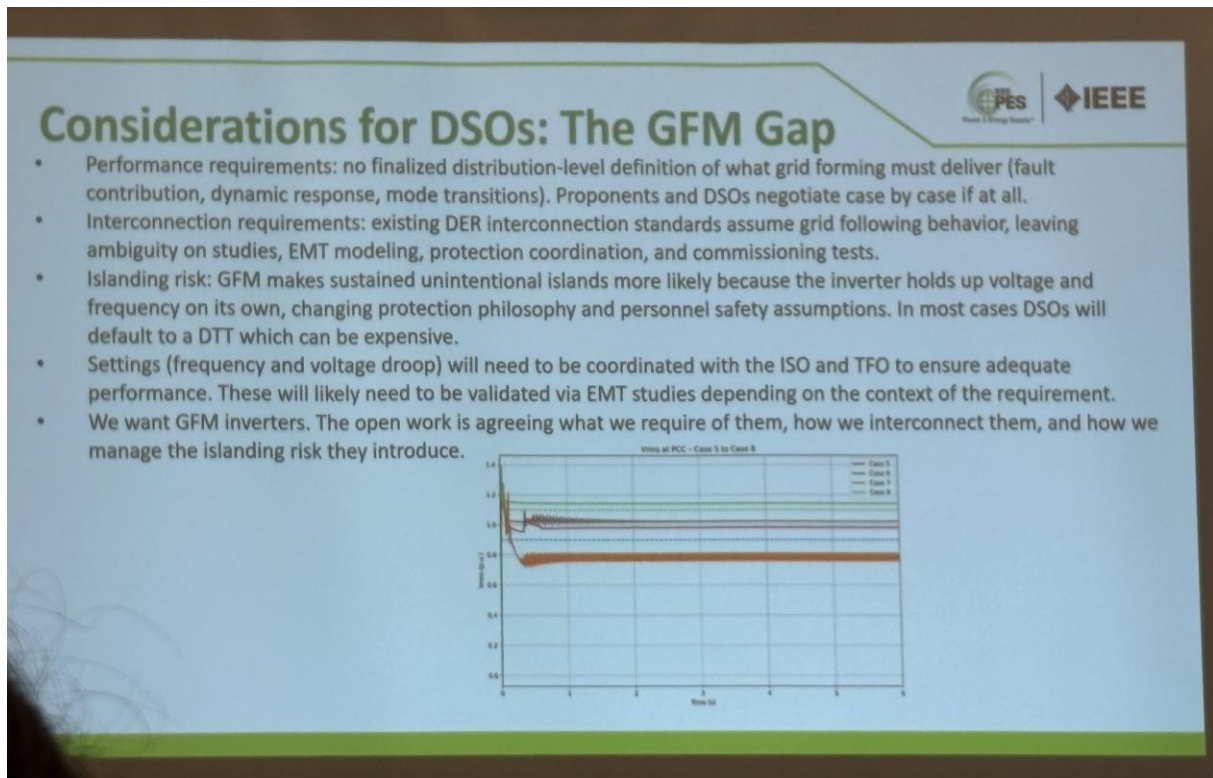


그림 2-3. 배전·마이크로그리드 관점에서 GFM 이 필요한 이유를 정리한 현장 발표.

저강도 계통의 해법은 한 장치가 아니다

브라질·북미·호주 사례는 weak grid 를 단일 SCR threshold 로 판정하지 않았다. 동기조상기 배치, GFM capability 활용, STATCOM/E-STATCOM, BESS, control retuning, 송전 제한, topology 보강을 계통별로 조합했다. 같은 장치도 목표가 다르다. 동기조상기는 fault current-inertia-전압지원을 제공하고, GFM converter 는 빠른 voltage source response 와 damping 을 제공하며, BESS 는 유효전력 에너지까지 제공한다. 비용 비교도 MW/MVAr 만이 아니라 위치, 에너지 지속시간, 고장전류, 보호, resonance 를 포함해야 한다.

지원 수단	강점	주의점	적합한 질문
동기조상기	fault current, 관성, 무효전력, 전압 강성	기계 torsional mode, 손실·유지보수, 특정 resonance	보호·단락용량·전압지원이 동시에 필요한가?
GFM BESS	빠른 전압·주파수·damping, 유효전력 지원	에너지·정격·current limit, multi-vendor interaction	약계통과 부하변동을 같은 장치로 완화할 것인가?
GFM STATCOM	전압원 거동, 빠른 무효전력, 중고주파 damping	유효전력 에너지 없음, 저주파 POD 필요 가능	짧은 시간대의 grid strength 와 damping 이 핵심인가?
E-STATCOM/POD	부하 계측 기반 보상, 변동분 정격 가능	통신·측정 지연, 위치 의존성	특정 데이터센터의 반복 변동을 직접 상쇄할 것인가?
계통 보강/운영	transfer limit-topology-dispatch 를 구조적으로 개선	긴 lead time, 비용과 이용률	장치 추가보다 운전·접속 위치 변경이 유리한가?

SCR 에서 NSCR 까지: 지표의 복잡도는 상세 EMT 를 줄이기 위한 것

기본 SCR 은 한 POI 에서 단락용량을 정격으로 나눠 빠르게 강도를 본다. 다중 IBR 가 모이면 WSCR·CSCR 이 cluster 의 전기적 결합을 반영하고, MIIF·SCRIF·ESCR 은 인접 자원의 상호영향과 등가 임피던스를 보완한다. NSCR 은 임피던스 행렬과 자원의 동적 임피던스를 사용해 GFL·GFM·동기기의 차이를 screen 단계에 넣는다. 지표가 복잡해지는 목적은 정교한 숫자 자체가 아니라, 상세 scan 과 EMT 를 돌릴 위치·사고·운전점을 더 정확히 고르는 것이다.

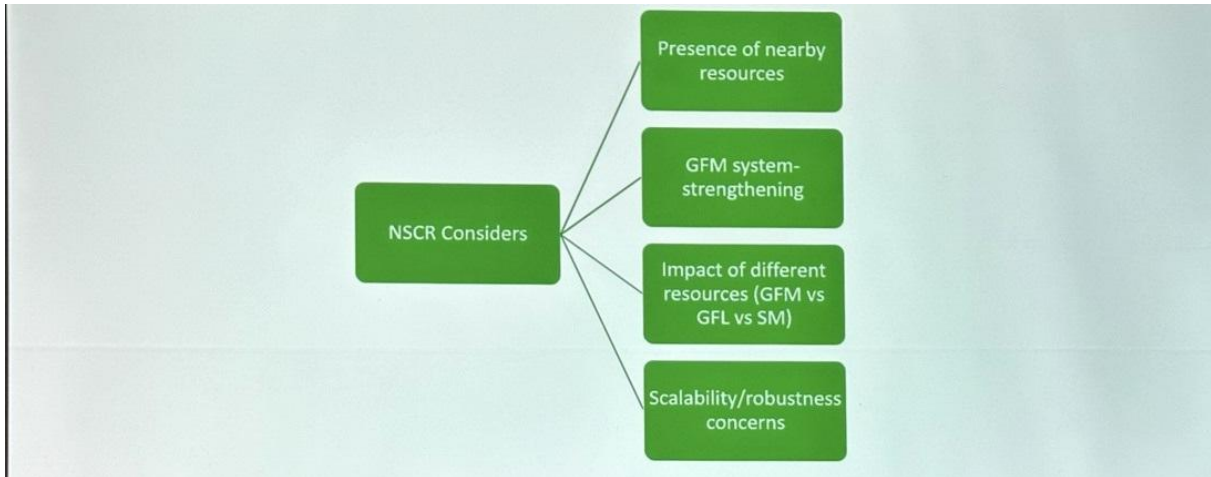


그림 2-4. 현장 발표가 제시한 NSCR 의 필요성: 서로 다른 기술의 동적 기여와 다중 POI 상호작용을 screening 에 반영한다.

지표	주요 입력	판별 방법	한계
SCR	POI 단락용량·정격	단일 접속점의 빠른 1 차 위험 구분	다중 IBR·주파수 의존·제어차이 누락
WSCR/CSCR	cluster 용량·전기적 거리	여러 IBR 가 공유하는 계통강도 비교	경계와 가중치에 민감
MIIF/SCRIF/ESCR	상호영향·등가 임피던스	인접 설비의 결합과 보강 효과	기술별 동특성·광대역 mode 제한
NSCR	Z-matrix·dynamic impedance	GFL/GFM/동기기 차이를 포함한 고위험 POI 선별	모델·calibration·threshold 가 계통별로 확인 필요
Impedance/eigen	주파수 응답·운전점	위험 주파수, 원인 장치, damping·mode shape	Limiter 및 보호는 별도 EMT 필요

MISO 와 ERCOT 가 보여준 ‘screening 의 올바른 사용법’

MISO 는 약 19,000 contingencies 와 13,000 POIs 를 빠르게 평가하는 NSCR/eScreen 을 출발점으로 두고, EMT scan-eigen 분석으로 원인을 설명한 뒤, large-signal EMT 로 fault, limit, nonlinearity, mitigation 을 확인하는 3 단계 stack 을 제안했다. 이 규모에서 중요한 성능은 screen 자체의 정확도보다 상세 분석에서 놓쳐서는 안 되는 위험을 얼마나 적게 누락하는가이다.



그림 2-5. MISO system-strength methodology 현장 발표. 대규모 candidate 를 선별하고 상세 EMT 로 연결하는 것이 핵심이다

ERCOT 은 series compensation 과 IBR·대형부하의 SSO 위험을 topology → passive scan → dynamic device scan → risk flag → detailed EMT 순으로 좁힌다. SISO scan 은 빠르지만 다중 장치 결합과 운전점·비선형성을 충분히 반영하지 못할 수 있어 MIMO impedance 로 확장한다. 두 기관의 공통점은 threshold 를 최종 판정으로 쓰지 않고, 상세 계산자원을 배분하는 장치로 사용한다는 점이다.

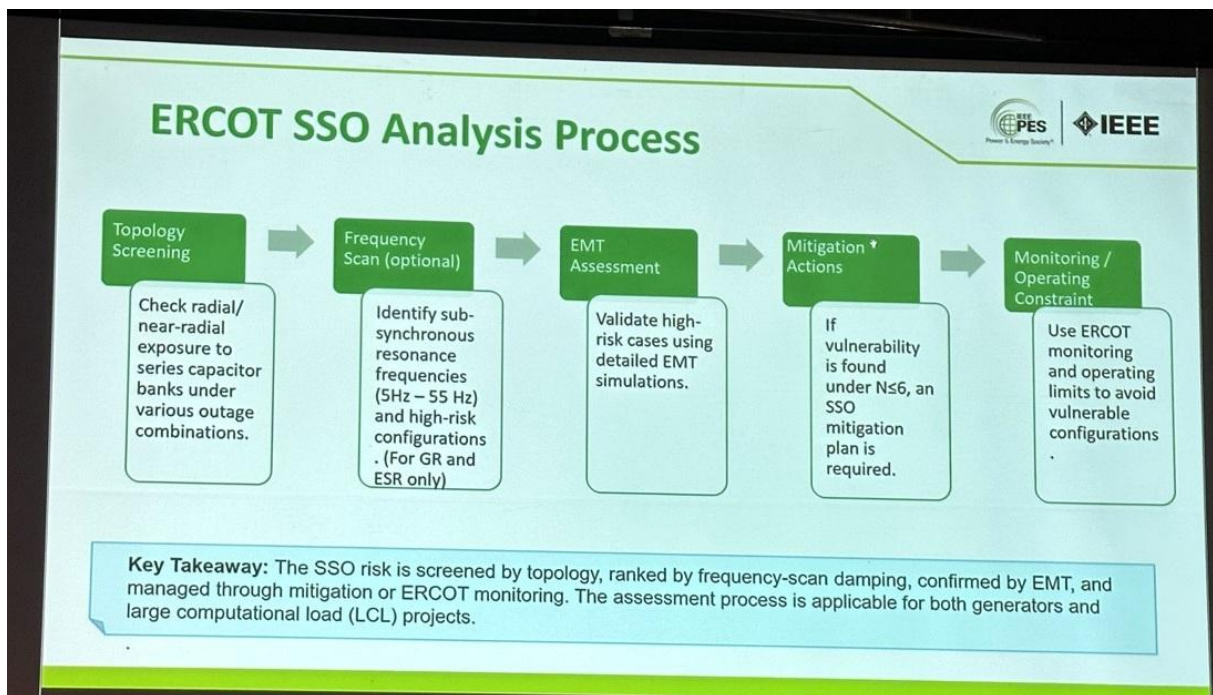
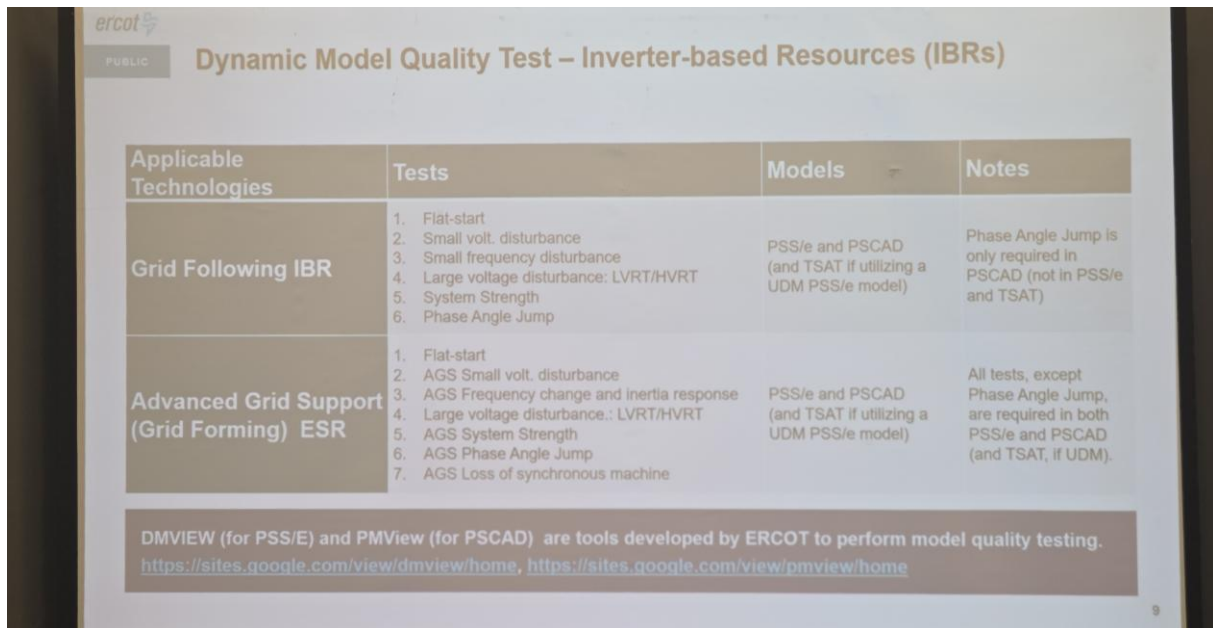


그림 2-6. ERCOT 의 SSO screening 흐름을 정리한 현장 슬라이드.

성능기준의 전환: 'GFM 인가'보다 무엇을 시험할 것인가

추가로 확인한 performance specification 패널에서는 정의 논쟁보다 시험 가능한 요구조건이 중심이었다. ERCOT 은 2025 년 11 월 GFM-Advanced Grid Support 요구를 승인했고, 2026 년 4 월 1 일 이후 특정 신규 BESS 연계에 적용하는 절차를 제시했다. dynamic model quality test, unit-parameter validation, voltage phase jump-frequency change-system strength-loss of synchronous machine 같은 시험을 통해 label 이 아니라 응답을 확인한다. OEM 과 ISO 관점도 공통적으로 current limit, voltage-source behavior, inertia-damping, plant-level response 를 적용점별로 수치화해야 한다고 강조했다.

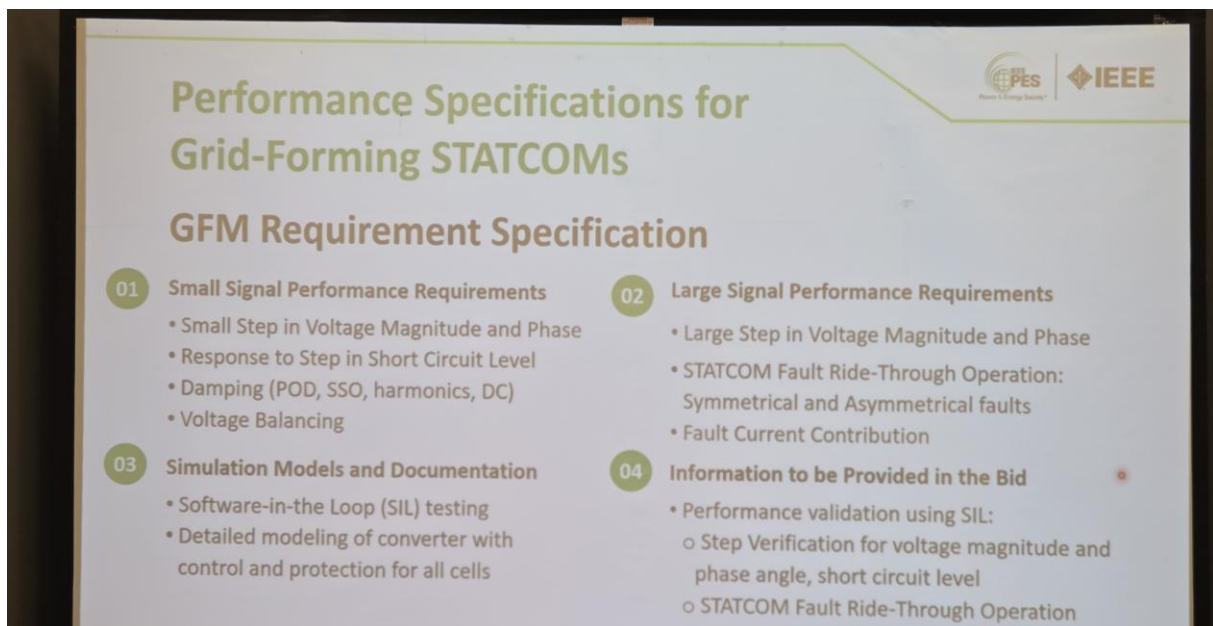


The slide is titled "Dynamic Model Quality Test – Inverter-based Resources (IBRs)" and is marked as "PUBLIC". It contains a table with four columns: Applicable Technologies, Tests, Models, and Notes.

Applicable Technologies	Tests	Models	Notes
Grid Following IBR	1. Flat-start 2. Small volt. disturbance 3. Small frequency disturbance 4. Large voltage disturbance: LVRT/HVRT 5. System Strength 6. Phase Angle Jump	PSS/e and PSCAD (and TSAT if utilizing a UDM PSS/e model)	Phase Angle Jump is only required in PSCAD (not in PSS/e and TSAT)
Advanced Grid Support (Grid Forming) ESR	1. Flat-start 2. AGS Small volt. disturbance 3. AGS Frequency change and inertia response 4. Large voltage disturbance: LVRT/HVRT 5. AGS System Strength 6. AGS Phase Angle Jump 7. AGS Loss of synchronous machine	PSS/e and PSCAD (and TSAT if utilizing a UDM PSS/e model)	All tests, except Phase Angle Jump, are required in both PSS/e and PSCAD (and TSAT, if UDM).

Below the table, it states: "DMVIEW (for PSS/E) and PMView (for PSCAD) are tools developed by ERCOT to perform model quality testing." and provides two URLs: <https://sites.google.com/view/dmview/home> and <https://sites.google.com/view/pmview/home>.

그림 2-7. ERCOT 의 GFM/AGS 자원 dynamic model quality test 항목. 성능요구와 모델 검증을 분리하지 않는다.



The slide is titled "Performance Specifications for Grid-Forming STATCOMs" and includes the IEEE logo. It outlines the "GFM Requirement Specification" with four main categories:

- 01 Small Signal Performance Requirements**
 - Small Step in Voltage Magnitude and Phase
 - Response to Step in Short Circuit Level
 - Damping (POD, SSO, harmonics, DC)
 - Voltage Balancing
- 02 Large Signal Performance Requirements**
 - Large Step in Voltage Magnitude and Phase
 - STATCOM Fault Ride-Through Operation: Symmetrical and Asymmetrical faults
 - Fault Current Contribution
- 03 Simulation Models and Documentation**
 - Software-in-the Loop (SIL) testing
 - Detailed modeling of converter with control and protection for all cells
- 04 Information to be Provided in the Bid**
 - Performance validation using SIL:
 - Step Verification for voltage magnitude and phase angle, short circuit level
 - STATCOM Fault Ride-Through Operation

그림 2-8. GFM STATCOM 성능요구의 구조: small/large signal, simulation model, bid information 을 함께 요구한다.

E-STATCOM: 저장장치 없이도 GFM 기능을 제공할 수 있는가

E-STATCOM 세션은 GFM 을 BESS 에만 묶지 않았다. DC-link 와 내부 에너지 여유를 이용해 짧은 시간의 유효전력 응답, 전압원 거동, damping 을 제공하고, longer-duration energy 가 필요하지 않은 문제에서는 GFM STATCOM 을 별도 자원으로 본다. Hydro-Québec 사례는 풍력 비중이 높은 Gaspésie 지역의 진동·전압 문제를 대상으로 동기조상기, 계통보강, GFM STATCOM 을 EMT 에서 비교했고, Xinjiang 500 MW 풍력단지 사례는 control-mode switching, active/reactive power, inertia response, phase-angle step, short-circuit test 까지 commissioning 단계에서 확인했다.

STATCOM with Energy Storage
STATCOM vs. E-STATCOM

	STATCOM	E-STATCOM
Topology	Delta / Star *)	Double Star + Supercapacitors
Energy storage (active power)	No	Yes (for seconds)
Grid forming capabilities	- Inherent reaction to voltage disturbances in grid - Supporting integration of RES: fault current and system strength contribution - Inherent reduction of system unbalances during faults - Stabilizing the grid voltage also at very low short-circuit ratio (<1)	- Provision of inertial response for frequency support - Fast frequency response

*) Converter configuration performance varies depending on fault type

Source: IEEE GM 25 Tutorial: "Functional Performance requirements for Grid Forming STATCOM"

그림 2-9. 일반 STATCOM 과 E-STATCOM 의 기능 비교. GFM 성능은 에너지 저장 유무보다 요구 시간대와 current limit 를 함께 봐야 한다.

Commissioning Tests Performed

The following Commissioning Tests were performed and evaluated according to IEEE 2800-2022 Clause 6 and IEEE 1303 Clause 5.3:

- Control Mode Switching Test
- Active Power Control Test
- Reactive Power Control Test
- Inertia Response Test
- Phase Angle Step Change Test
- Voltage Small Disturbance Test
- Short Circuit Test

그림 2-10. 실제 E-STATCOM commissioning 에서 수행한 성능시험 묶음. 모델-기능사양-현장시험을 하나의 acceptance chain 으로 연결한다.

이 장에서 남는 질문

- 국내 계통에서 NSCR 과 impedance-based metric 의 false-negative 를 어떤 EMT dataset 으로 보정할 것인가?
- GFM 의 grid-strength contribution 을 Q/V , P/θ , V/I scan 중 어떤 시험으로 표준화할 것인가?
- 동기조상기·GFM-BESS-E-STATCOM 의 위치와 정격을 안정도·보호·비용의 공통 기준으로 비교할 수 있는가?
- screening threshold 를 고정값이 아니라 계통상태·dispatch 에 따라 갱신할 수 있는가?
- GFM-BESS 와 GFM STATCOM 의 요구 지속시간·current limit·현장시험을 기능별로 구분할 수 있는가?

SCR 로 Screening 하지 못한 진동은 주파수·운전점·상호작용으로 설명해야 한다

SSO 와 converter-driven stability 사례를 이용해 topology screen 에서 MIMO impedance, EMT validation 까지 이어지는 분석을 정리한다.

이 장의 답 진동을 발견한 뒤 단일 설비의 SCR 만 낮춰보는 것으로는 부족하다. series compensation·기계축·PLL·PPC·UPS 제어의 결합을 주파수영역에서 분리하고, 운전점과 limit 가 포함된 EMT 로 재현한 뒤 완화책의 위치·대역·지연을 확인해야 한다.

SSO 는 resonance-driven 과 control-driven 으로 나눠 본다

SSO 분석은 국제 사건, 공진 조건, topology screening, 상세 frequency scan, mitigation, monitoring-protection 을 하나의 절차로 연결한다. series-compensated line 에 풍력발전소가 radial 로 남는 고전적 SSCI 는 topology 가 강한 단서다. 반면 인접한 여러 PV-converter 의 17–23 Hz mode 처럼 단일 SMIB 나 기본주파수 SCR 로 설명되지 않는 사건은 multi-infeed impedance 분석이 필요하다.

Outline



- What is SSO and what are the different drivers?
 - International experiences/global occurrences
 - Resonance mechanisms/conditions under which SSO can occur
- Resonance-driven SSO
 - Screening Studies
 - Detail Studies
 - Evaluation of mitigation measures
 - Monitoring and protection evaluation
- Non-resonant SSO
 - Impedance-based analysis in single and multi-IBR system
 - Case studies
 - Sizing of a GFM resource to provide grid strength and mitigate SSO

그림 3-1. SSO tutorial 의 전체 분석 범위: 사건 유형, screen, detail study, mitigation, monitoring 을 연결한다.

Summary



- Impedance-based analysis provides a systematic solution for evaluating the root-cause of power system oscillations using highly accurate Blackbox EMT models of IBRs.
- Use of SCR can result in over-optimistic estimation of grid strength.
- Grid strength seen by an IBR can be significantly impacted by other IBRs in proximity at non-fundamental frequencies, which can result in instabilities and oscillations.
- For more detail, refer this report: **Australian Energy Market Operator (AEMO), Analysis of Sub-Synchronous Oscillations in West Murray Zone Power System in Australia, July 2025.**
 - Report Link: https://www.aemo.com.au/-/media/files/initiatives/engineering-framework/2025/analysis-of-sub-synchronous-oscillation-in-west-murray-zone-power-system-in-australia---external.pdf?rev=91a3c919b83246b7b24835f0339b85e6&sc_lang=en

그림 3-2. 다중 IBR 계통에서는 비기본주파수에서 인접 설비가 체감 grid strength 를 바꿀 수 있다.

Converter-driven stability: 제어기는 계통의 일부다

Converter-dominated 계통의 안정도 논의는 전통적인 rotor-angle-voltage-frequency stability 에 converter-driven-resonance stability 를 더한다. GFL 의 PLL, current controller, plant voltage controller 와 통신·연산 지연은 phase margin 을 낮출 수 있다. 같은 제어기라도 P/Q 운전점과 계통 임피던스가 바뀌면 damping 이 달라지고, LVRT 중 과도한 유효전류 요구가 전압 dip 과 위상 편차를 악화시킬 수 있다.

LCC-HVDC, MMC-HVDC, 동기발전기 축이 결합된 Gravelines 사례는 장치의 통상 역할만으로 안정화 효과를 단정할 수 없음을 보여준다. 일부 운전점에서 MMC 를 STATCOM 처럼 운전하면 특정 torsional mode 의 damping 이 오히려 나빠질 수 있고, 별도 damping controller 가 필요하다. 핵심은 ‘STATCOM 이 좋다’가 아니라 어떤 mode 에 어떤 제어 경로가 energy 를 공급하거나 흡수하는지 확인하는 것이다.

6. Conclusions

- 1) Subsynchronous torsional oscillations:
 - Inherent shaft mechanical modes interact with AC system,
 - Observed in practice on multiple systems,
 - HVDC and other converters deteriorate stability,
- 2) LCC HVDC interacting with nuclear generator:
 - Low AC grid strength deteriorates stability,
 - High HVDC loading has negative impact,
 - Small-signal model enables accurate and convenient study interactions:
 - Eigenvalue study,
 - Parametric studies,
- 3) 3-way dynamic interactions between LCC HVDC, MMC HVDC, and thermal generator
 - STATCOM has negative impact,
 - Instability is possible, for some operating conditions,
- 4) Subsynchronous damping control design for MMC HVDC:
 - Design using analytical model (input-output pairing, lead-lag and washout filtering,...),
 - Verification and final tuning on detailed EMTP model,
 - SSDC improves damping of 6.3 Hz mode, but does not interfere with normal HVDC controls,

그림 3-3. HVDC-동기기-MMC의 3-way torsional interaction에서 운전점과 제어기 역할을 구분한 튜토리얼 결론.

실무 분석: 발견-설명-확인-수용

단계	질문	대표 도구	산출물
발견	어디·언제 위험할 수 있는가?	topology, SCR/NSCR, PMU/DFR spectrum	고위험 POI·사고·주파수 후보
설명	어떤 장치·제어가 mode를 만드는가?	passive/dynamic scan, MIMO impedance, eigen/participation	mode-damping·원인·민감도
확인	fault-limit·보호에서도 현상이 남는가?	large-signal EMT, parameter sweep	재현 파형·limit activation·mitigation ranking
수용	모델·설정·장치를 실제로 믿을 수 있는가?	CHIL/PHIL, field replay, commissioning test	acceptance evidence·운영 범위

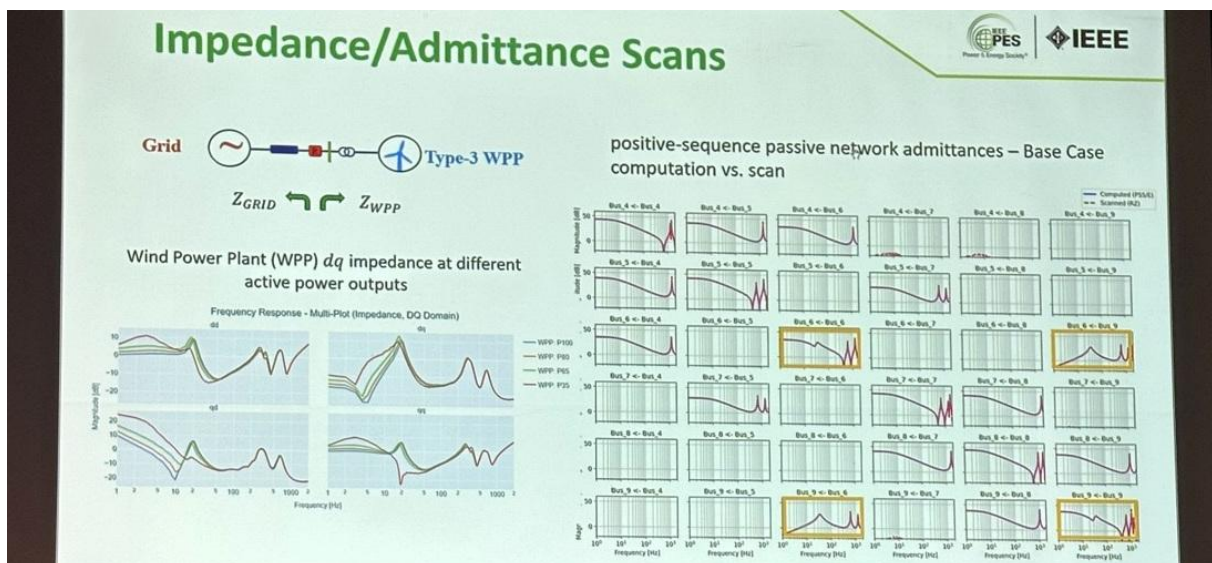


그림 3-4. 현장 발표의 frequency-domain 결과 예시. 주파수 scan은 위험 후보와 원인을 좁히고 EMT 검증의 입력을 만든다.

동기조상기도 impedance 관점에서 다시 본다

동기조상기는 기본주파수의 단락용량과 전압지원을 높이지만 모든 주파수에서 안정성을 보장하지 않는다. flywheel 과 shaft 를 단일 inertia 로 축약하면 torsional mode 를 놓칠 수 있고, 계통을 강하게 만들면서 특정 resonance 를 새로 만들 가능성도 있다. 따라서 배치 전후의 impedance scan, 기계 2-mass 이상 모델, protection-fault study 를 함께 수행해야 한다. 이 점은 GFM 지원자원도 동일하다. 기본주파수에서 '강한' 장치가 광대역에서 항상 positive damping 을 제공하는 것은 아니다.

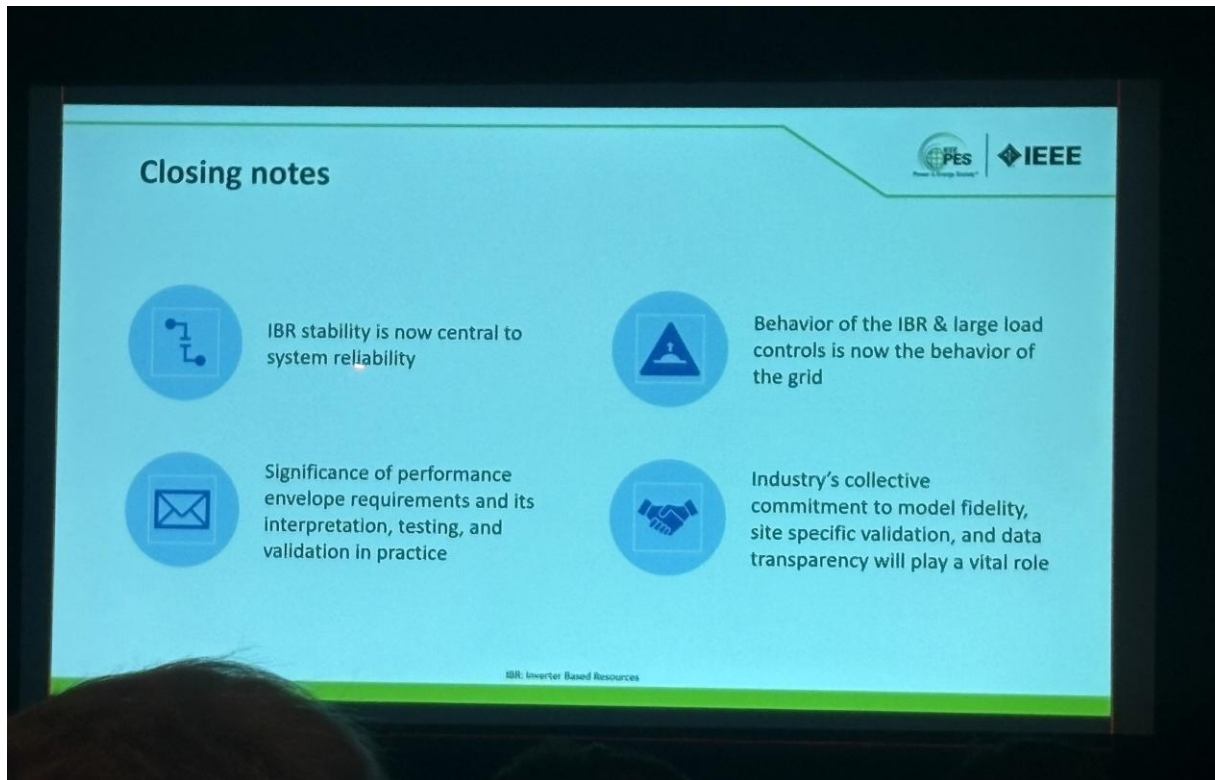


그림 3-5. emerging stability risks 를 정리한 현장 발표의 closing notes. stability assessment 는 단일 지표가 아니라 operating envelope 를 다룬다.

이 장에서 남는 질문

- Chirp 기반 wideband scan 이 기존 주파수별 scan 과 같은 mode-damping-ranking 을 더 빠르게 보존하는가?
- black-box OEM model 을 이용한 MIMO impedance 측정에서 operating-point dependency 를 어떻게 자동화할 것인가?
- 진동 완화장치의 효과를 특정 파형 개선이 아니라 dissipative energy 와 decision ranking 으로 비교할 수 있는가?
- 동기조상기-GFM-HVDC 의 전기·기계 mode 를 함께 포함한 acceptance envelope 를 만들 수 있는가?

관측·AI·광역 EMT 는 하나의 모델 lifecycle 로 연결돼야 한다

PMU 와 현장 데이터에서 시작해 digital twin, wide-area EMT, utility 검증 workflow 까지 이어지는 판단 체계를 정리한다.

이 장의 답 계통을 크게 계산하는 것만으로는 운영가치가 생기지 않는다. PMU·DFR·현장시험으로 현상을 관측하고, 모델을 보정하며, AI 와 EMT 로 후보를 반복 평가하고, 결과를 운영자 도구와 보호·제어로 되돌리는 lifecycle 이 필요하다.

계획 문제는 여러 시간축을 함께 다룬다

송전계획은 대규모 부하, 극한기상, GETs-FACTS, 통합계획을 하나의 quantitative planning 문제로 묶어야 한다. 데이터센터는 forecast uncertainty 와 접속 속도를 높이고, 기후위험은 과거 평균에 기반한 계획을 약화시키며, DLR-FACTS 는 기존 자산의 전송능력을 유연하게 만든다. 하지만 새로운 유연성은 실시간 계측·소프트웨어·운영 playbook 이 없으면 계획 용량으로 환산하기 어렵다.

Introduction of Tutorial

Outline

1:00 – 1:20pm	Introduction and Overview
1:20 – 2:40pm	Large Loads Impact on Transmission Planning
2:40 – 2:50pm	Break
2:50 – 3:30pm	Extreme Weather Impacts on Transmission Planning
3:30 – 4:30pm	Transmission Planning with Grid Enhancing Technologies and FACTS Devices
4:30 – 5:00pm	Enhancing Transmission Planning with Integrated Planning Methods



그림 4-1. Transmission Planning tutorial 의 구성: large load, extreme weather, GETs/FACTS, integrated planning.

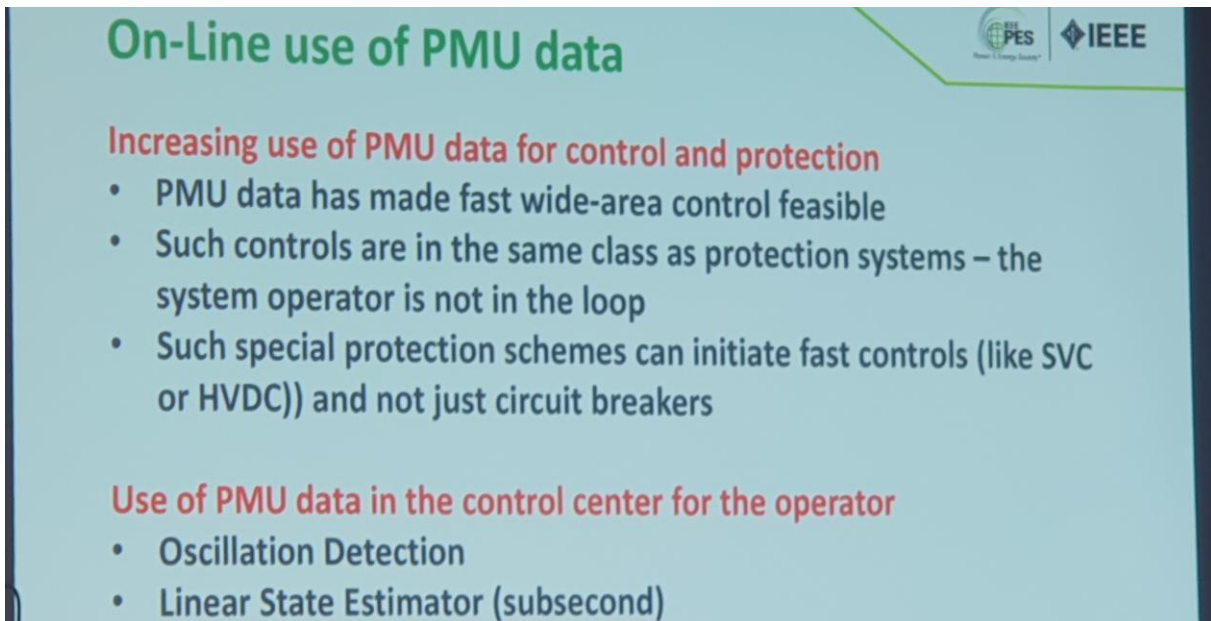
Coordination with Distribution Planning

- On the distribution system, many utilities consider a “large load” to be between 10 to 30 MWs. They are often connected on dedicated distribution or sub-transmission circuits.
- While the loss of a single distribution “large load” may not impact the bulk power system, the aggregate loss of many of these loads can cause reliability issues.
- However, a lack of coordination between T&D planners, may lead to under/overestimate of upgrade needs, thus leading to inefficient solutions.
- Distribution large loads should have similar requirements as transmission large loads.

그림 4-2. 송전·배전 planning 이 분리되면 여러 대형부하의 집합 위험과 upgrade 필요를 잘못 평가할 수 있다.

PMU의 역할: 더 빠른 측정이 아니라 더 나은 운영 기준

PMU 세션은 phasor data 가 이미 planning 과 operation 을 잇는 실무 자산임을 보여줬다. 오프라인에서는 event detection, oscillation-harmonic 분석, special protection scheme 설계에 쓰이고, 온라인에서는 wide-area protection-control, oscillation detection, PMU-only state estimation 을 지원한다. 다만 PMU 값을 제어실에 더 많이 표시하는 것만으로는 부족하다. 운영자가 이해할 수 있는 mode, damping, 위치, confidence 와 권고 행동으로 변환해야 한다.



On-Line use of PMU data

Increasing use of PMU data for control and protection

- PMU data has made fast wide-area control feasible
- Such controls are in the same class as protection systems – the system operator is not in the loop
- Such special protection schemes can initiate fast controls (like SVC or HVDC)) and not just circuit breakers

Use of PMU data in the control center for the operator

- Oscillation Detection
- Linear State Estimator (subsecond)

그림 4-3. PMU 데이터의 온라인 활용: 빠른 보호·제어, special protection scheme, 운영자 진동 탐지를 연결한다.

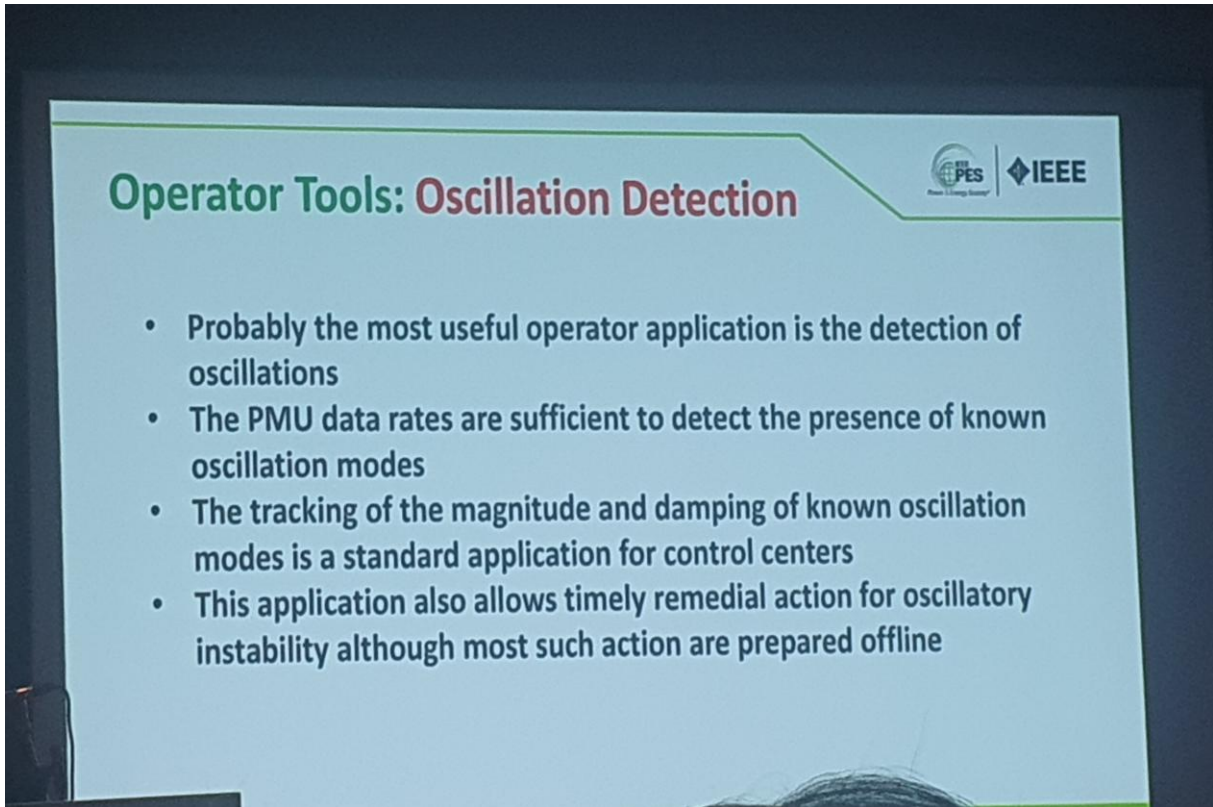


그림 4-4. 운영자 도구로서의 oscillation detection. 알려진 모드의 크기·damping 추적과 미지 모드 탐지를 구분한다.

이 관측층은 광역 EMT 와 경쟁하지 않는다. PMU·DFR 은 실제 사건의 초기조건과 응답을 제공하고, EMT 는 관측된 현상이 어떤 제어·보호·한계기에서 비롯됐는지 재현한다. digital twin 과 AI 는 여러 snapshot-contingency·설정 후보를 반복 실행하고, 새로운 사건이 들어오면 모델과 위험 순위를 갱신한다. 따라서 데이터 품질, time alignment, topology version, model parameter provenance 가 solver 선택만큼 중요하다.

플랫폼 세션: 더 큰 계통을 돌리는 방법은 하나가 아니다

Day 2 wide-area EMT 세션은 solver, hardware, co-simulation, data interoperability 의 서로 다른 병목을 보여줬다. NYPA 계열 발표는 FPGA 기반 data exchange broker 와 자동 partitioning 을 이용해 vendor-agnostic real-time/offline simulation 을 지향했고, Hydro-Québec 은 PROMES 와 EMT-RMS 연계를 통해 서로 다른 모델·도구의 interoperability 를 문제로 제기했다. PSCAD 발표는 PRSIM 변환, PNI, OpenMP subsystem solve, multi-rate, PMR, dynamic frequency scan toolbox 를 조합했다.

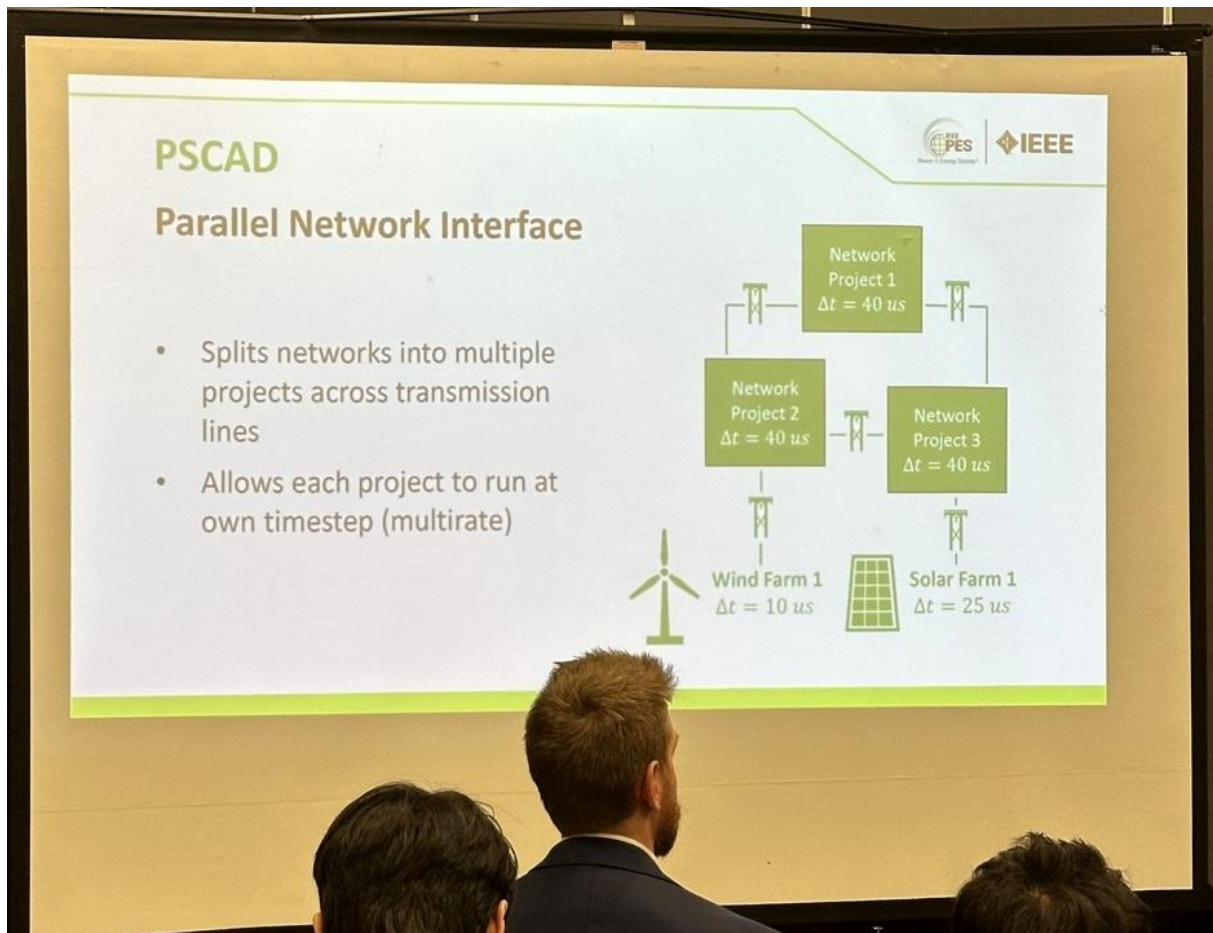


그림 4-5. 광역 EMT의 hardware/software architecture를 설명한 현장 슬라이드. partitioning-data exchange-real-time constraint가 함께 설계된다.

또 다른 발표는 partial refactorization, Jacobian update, cache optimization, Linux execution, OEM DLL 최적화를 통해 계산시간을 줄였다. 이 사례들은 '새 solver 하나'보다 네트워크 행렬, 장치 모델, 메모리, I/O, 병렬 통신을 함께 최적화해야 함을 보여준다. 특히 네트워크 solve가 빨라질수록 OEM black-box model의 계산비와 모델 호출 방식이 새로운 병목이 된다.

Utility practice: 규모보다 검증 체계를 비교해야 한다

기관/사례	규모·방향	핵심 기여	의의
Eversource	10만 bus 급 QPS 목표, OEM PSCAD co-sim	500-bus 사례에서 독립 약 20×, co-sim 약 10× 가속	solver와 detailed OEM model을 병행하고 speedup 조건을 분리 보고
ISO-New England	5,600+ 3상 bus, 700+ dynamic instances	generic model 표준화, daily 적용, point-on-wave field replay	네트워크보다 model instance-version-검증이 운영 병목
T&D 통합 사례	PSS/E-Aspen/CAPE-CYME 융합, feeder surrogate	graph boundary, VSM equivalent, 병렬 실행	collector-feeder 상세도가 안정/불안정 결론을 바꿀 수 있음
NYPA	약 5,500 bus full EMT, 지속적 ISO update	PF→fault→dynamics→field replay 4단계 검증	초기 변환보다 유지관리-identifier-zero-sequence 정합이 더 어려움

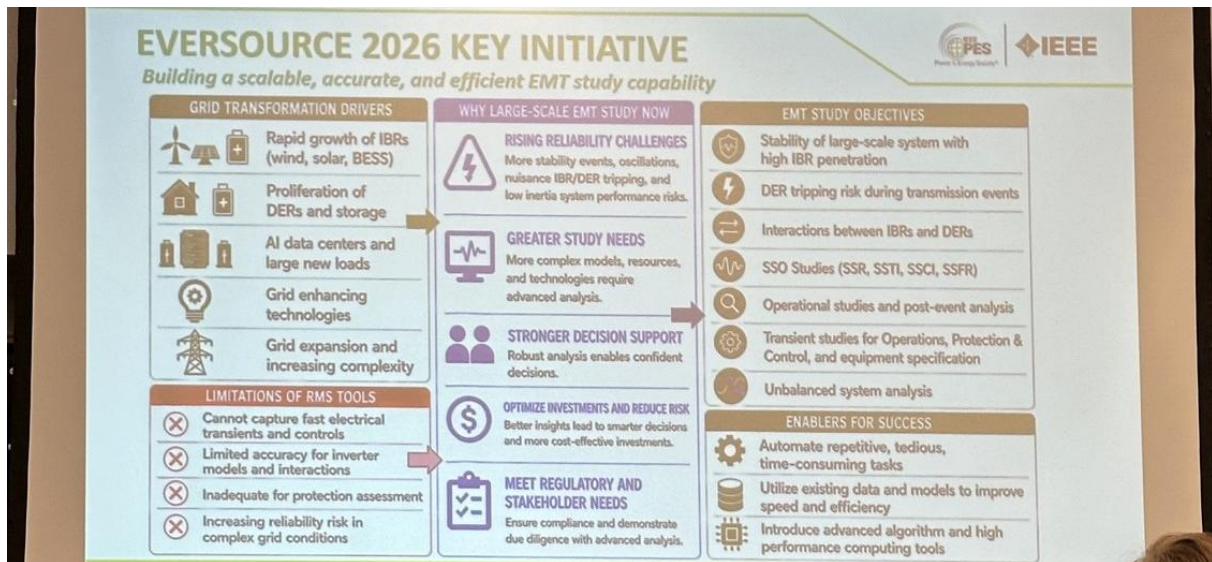


그림 4-6. Eversource 광역 EMT 개발 workflow 현장 발표. 자동화와 OEM co-simulation 을 병행한다.

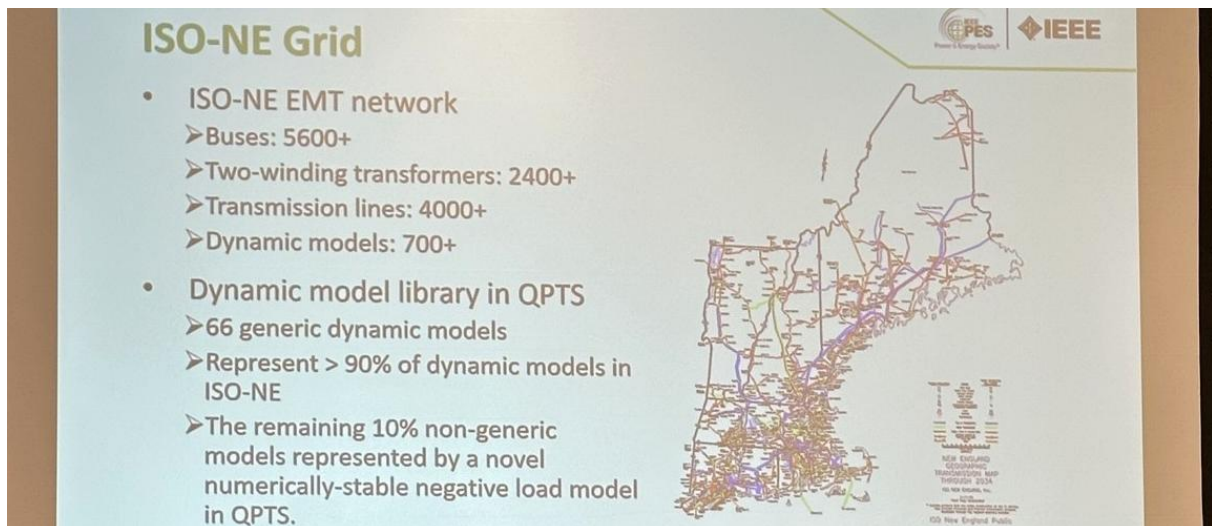


그림 4-7. ISO-New England의 전계통 EMT 적용 범위. 규모보다 generic/OEM model 관리와 field replay가 핵심이다.

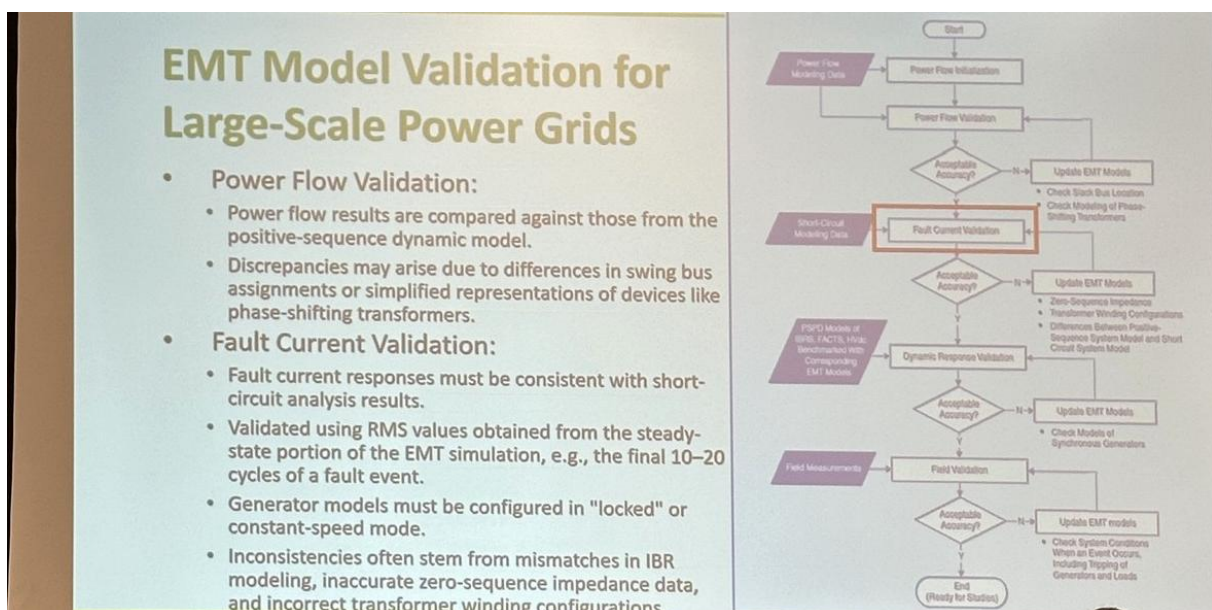


그림 4-8. NYPA model upgrade와 유지관리 과정을 설명한 현장 슬라이드. 지속적인 ISO model 변경을 흡수하는 governance가 필요하다.

모델 lifecycle 을 연구 성과로 측정한다

광역 EMT 프로젝트의 총 engineering time 은 변환, 수동 수정, model onboarding, 검증, parameter traceability, update 와 regression 으로 구성된다. wall-time 이 10 배 빨라져도 새로운 OEM model 을 넣을 때마다 수주간 수동 정합이 필요하면 operational value 는 제한적이다. 따라서 연구 성능지표를 simulation runtime 만이 아니라 onboarding time, validation coverage, update/re-run time, failure recovery, false-negative rate 로 확장해야 한다.

검증 방법	비교 지표	비교 대상	수용 기준의 방향
Power flow	V, angle, P/Q flow	steady-state snapshot	bus-branch mismatch 와 swing 분담을 명시
Fault	magnitude, sequence, breaker duty	short-circuit model	winding-grounding-generator state 를 통제
Dynamics	frequency, voltage, damping, mode	RMS/EMT event pair	mode-limit activation-ranking 보존
Field replay	point-on-wave waveform, relay action	PMU/DFR/relay data	모델-설정-time alignment acceptance
Regression	baseline case diff, failure rate	이전 승인 version	업데이트가 기존 의사결정을 깨지 않는지 확인

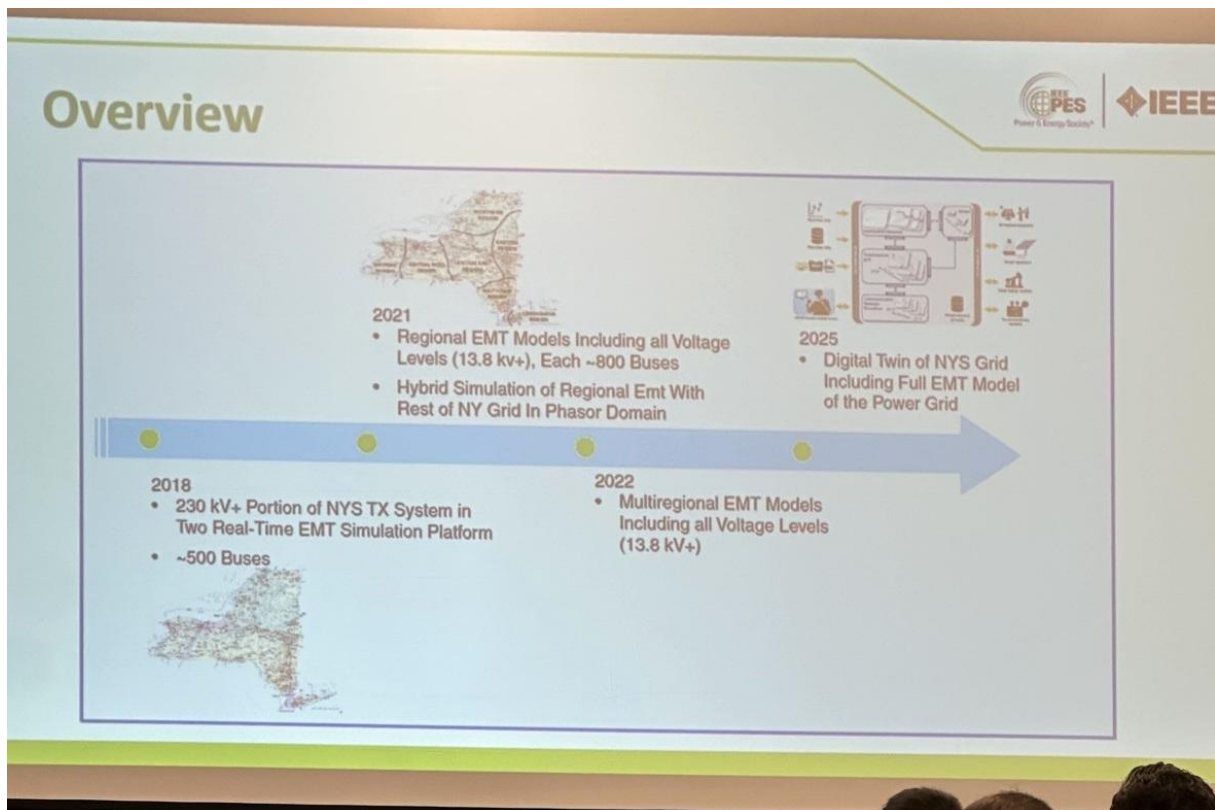


그림 4-9. NYPA 사례의 검증·운영 흐름. 광역 EMT 는 case conversion 이 아니라 반복 가능한 lifecycle 이다.

PSCAD 5.1 과 고속 EMT: 새로운 기능 소개

PSCAD 5.1 의 기능은 세 축으로 구분하는 편이 정확하다. OpenMP subsystem solve 는 단일 project 내부 병렬화, PNI 는 여러 project/process 로 계통을 분할하고 일부 경계에서 multi-rate 를 적용하는 공간·시간 병렬화, PMR 은 여러 contingency 를 사례 축으로 병렬 실행한다. PRSIM 은 PSS/E·PowerFactory data conversion 과 model substitution 을 돕고, Co-Simulation API 는 외부 프로그램 연결을 위한 범용 interface 다. 따라서 PSCAD 5.1 이 eTRAN 의 모든 역할을 그대로 대체한다고 단정해서는 안 된다.

하드웨어도 코어 수만 볼 수 없다. 대규모 sparse solve 와 state update 가 memory-bound 라면 같은 총 RAM 에서도 메모리 채널을 균형 있게 활성화한 구성이 유리할 수 있다. 다만 8×8 GB 가 2×32 GB 보다 좋다는 예시는 8-channel platform 을 전제로 하며, 일반 dual-channel PC 에는 그대로 적용되지 않는다. capacity, channel population, 1DPC/2DPC clock, NUMA, SMT, disk I/O 를 같은 benchmark 에서 측정해야 한다.

이 장에서 남는 질문

- 모델·데이터 version 과 total engineering time 을 추적하면서, surrogate-OEM model 의 fidelity 와 PMU-EMT 사건 재현을 자동 회귀시험으로 함께 검증할 수 있는가?

THEME 05

계통에서의 분석: HVDC·보호·정전·회복성

유럽 HVDC 전환, multi-terminal hub, 동적 송전용량, 이베리아 정전과 복구를 하나의 운영 프레임으로 본다.

이 장의 답 HVDC 와 GFM 의 기술 성숙도보다 상호운용성, fault response, 보호, 모델·replica·시험 기준, 운영 책임의 간극이 실제 적용을 지연시킨다. TSO 와 utility 는 구매자가 아니라 system integrator 가 되어야 한다.

단일 컨버터보다 AC/DC 시스템 상호작용을 본다

HVDC 에 대한 논의는 point-to-point link 의 제어 설계보다 DC hub, multi-terminal, meshed grid, multi-vendor interoperability 로 초점을 옮겼다. 여러 2 GW 급 link 가 한 DC node 에 연결되면 사고 시 대규모 전력 손실을 막기 위해 DCCB 와 선택적 고장구간 분리가 필요하다. 보호·재구성·grid controller 가 설비 이용률과 복구시간을 좌우한다.

유럽 사례에서는 topology 와 cable 단면적을 설비비만으로 정하지 않고 8,760 시간 부하·풍력 profile, 열관성, 고장확률, 복구시간, 에너지 손실을 함께 고려했다. multi-purpose interconnector 는 해상풍력과 국가 간 거래를 통합하지만, converter·cable 의 잔여용량 배분과 시장 규칙이 필요하다. 연구-실증-상용화 사이에는 공통 기능사양과 real-time demonstrator 가 핵심 연결고리다.



그림 5-1. 독일 계통전환에서 DC multi-terminal hub 가 필요한 이유. 개별 point-to-point 사업을 운영 가능한 DC system 으로 묶는 것이 과제다.



그림 5-2. 독일 북부의 첫 세 DC hub 구상. 대규모 해상풍력 연계를 위해 일정·표준·운영책임을 함께 맞춘다.

HVDC 가 계통운영 자원이 되는 세 가지 경로

운영 기능	추가 자료에서 확인한 방향	필요한 검증
주파수 지원	HVDC fast frequency response 를 발전기 탈락·system split 방지와 dispatch 에 반영	frequency-constrained UC, converter limit, 지역별 전달효과
전송용량	토양·열이력·주변조건을 반영한 dynamic cable rating 으로 일시적 thermal reserve 활용	sensor·digital twin 오차, ageing, N-1 이후 지속시간
복구·black start	offshore HVDC 와 converter 를 계통복구 경로와 voltage/frequency reference 로 활용	dead-grid energization, island transition, protection·통신

Conclusions

Significant operational cost savings can be achieved through FFR provision using HVDC links

By scheduling HVDC links intelligently, the maximum loss of infeed that the system can handle can be increased → positive effect on a systems resilience!

Developed model can be used in the CBA context, and can also be extended for operational decision making

그림 5-3. HVDC fast frequency response 의 운영·경제적 편익을 정리한 발표 결론.

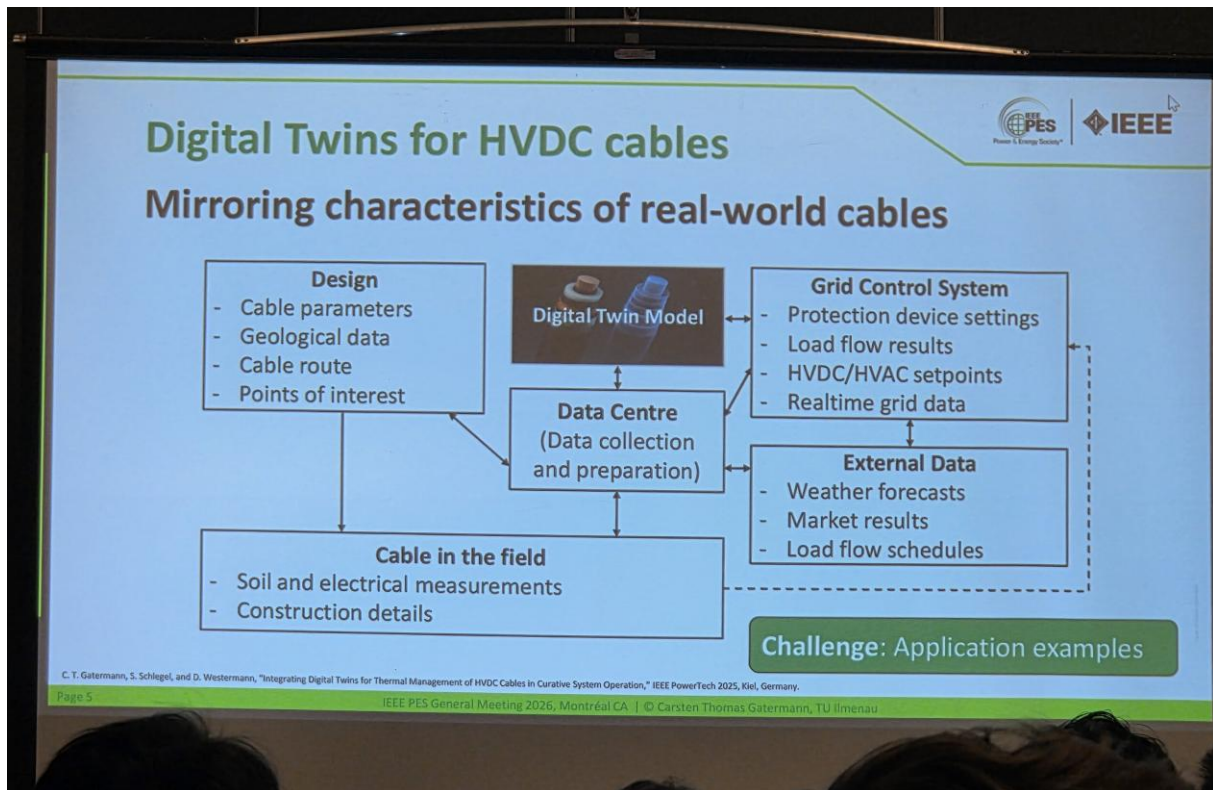


그림 5-4. 케이블 열용량을 고정 정격이 아니라 계측·모델 기반 운영자원으로 다루는 digital twin 개념.

Summary and conclusions

- Frequent small-signal **stability issues** in **converter-based systems** ⚠
- **Frequency-domain analysis: powerful** de-risking solution for power systems
 - **Accurate and detailed component modeling** 

High-fidelity models are essential for reliable stability predictions
 - **Assess stability across a wide frequency range**

Evaluate both low- and high-frequency dynamics to ensure stable integration
 - **Include both AC and DC dynamics**

Consider AC and DC system dynamics to reveal potential AC/DC interactions

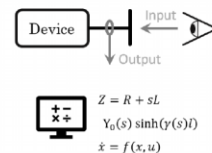


그림 5-5. converter-based AC/DC 계통에서 frequency-domain analysis 가 필요한 이유와 검증 원칙.

보호: 낮은 고장전류보다 '다른 고장응답'이 문제다

GFL-GFM IBR의 fault current는 동기기와 크기뿐 아니라 sequence, 위상, current limiting logic 이 다르다. positive-sequence 중심 응답, 제한된 negative-sequence current, current clipping 과 제어 모드 전환은 전통 계전기의 방향·거리·차동 판단을 바꿀 수 있다. 이는 IEEE 2800/P2800 계열과 각국 grid code 가 fault ride-through 와 current injection 을 재검토하는 이유이다.

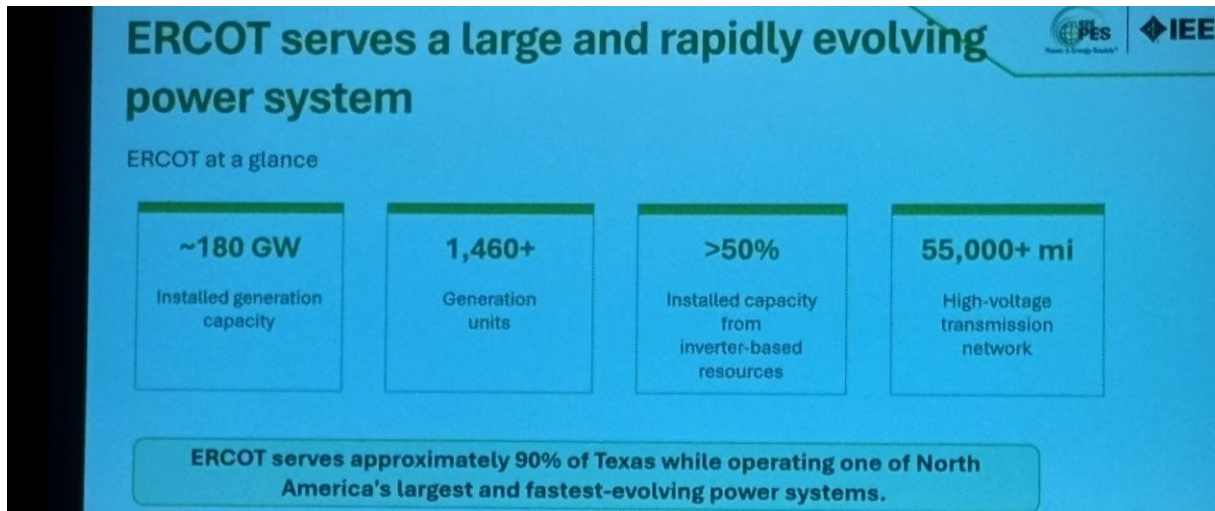


그림 5-6. 동기기 중심 계통에서 converter 중심 계통으로의 전환과 보호 요구 변화를 설명한 현장 발표.

데이터센터도 보호 대상인 동시에 계통에 영향을 주는 converter-based element 다. 시설 내부의 UPS, PSU, VFD, microgrid controller, backup generation 이 서로 다른 voltage/frequency threshold 로 동작하면 BPS 사건이 facility mode transition 으로 증폭될 수 있다. 따라서 grid-connected(GFL) → 분리 → islanded(GFM) → 재동기화 → 재연계 전 과정을 protection-control-EMT/HIL 로 검증해야 한다.

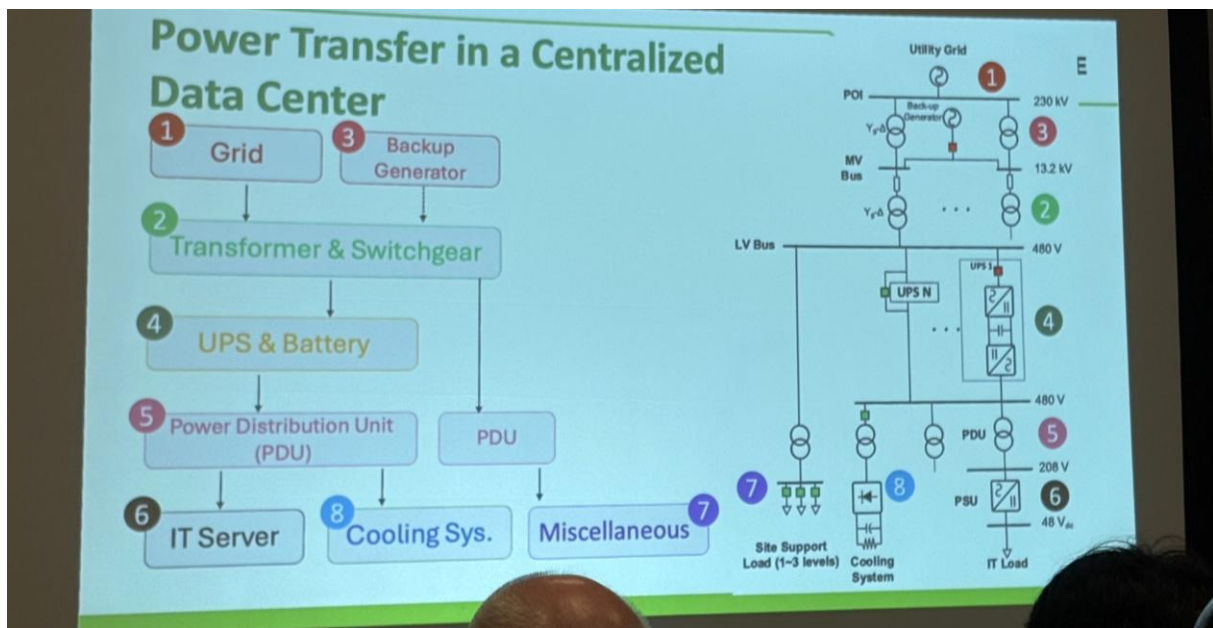


그림 5-7. 데이터센터 내부 전력전자 구성과 EMT 모델 계층을 설명한 현장 발표.

회복성: 기술 하나가 아니라 의사결정의 시간축

Resiliency of the Power Grid 슈퍼세션은 회복탄력성을 '더 강한 설비'로만 정의하지 않았다. 사전 위험 인지, 운영 중 적응, 사건 후 서비스 복구, 장기적 학습과 투자까지 시간 축을 넓혔다.

기후·사이버·공급망·인력 문제가 동시에 발생할 수 있어, 비용과 신뢰도를 단일 숫자로 최적화하기보다 중요부하, 지역, 복구 순서, 데이터 신뢰도를 명시해야 한다.

AI 는 scenario generation, outage prediction, 계획 자동화에 기여할 수 있지만 보안, 설명가능성, 재현성, on-prem 운영, 통신과 time synchronization 이 전제다. 현장 Q&A 가 반복해서 강조한 것은 'AI 를 썼다'가 아니라 어떤 데이터와 가정으로 어떤 운영결정을 지원하며, 실패할 때 사람이 어떻게 개입하는가였다.

이베리아 정전이 남긴 경고: 원인은 하나의 장치가 아니라 연쇄에 있다

2025 년 4 월 28 일 이베리아 정전을 다룬 학계와 RTE 발표는 강조점이 달랐지만 공통적으로 단일 원인 설명을 경계했다. 사건 전 진동과 전압상승, 무효전력 제어여유, 계통 topology, 발전·부하 탈락, 국가 간 연계선 응답, 보호와 운영조치가 짧은 시간에 연쇄됐다. 학계 발표는 overvoltage-driven cascade 와 데이터·모델 공유의 중요성을, RTE 발표는 부적절한 voltage control, 불충분한 준비, 운영여유, 낮은 system margin 이 결합한 복합 원인을 강조했다.

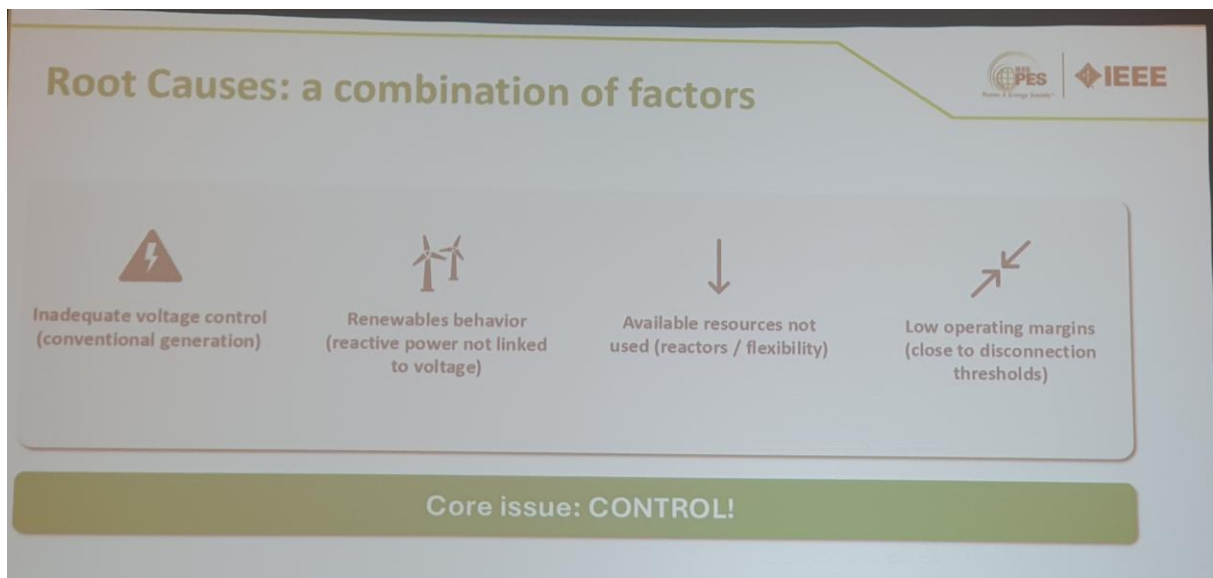


그림 5-8. RTE 관점에서 정리한 이베리아 정전의 복합 원인. 핵심 쟁점은 특정 기술의 유무가 아니라 voltage control 과 운영여유의 통합이다. (추가 자료 현장 촬영)

이 사례가 GFM 이나 HVDC 의 필요성을 곧바로 입증하는 것은 아니다. 오히려 새로운 제어자원을 도입할 때 정상상태 성능, 외란 중 current limit, protection, wide-area oscillation, islanding, restoration 을 같은 acceptance case 에서 확인해야 한다는 근거이다. 사고 후 분석 역시

PMU·SCADA·DFR·발전기·재생에너지·배전사업자 데이터를 공통 timeline 과 topology 에 맞춰야 하며, 서로 다른 모델이 같은 사건 순서를 재현하는지 검증해야 한다.

이 장에서 남는 질문

- multi-vendor HVDC 와 GFM 장치의 기능사양을 model-replica-HIL 시험으로 어떻게 연결할 것인가?
- IBR fault response 와 보호협조를 sequence-current limit-mode transition 관점에서 표준화할 수 있는가?
- 데이터센터 microgrid 의 GFL↔GFM 전환과 재동기화를 다양한 workload ramp 에서 검증할 수 있는가?
- 회복탄력성 연구가 복구시간뿐 아니라 중요서비스·형평성·데이터 신뢰도를 함께 평가하는가?
- 이베리아 정전과 같은 복합 사건을 단일 원인으로 환원하지 않고 공통 timeline-topology-model provenance 로 재현할 수 있는가?

C2GRID의 역할:

관측-모델-운영을 잇는 검증 플랫폼

학회에서 확인한 PMU·AI·EMT·HIL의 병목을 검증 가능한 연구 질문, 데이터셋, metric과 실험 순서로 바꾼다.

제안 현장·PMU 데이터 정합 → 위험 screen → 모델 상세도·경계 배정 → RMS·impedance·고속 EMT → HIL·field replay → 운영 판단을 하나의 재현 가능한 pipeline으로 묶는다. 속도는 목표가 아니라 더 많은 후보를 안전하게 평가하기 위한 수단이다.

권고 architecture

단계	입력	핵심 기능	검증 metric
1. Observation	PMU, SCADA, DFR, weather, asset/event data	time-topology 정합, 사건 탐지, data quality	coverage, latency, confidence
2. Data foundation	PSS/E, short-circuit, GIS, OEM, event data	identifier-version 정합, model manifest	변환 오류율, onboarding time
3. Risk screening	topology, SCR/NSCR, operating snapshots	고위험 POI-contingency-주파수 후보 선별	recall, false-negative, 계산시간
4. Detail allocation	위험도·mode·거리	boundary-timestep-model fidelity 자동 배정	decision preservation, model cost
5. Simulation	RMS, impedance, EMT, OEM co-sim	원인 설명·limit·비선형·복구 시나리오 평가	runtime, mode-event 일치
6. Validation	fault, field waveform, replica, HIL	PF→fault→dynamics→field→regression	limit-ranking-setting 보존
7. Decision layer	mitigation-operation·restoration candidates	GFM/HVDC/STATCOM/운영조치 비교	cost, robustness, acceptance envelope

우선 연구과제 1: 데이터센터 benchmark

첫 benchmark 는 전국계통 전체보다 데이터센터 load step-oscillation 이 적합하다. 입력 spectrum 과 사건 논리가 명확하고, 접속점 strength 와 boundary 상세도가 중요하며, GFM-BESS·E-STATCOM·POD 의 영향까지 평가할 수 있다. 같은 snapshot 에 SCR/NSCR/impedance metric 을 계산하고 일부 sample 만 상세 EMT 정답으로 만든 뒤, screen 이 위험 case 를 얼마나 놓치지 않는지 측정한다.

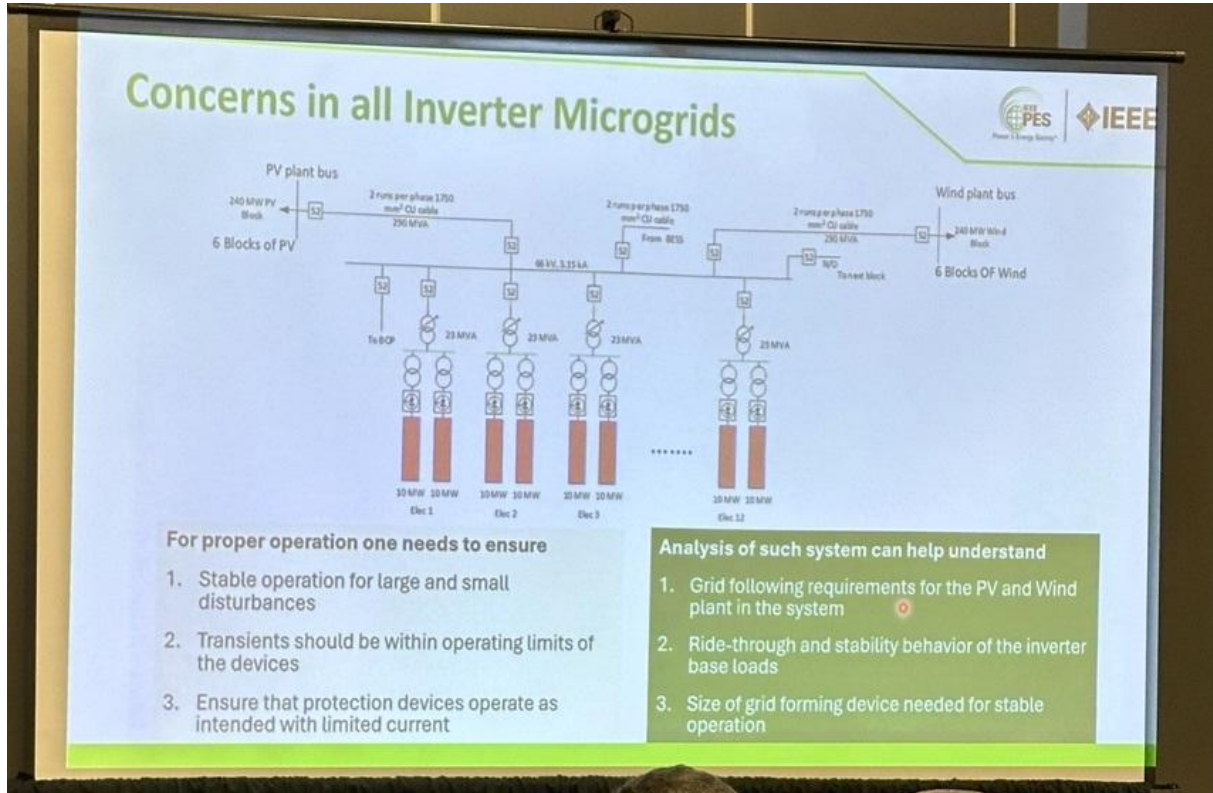


그림 6-1. 대형부하·지원자원 조합의 응답을 비교한 현장 결과 예시. 연구에서는 파형 오차뿐 아니라 완화책 ranking 보존을 평가해야 한다.

우선 연구과제 2: chirp 기반 scan 과 GFM 지원량 정량화

주파수별 정현파 주입과 impulse scan 은 시간 또는 신호대잡음비에 제약이 있다. 시간에 따라 주파수가 변하는 chirp 를 한 번 주입해 wideband impedance 를 추정하고, 기존 sweep 과 mode-damping-stability margin 을 비교한다. 이 결과를 GFM resource 의 Q/V , P/θ , V/I voltage-source behavior 와 연결하면 '필요하다'는 정성적 주장보다 위치·정격·대역을 정량화 할 수 있다.

우선 연구과제 3: PSCAD 5.1 speedup–accuracy map

기능 소개가 아니라 직접 실행한 map 이 필요하다. 동일 계통에서 memory channel, SMT, OpenMP thread, PNI project 수, multi-rate timestep, PMR case 수를 한 축씩 바꾸고 runtime-memory bandwidth·parallel efficiency·communication overhead·waveform error 를 수집한다. PRSIM 변환 case 는 power flow, fault current, dynamic response, engineering time 까지 baseline 과 비교한다.

실험 축	비교 조건	필수 관측값
메모리	동일 용량 2-channel vs all-channel balanced	bandwidth, NUMA, peak RAM, page fault
단일 project	OMP 1/2/4/8/16, SMT on/off	speedup, subsystem imbalance, CPU utilization
공간-시간 분할	single vs PNI 2/4/8, uniform vs multi-rate	sync overhead, waveform-event-time error
사례 병렬	sequential vs PMR vs PNI+PMR	throughput, license/core efficiency
변환	manual baseline vs PRSIM/eTRAN 가능 범위	PF/fault/dynamic mismatch, engineering time

논문화 가능한 평가 기준

- False-negative rate: screen 이 상세 EMT 의 불안정 case 를 얼마나 놓치는가.
- Decision preservation: boundary-surrogate-multi-rate 가 mitigation ranking 과 operating limit 를 보존하는가.
- Model lifecycle cost: 새로운 OEM model 과 network update 를 승인 case 에 반영하는 시간은 얼마인가.
- Validation coverage: PF-fault-dynamics-field-regression 중 어떤 층이 자동화되었는가.
- Total engineering time: solver time 과 사람의 변환·수정·검증 시간을 분리해 얼마나 줄였는가.
- Reproducibility: snapshot, model version, setting, random seed, hardware 를 manifest 로 재현할 수 있는가.

Real-Time Simulation:



Process of HIL Testing:

- **Model of Interest (MOI)**: The portion of the system of interest (**SOI**) modeled and instantiated on a real-time simulator (**RTS**).
- **Hardware of Interest (HOI)**: The portion of the system of interest (**SOI**) existing in hardware (original physical form) and interacting with the model of interest (**MOI**) through HIL interfaces.
- **HIL interface**: The interconnection facilitating the interaction between a model of interest (**MOI**) and a hardware of interest (**HOI**) in a hardware-in-the-loop (**HIL**) setup.

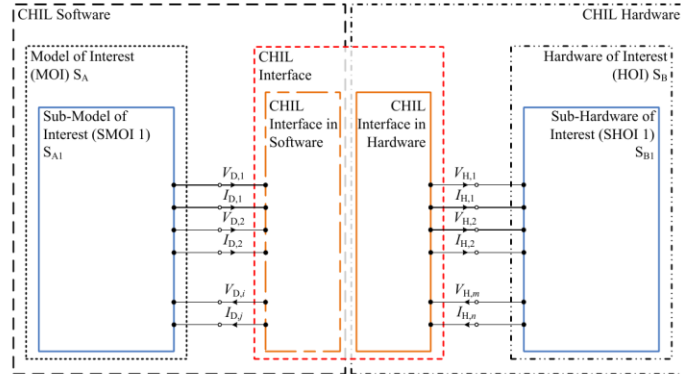


그림 6-2. HIL 에서 model of interest, hardware of interest, interface 를 명시하는 방식. 고속 EMT pipeline 도 경계와 책임을 같은 수준으로 기록해야 한다.

부록 A. Day 별 세션 지도

아래 표는 보고서의 주제별 재구성에서 원 세션을 다시 찾기 위한 지도다. 동일 세션이 여러 장과 관련될 수 있으나 가장 직접적인 주제에 배치했다.

Day	세션	보고서 연결
1	Large Load Integration in Modern Power Systems – Modeling, Challenges, and Reliability Impacts (Tutorial)	1 장 데이터센터 모델·연계·HIL
1	Grid-Forming Inverters and IBRs: EMT Modeling, Real-Time Simulation, and HIL (Tutorial)	2 장 GFM·표준, 5 장 보호, 6 장 HIL
1	Methods to Address Emerging Challenges and Opportunities in Transmission Planning (Tutorial)	1 장 T&D planning, 4 장 통합계획
1	Stability and Resilience in Inverter-Dominated Power Grids (Tutorial)	3 장 converter/HVDC 진동, 5 장 시스템 통합
1	Assessment of Risks of Sub-synchronous Oscillations – Screening and Validation (Tutorial)	3 장 SSO-impedance
2	Hosting Data Centers in Distribution Systems – Challenges, Strategies, and Solutions	1 장 배전 hosting-EMT model
2	Wide Area Modeling in EMT Mode	4 장 platform-solver-HPC
3	Modeling and Interaction of IBRs with Large Loads	1 장 AI 부하·완화장치, 3 장 상호작용
3	Alternative Solutions for Integration of IBRs in Extremely Low Strength Networks	2 장 약계통 solution portfolio
3	GFM 관련 세션	2 장 GFM 기능·사례, 5 장 보호
3	Data Center / HVDC panel and presentations	1 장 데이터센터, 5 장 HVDC integration
4	Screening Methods for EMT Studies and GFM Needs Identification	2 장 NSCR-screening, 3 장 ERCOT SSO
4	Wide-area EMT Studies of T&D Systems with High IBR and Data Center Penetration	4 장 utility workflow
4	The Role of Synchronous Condensers in Emerging Power Systems	2 장 지원자원, 3 장 impedance/torsional
4	IBR Standards and Next Steps / Fault Response / GFM Protection	5 장 보호·표준
4	Designing the Grid for the Digital World (Super Session)	Executive Brief, 1 장 계획·운영
4	Resources for Large Data Centers (Super Session)	1 장 resource portfolio·유연성
5	Resiliency of the Power Grid (Super Session)	5 장 회복탄력성
추가	HVDC Grid Evolvment and Related Grid Transformation in Europe	5 장 HVDC 운영·DC hub-dynamic rating·복구
추가	Performance Specifications for Grid-Forming Inverter-Based Resources	2 장 GFM 성능기준-ERCOT-OEM-ISO 관점
추가	E-STATCOM Applications and Field Performance Testing	2 장 E-STATCOM 기능·지역계통·commissioning
추가	Simulation and Analysis of the 2025 Iberian Blackout	5 장 전압안정도·복합 원인·데이터 거버넌스
추가	Impact of PMU Measurements on Grid Planning and Operations	4 장 관측·진동 탐지·wide-area control
추가	AI in Grid Planning & Operations / Industrial AI and Data Centers	1 장 산업 AI, 4 장 digital twin-workflow

부록 B. 핵심 용어

용어	이 보고서에서의 의미
CILR	계통 외란 후 customer-initiated load reduction. 대형 전자부하의 집합 감축·탈락을 포함한다.
CMLD	복합 배전부하 모델. 모터·정적부하·전자부하-feeder 를 집합적으로 표현한다.
PERC1	대형 전력전자 부하의 cease, momentary cessation, multi-step ride-through 와 reconnection 을 표현하는 RMS 계열 모델.
GFL/GFM	GFL 은 외부 전압 기준을 추종하고, GFM 은 전압의 크기·위상을 형성하는 voltage-source behavior 를 지향한다.
SCR/NSCR	SCR 은 단일 POI 의 빠른 계통강도 지표, NSCR 은 다중 POI 와 기술별 동적 임피던스를 반영하는 확장 지표다.
SSO/SSCI/SSTI	동기주파수 이하의 진동, converter control 과 series compensation 의 상호작용, 전력전자와 기계축의 상호작용을 각각 강조하는 용어.
Impedance scan	장치·계통의 주파수응답을 측정해 resonance, mode, stability margin 을 분석하는 방법.
Wide-area EMT	전계통 또는 광역 영역을 상세 EMT 로 구성해 converter·불평형·비선형·고주파 현상을 분석하는 workflow.
PNI/PMR	PSCAD 에서 계통을 여러 project/process 로 나누는 병렬 인터페이스와 여러 사례를 동시에 실행하는 병렬 run.
CHIL/PHIL	실제 controller 또는 power hardware 를 real-time simulation 과 연결해 model-interface-setting 을 검증하는 시험.
Decision preservation	축약·가속 모델이 파형뿐 아니라 안정/불안정 판정, limit, mitigation ranking 같은 의사결정을 보존하는 성질.
PMU/DFR	동기 위상·주파수·전압·전류 또는 고해상도 사고파형을 기록해 사건 탐지, 모델 보정, 보호·제어 검증에 쓰는 계측 기반.
E-STATCOM	GFM 제어와 제한적인 유효전력 응답을 포함해 전압원 거동·damping 을 강화한 STATCOM 개념. 요구 지속시간과 시험조건을 명시해야 한다.
Dynamic cable rating	주변조건·열이력·계측과 digital twin 을 이용해 케이블의 시간가변 허용용량을 계산하는 운영기법.
Agentic workflow	사람이 정의한 계획-실행-검토 절차 안에서 모델·도구를 호출하고 결과를 정리하는 AI 기반 orchestration.

맺음말

이번 GM의 큰 그림은 데이터센터나 광역 EMT 한 분야로 좁혀지지 않는다. 대형부하의 접속과 계통지원 기술의 확대에 따라 계획·운영의 경계가 넓어지고 있다는 점이 핵심이다. 무엇을 관측하고, 어떤 모델로 설명하며, 어떤 시험으로 성능을 받아들이고, 사고 때 어떻게 보호·복구할 것인가. 이 질문을 하나의 lifecycle로 만들 때 현장 경험은 참석자의 기억을 넘어 연구실과 산업계가 반복해서 사용할 수 있는 자산이 된다.