

WMU 기반 실시간 적응형 디지털 트윈을 활용한 장거리 해저 HVDC 케이블의 고주파 진동 발생원 추적 및 판별에 관한 연구

김봉진*, 이주식*
한전KDN*

A Study on Tracking and Identifying High-Frequency Oscillation Sources in Long-Distance Subsea HVDC Cables Using WMU-Based Real-Time Adaptive Digital Twins

Bong-Jin Kim*, Ju-Sik Lee*
KEPCO KDN*

Abstract - 본 연구는 대규모 해상풍력 연계용 HVDC(High Voltage Direct Current) 계통에서 발생하는 고주파 진동(High-Frequency Oscillation, HFO) 문제를 해결하기 위한 지능형 진단 프레임워크를 제안한다. 특히 100km 이상의 장거리 해저 환경에서 발생하는 직접 계측의 한계를 극복하기 위해, WMU(Waveform Measurement Unit)와 DTS(Distributed Temperature Sensing), 그리고 해저 지형 데이터를 결합한 하이브리드 데이터 취득 기반 디지털 트윈 체계를 구축하였다. 제안된 시스템은 RLS(Recursive Least Squares) 알고리즘을 통해 케이블 파라미터를 실시간 갱신하며, DTW(Dynamic Time Warping) 알고리즘으로 진동 발생 원인을 정밀 판별한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 환경 변수 보정을 통해 파형 일치도를 기존 대비 15% 이상 향상시켰으며 발생원 특정 정확도를 획기적으로 개선하였다.

1. 서 론

최근 정부의 제10차 및 제11차 전력수급기본계획에 따른 탄소중립 이행 가속화로 인해, 호남권의 대규모 해상풍력 발전단지에서 생산된 무탄소 전원을 수도권 부하 중심으로 적기에 수송하는 것이 국가적 과제로 부상하였다. 이를 해결하기 위한 핵심 인프라로써 '서해안 HVDC 고속도로' 구축 사업이 추진되고 있으며, 이는 동해안-신가평 구간에 이은 국내 최대 규모의 장거리 전력 전송망 프로젝트로 주목받고 있다.[5]

그러나 이러한 대규모 전력망의 핵심인 전력전자 기반 컨버터(VSC-HVDC)와 인버터 기반 전원(IBR)의 급격한 증가는 계통내 제어기 상호작용(Control Interaction)에 의한 고주파 진동(High-Frequency Oscillation, HFO) 문제를 야기한다. 특히, 서해안 프로젝트와 같이 100km 이상의 장거리 해저케이블로 구성되는 계통은 높은 정전용량(Capacitance)으로 인해 특정 주파수 대역에서 공진(Resonance) 현상이 발생하기 쉽고, 이는 설비의 절연 파괴나 계통 붕괴로 이어질 위험이 크다.

장거리 해저 선로는 물리적 접근이 불가능하여 이상 징후를 직접 계측하기 매우 어렵다. 또한, 고주파 전송 거리에 따라 감쇠(Attenuation)와 위상 왜곡이 심각하게 발생하며, 해저면의 온도 변화와 수압 등 외부 환경 변수에 따라 케이블의 전기적 파라미터가 실시간으로 변동하는 특성을 갖는다. 기존의 정적 모델 기반 감시 시스템은 이러한 동적인 환경 변화를 반영하지 못해 진단의 정확도가 떨어지며, 단순한 임계치 기반 경보 방식으로는 복잡한 진동 발생 원인을 정확히 특정하는데 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 서해안 HVDC 고속도로와 같은 대규모 해저 전력망의 안정성을 확보하기 위해, 직접 계측 데이터와 공학적 추정 데이터를 결합한 하이브리드 데이터 취득 기반 적응형 디지털 트윈 프레임워크를 제안한다. 양단 WMU(Waveform Measurement Unit)의 고해상도 동기 데이터와 DTS(Distributed Temperature Sensing) 및 수압 모델을 연동하여 선로 파라미터를 실시간으로 보정하고, 이를 통해 획득한 가상 응답을

DWT(Dynamic Time Warping) 알고리즘으로 분석함으로써 진동 발생원을 정밀하게 판별하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 국가 핵심 전력 인프라의 안정 운영을 위한 지능형 진단 기술의 초석이 될 것으로 기대된다.

2. 본 론

2.1 하이브리드 데이터 취득 체계 (Hybrid Sensing Strategy)

본 연구에서 제안하는 시스템은 직접 계측 데이터와 공학적 추정 데이터를 결합한 '멀티레이어 데이터 취득' 방식을 채택하여 진단의 신뢰성을 확보한다.

■ 전기적 직접 계측(WMU): 육상 변환소 양단에 설치되어 전압(V), 전류(I), 위상(ϕ) 데이터를 256Sample/Cycle의 고해상도로 동기 수집하며, GPS 기반 타임스탬프(IEEE 1588v2)를 통해 μs 이내의 동기화 오차를 유지한다.

■ 물리적 보조 계측(DTS/BOTDA): 일반적인 DTS는 30~50km가 한계이므로, 장거리(100km+) 측정 한계를 극복하기 위해 양방향 BOTDA(Brillouin Optical Time Domain Analysis) 기술을 적용하여 전 구간 온도(T) 프로파일을 $\pm 0.1^{\circ}C$ 정확도로 확보한다.

■ 환경적 수치 추정(Virtual Pressure Sensor): 해저 지형도 기반 매설 깊이(h) 정보를 활용하여 외부 수압(P)을 실시간 계산한다 ($P = \rho gh$). [3]

■ [내부 상태 추정: WMU 데이터 기반 RLS 알고리즘을 통해 누설 컨덕턴스(G) 변화율을 감시하여 절연 열화 상태를 간접 추정한다.

2.2 물리적 원리 기반 모델링 및 신호 복원

디지털 트윈의 정밀도를 위해 환경변수가 전기적 파라미터(R, L, C, G)에 미치는 영향을 수식화한다. 특히, 장거리 송전선로의 정확한 모델링을 위해 주파수 종속 파라미터를 고려하는 Marti 모델의 원리를 적용한다. [2]

■ 온도-저항 관계: 구리 도체의 온도 계수($\alpha = 0.00393/^{\circ}C$)를 반영하여 실시간 저항(R)을 보정한다.

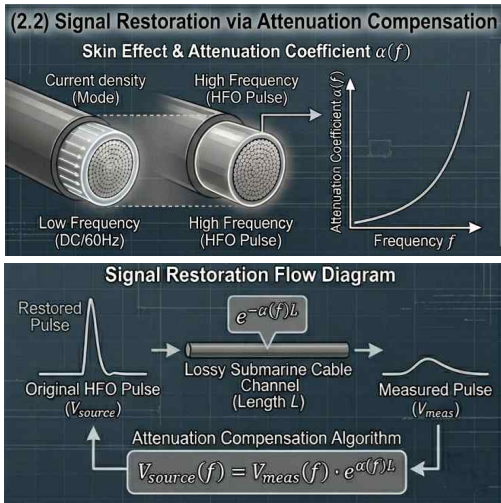
$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

■ 수압-정전용량 관계: 수압에 의한 절연체 압축 효과(압력 계수 $\beta \approx 1 \times 10^{-11} Pa^{-1}$)를 고려하여 정전용량(C)을 보정한다.

$$C(P) = C_0 [1 + \beta P] \quad [3]$$

■ 표피 효과 기반 감쇠 보상: 주파수가 높아질수록 전류가 도체 표면으로 쏠리는 표피 효과(Skin effect)를 반영하여 측정 전압(V_{meas})을 발생 시점의 전압(V_{source})으로 복원한다.

$$V_{source}(f) = V_{meas}(f) \cdot e^{a(f)L}$$



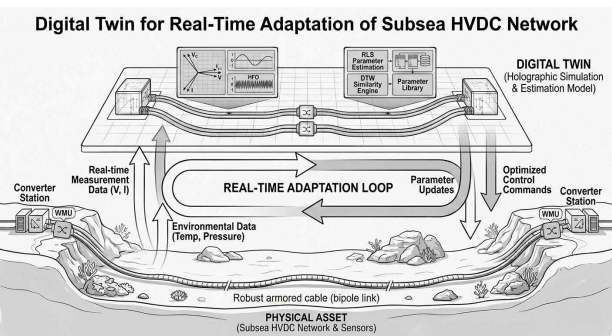
2.2 감쇠 보정에 의한 신호 복원

2.3 적응형 디지털 트윈 및 원인 판별 (RLS & DTW)

- 실시간 파라미터 업데이트: RLS 알고리즘을 사용하여 환경 변수가 반영된 전송선로 방정식의 R, L, C, G 값을 초 단위로 추정한다. 망각 계수(λ)를 0.98 ~ 0.999 사이로 설정하여 적응 속도와 잡음 민감도 사이의 최적점을 유지한다.
- DTW 기반 유사도 분석: 디지털 트윈에서 생성된 가상 진동 파형과 WMU의 복원 파형을 비교한다. DTW는 시간축의 미세한 왜곡을 허용하므로 장거리 전송 지연 환경에서도 높은 판별력을 가진다. [4]



2.3(a) 해저 HVDC망의 진단을 위한 D/T 시스템 아키텍처



2.3(b) 해저 HVDC 망의 실시간 적응을 위한 디지털 트윈 모형도

4. 시뮬레이션 환경 및 결과 고찰

4.1 시뮬레이션 구성 및 시나리오

PSCAD/EMTDC와 MATLAB 코-시뮬레이션을 통해 120km 장거리 HVDC 표준 모델을 대상으로 검증하였다.

Case 1	정상 운전 (기준 파라미터 적용)
Case 2	컨버터 제어기 간섭 (800Hz 주기적 진동 주입)
Case 3	절연 열화 (G 값 단계적 증가: $0.1\mu\text{S}/\text{km} \rightarrow 0.15\mu\text{S}/\text{km}$)

본 연구의 시뮬레이션과 및 시나리오의 구현 가정은 다음과 같다.

- 케이블의 기하학적 구조와 재료 특성은 제조사 데이터시트를 참고한다
- 해저 지형도 및 매설 깊이 정보의 정확도는 $\pm 1\text{m}$ 이내
- WMU는 양단 변환소에만 설치되며, 중간 구간에는 추가 계측기 없다.

4.2 결과 분석

정량적 지표로 정규화 상호상관계수(ρ)와 평균 제곱근 오차 (RMSE)를 사용하였다.

- 모델 정밀도 향상: DTS 데이터를 통해 온도 보상을 실시한 제안 모델은 정적 모델(RMSE 12.3V) 대비 RMSE를 7.5V로 낮추었으며, 상관계수를 0.94까지 향상시켰다.[1]
- 발생원 판별: DTW 알고리즘을 통해 '제어기 간섭'과 '절연 열화'에 의한 진동을 95% 이상의 유사도로 정확히 특정할 수 있었다.

시스템 성능비교		
정적모델	RMSE=12.3V	상관계수=0.82
온도 보정 적용	RMSE=9.1V	상관계수=0.89
제안 방법	RMSE=7.5V	상관계수=0.94

연구결과로 정적모델 대비 15% 이상의 성능향상을 확인하였으나, 다음의 한계점이 존재하므로 추가적인 연구가 필요함을 확인하였다..

- DTS(BOTDA방식) 설치 비용이 높다(약 10억 원)
- 수압 추정의 불확실성: 수심 측정 오차 $\pm 5\text{m} \rightarrow$ 수압 오차 $\pm 0.05\text{MPa}$
- RLS 알고리즘의 초기값 민감도와 DTW의 계산 복잡도 문제

5. 결론

본 연구는 WMU, DTS, 해저 지형 데이터를 통합한 하이브리드 데이터 취득 아키텍처와 적응형 디지털 트윈을 결합하여 장거리 해저 HVDC 진단의 신뢰성을 확보하였다. 실시간 RLS(Recursive Least Squares) 알고리즘을 통해 수온 및 수압 등 환경 변화에 따른 전기적 오차를 제거하였으며, DTW(Dynamic Time Warping) 기반 패턴 매칭 기술을 도입함으로써 기존 방식의 한계였던 '원인 판별 불능'상태를 성공적으로 극복하였다.

결과적으로, 제안된 지능형 진단 프레임워크는 직접 계측이 불가능한 극한 환경에서도 선로 상태를 역추적할 수 있는 독보적인 기술적 토대를 마련하였다. 이는 전력계통의 디지털 트윈 전환을 가속화할 뿐만 아니라, 에너지 안보 강화 및 안정적인 재생에너지 연계에 실질적으로 기여함으로써 국가 전력망 운영의 핵심 인프라 기술로 자리매김 할 것이다.

본 기술은 향후 서해안 HVDC 고속도로 등 대규모 전력망의 안정적 운영에 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.[5]

본 연구는 2026년도 정부(기후환경에너지부)의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 "직류 송배전시스템 확대 대응 전력계통 안정도 감시시스템 적용 기술 개발(RS-2025-02315150)" 과제의 성과입니다.

[참고 문헌]

- [1] IEEE Task Force on HVDC Oscillations, "Control Interactions in VSC-HVDC Systems," 2023.
- [2] J. Marti, "Accurate modelling of transmission lines," IEEE Trans. Power Appar. Syst., 1982.
- [3] Smith, R. et al., "Environmental effects on subsea cable impedance," 2024.
- [4] Berndt, D. J., & Clifford, J., "Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series," 1994.
- [5] KEPCO Research Institute, "Stability Analysis of West-Coast HVDC Highway," 2025.