

Studio e ottimizzazione di sistemi HVDC isolati in gas

N. Marconato^{a,b}, P. Bettini^{a,b}, F. Lucchini^{a,b}, P. Sonato^{a,b}

^a*Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII), Università di Padova, 35131 Padova*

^b*Consorzio RFX, Corso Stati Uniti 4, 35127 Padova*

Le linee di trasmissione isolate in gas (GIL) in corrente continua (DC) rappresentano una tecnologia promettente che potrebbe rivoluzionare il trasporto efficiente dell'energia elettrica, oltre ad essere una tecnologia chiave per lo sviluppo dei reattori a fusione nel prossimo futuro. L'evoluzione verso le GIL in alta tensione DC (HVDC) è guidata principalmente da due fattori: il miglioramento delle prestazioni dell'elettronica di potenza nelle stazioni di conversione e la crescente necessità di trasportare elettricità su lunghe distanze, talvolta superiori ai cento chilometri. Questi sistemi offrono numerosi vantaggi rispetto alle tecnologie convenzionali, quali:

- Efficienza di trasmissione: GIL HVDC consentono un trasporto di energia più efficiente su lunghe distanze, riducendo significativamente le perdite di trasmissione ed eliminando effetti secondari quali la presenza di campo magnetico esterno;
- Capacità di trasporto: Possono gestire potenze elevate, rendendole ideali per il trasporto di grandi quantità di energia prodotta da fonti rinnovabili o da futuri reattori a fusione;
- Flessibilità di installazione: Le GIL possono essere installate sottoterra o in edifici, riducendo l'impatto visivo e ambientale rispetto alle linee aeree tradizionali;
- Sicurezza: L'isolamento in gas offre una maggiore sicurezza rispetto ai sistemi convenzionali, riducendo il rischio di incendi e altri incidenti;
- Durata: Le GIL hanno una lunga vita utile e richiedono una manutenzione minima, riducendo i costi operativi a lungo termine;
- Compatibilità con i reattori a fusione: Le GIL HVDC potrebbero giocare un ruolo cruciale nel trasporto dell'energia prodotta dai futuri reattori a fusione, gestendo efficacemente le alte potenze generate, e certamente costituiscono la tecnologia principe per alimentare i potenti iniettori di fasci neutri (NBI) necessari al riscaldamento del plasma

Non mancano tuttavia sfide tecnologiche che richiedono di essere risolte per un'ampia diffusione della tecnologia nei sistemi GIL HVDC, come la necessità di ottimizzare il design per ridurre costi e complessità, la gestione dell'accumulo di carica elettrica nelle interfacce gas-solido e lo sviluppo di alternative all'esafluoruro di zolfo (SF₆) con un potenziale di riscaldamento globale (GWP) notevolmente inferiore.

Il gruppo di Padova lavora ormai da anni allo sviluppo di modelli numerici per lo studio e la progettazione di questi sistemi, tanto modelli in grado di considerare gli effetti non lineari negli isolanti solidi e nel gas causati dalla migrazione degli ioni, nonché degli effetti delle correnti di perdita iniettate dagli elettrodi in alta tensione, quanto approcci semplificati basati la più semplice formulazione quasi-elettrostatica nell'intero dominio, con una conducibilità non lineare la cui dipendenza funzionale è ottenuta dal fitting di dati sperimentali. Un metodo numerico basato sul criterio dello "streamer inception" è stato inoltre implementato per

stimare la tenuta di tensione di un sistema isolato in gas ed accoppiato ad un algoritmo di ottimizzazione automatica, con lo scopo di adattare la geometria delle aree critiche che soffrono un eccessivo stress elettrico e costituiscono potenziale origine di guasto elettrico.

È ora nella fase conclusiva di realizzazione un esperimento pensato per lo studio di questi sistemi, realizzato grazie a fondi PNRR, all'interno del progetto NEFERTARI finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU, che sarà operativo nel laboratorio di Alta Tensione del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova a fine 2025.

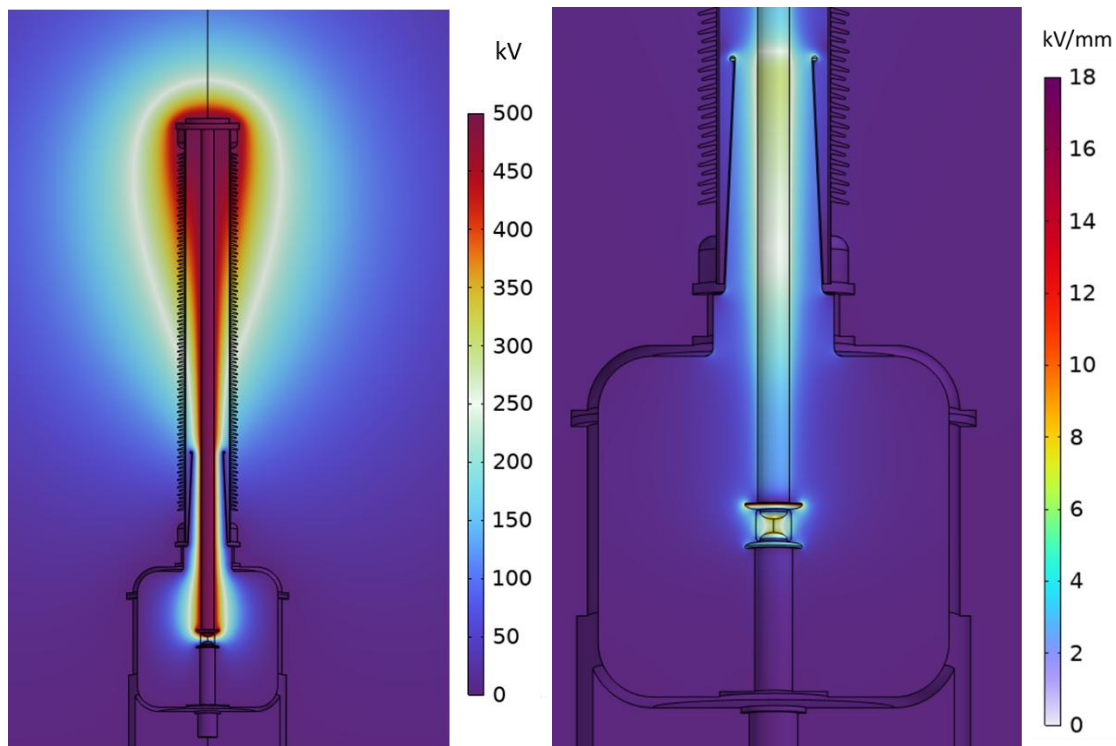


Figura 1: Distribuzione del potenziale (sinistra) e dettaglio del modulo del campo elettrico (destra) nella zona sperimentale dell'esperimento HVDC in gas compresso

- [1] K. J. Urazaki, F. Lucchini, N. Marconato, *Data-Driven Dynamics Learning on Time Simulation of SF₆ HVDC-GIS Conical Solid Insulators*, Electronics 2025, 14, 616, <https://doi.org/10.3390/electronics14030616>
- [2] F. Lucchini, A. Frescura, K. J. Urazaki, N. Marconato, P. Bettini, *Modeling Approaches for Accounting Radiation-Induced Effect in HVDC-GIS Design for Nuclear Fusion Applications*; Appl. Sci. 2024, 14, 11666, <https://doi.org/10.3390/app142411666>
- [3] F. Lucchini and N. Marconato, *Development of HVDC Gas-Insulated Components for the Power Supply of Neutral Beam Injectors*, IEEE Access, vol. 11, pp. 9731-9741, 2023, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239798>
- [4] F. Lucchini, N. Marconato, P. Bettini, *Automatic optimization of gas insulated components based on the streamer inception criterion*, Electronics 2021, 10(18), 2280, <https://doi.org/10.3390/electronics10182280>