

# Progettazione, Realizzazione e Caratterizzazione di un Generatore di Alte Tensioni Continue

Lorenzo Brondino S329219

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Politecnico di Torino

Relatori: Prof. Enrico Pons, Ing. Paolo Emilio Roccato, Ing. Stefano Emilio Caria

## I. INTRODUZIONE

Le prove di isolamento in alta tensione in corrente continua (HVDC) su cavi di media e alta tensione richiedono generatori in grado di fornire tensioni elevate con ripple ridotto, in conformità ai principali standard IEC per le prove in alta tensione [1–2]. I generatori commerciali risultano spesso ingombranti e costosi, rendendone difficile l'impiego in ambienti di ricerca o configurazioni trasportabili.

Questo lavoro presenta la progettazione, realizzazione e caratterizzazione di un generatore compatto e modulare di alta tensione in corrente continua, sviluppato presso il laboratorio LATFC dell'INRiM. Il sistema è basato su un moltiplicatore Cockcroft–Walton a quattro stadi ed è progettato per fornire circa 200 kV con ripple inferiore all'1% a partire da una sorgente AC a 50 Hz. Il moltiplicatore utilizza condensatori e diodi in cascata per convertire una tensione AC in alta tensione continua. L'analisi di ripple e caduta di tensione sotto carico è utilizzata per determinare il numero ottimale di stadi e la scelta dei componenti, evidenziando che il ripple aumenta con il numero di stadi e la corrente di carico e diminuisce con il prodotto tra frequenza e capacità. Su questa base vengono scelti quattro stadi, come compromesso tra tensione ottenibile, ripple accettabile e complessità fisica, aspetto rilevante per modularità e trasportabilità.

## II. SELEZIONE DEI COMPONENTI E ARCHITETTURA ELETTRICA

Vengono adottati condensatori in film di polipropilene grazie alle loro basse perdite, elevata rigidità dielettrica, stabilità termica e proprietà di autorigenerazione, che garantiscono un funzionamento affidabile ad alta tensione.

Poiché nessun singolo dispositivo soddisfa contemporaneamente i requisiti di tensione e capacità, vengono utilizzate stringhe in serie di condensatori a tensione nominale inferiore, dimensionate in modo che ogni stadio possa sopportare decine di chilovolt con adeguati margini di sicurezza.

Anche i diodi passivati in vetro sono collegati in serie, con resistori di equalizzazione in parallelo sia alle stringhe di condensatori sia a quelle di diodi, per garantire una distribuzione uniforme della tensione e un comportamento prevedibile sotto sollecitazione in corrente continua.

A partire dai valori di progetto dei componenti selezionati, calcoli teorici e simulazioni prevedono una tensione di uscita a

vuoto di circa 205 kV e un ripple di alcune centinaia di volt picco-picco, entro il limite dell'1% previsto dalle specifiche.

## III. STRUTTURA MECCANICA MODULARE E TRASPORTABILITÀ

### A. Moduli PCB

L'architettura meccanica è concepita esplicitamente per rendere il generatore smontabile e trasportabile. I componenti ad alta tensione sono raggruppati in moduli funzionalmente omogenei (colonne di condensatori e colonne di diodi), realizzati su circuiti stampati dedicati e alloggiati all'interno di tubi in PVC.

Per i condensatori del generatore, diversi PCB identici che ospitano le stringhe in serie e i relativi resistori di equalizzazione sono impilati verticalmente all'interno di un tubo di grande diametro e mantenuti in posizione tramite supporti stampati in 3D e viti in nylon, come si vede a sinistra in Fig.1, in modo che l'intero insieme possa essere rimosso, trasportato e reinstallato come un unico modulo.

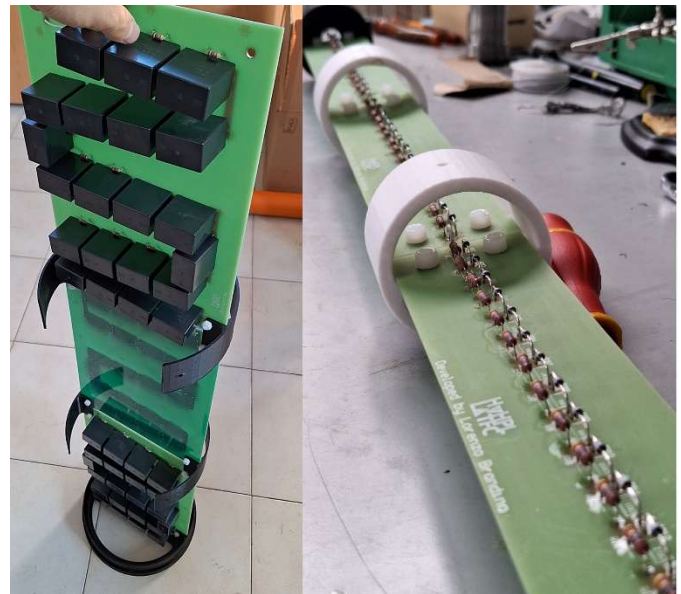


Fig. 1. Moduli PCB di condensatori (a sinistra) e diodi (a destra) con i relativi supporti.

Le schede dei diodi sono disposte in modo analogo in tubi di diametro minore, con supporti circolari stampati in 3D, come visibile a destra in Fig. 1, formando moduli compatti e sostituibili gestibili indipendentemente dal resto della struttura.

## B. Generatore HVDC

Tutti i moduli convergono in un elemento di giunzione centrale, realizzato come un corpo ellissoidale stampato in 3D e rivestito con materiale conduttivo per formare un nodo equipotenziale a superficie liscia. Questa giunzione collega meccanicamente i tubi in PVC e interconnette la rete Cockcroft–Walton; le interfacce permettono di staccare ciascun tubo svitando pochi fissaggi, facilitando trasporto e manutenzione.

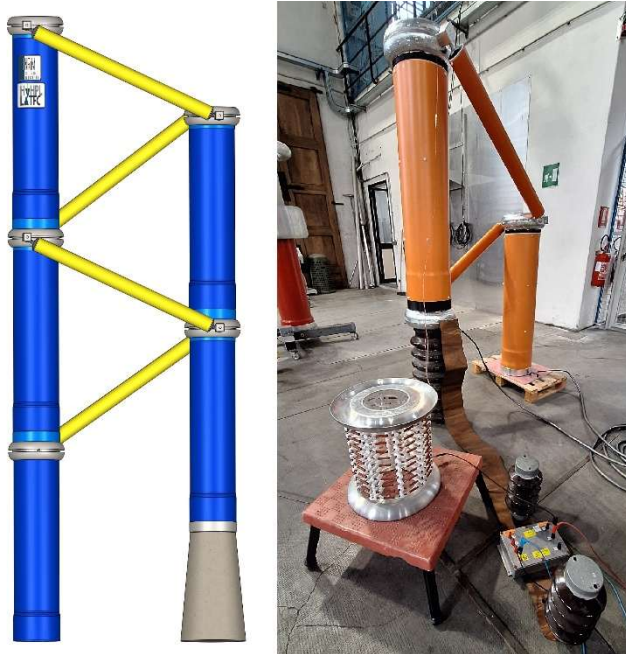


Fig. 2. Render del generatore HVDC a due stadi (a sinistra) e primo stadio realizzato con divisore resistivo (a destra).

La misura della tensione è realizzata tramite un partitore resistivo formato da una catena di resistori ad alta tensione e da un resistore di precisione a bassa tensione, dimensionato per soddisfare i requisiti di accuratezza e risposta dinamica della norma CEI EN IEC 60060-2 [2], mantenendo dimensioni compatte per il trasporto insieme al generatore come parte di un kit portatile, visibile in Fig. 2.

## IV. SIMULAZIONI, PRESTAZIONI E VALUTAZIONE FINALE

Simulazioni circuitali in LTspice, che includono modelli realistici di condensatori e diodi e un modello equivalente concentrato di un cavo di potenza di media tensione, sono utilizzate per prevedere transitori di carica, tensione di uscita a regime e ripple in diverse condizioni di carico. I risultati, ottenuti dalle simulazioni, confermano che il progetto a quattro stadi, con le capacità e gli elementi in serie scelti, soddisfa i requisiti di 200 kV e ripple <1% a 50 Hz.

Test sperimentali effettuati in laboratorio sul prototipo realizzato hanno confermato le prestazioni previste, inclusa la risposta al carico con modelli equivalenti di cavo e il comportamento in condizioni reali di prova di isolamento.

In Fig. 3 è riportata la tensione di uscita del generatore sul ramo di bassa tensione e la relativa forma d'onda, ricostruita dai dati acquisiti con l'oscilloscopio, che evidenzia un ripple di ampiezza ridotta.

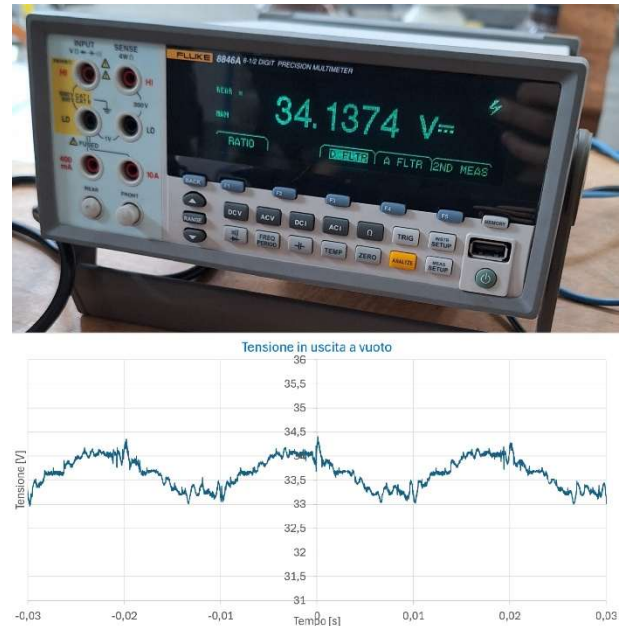


Fig. 3. Misura con multimetro (in alto) e forma d'onda della tensione generata (in basso).

## V. CONCLUSIONI

Il prototipo sviluppato valida il progetto a quattro stadi di un generatore HVDC trasportabile, fornendo un'uscita ad alta tensione stabile conforme agli standard IEC 60060 [1–2]. A differenza degli alimentatori ad alta tensione ad alta frequenza [3], che privilegiano prestazioni dinamiche ed efficienza, il moltiplicatore Cockcroft–Walton a 50 Hz proposto pone l'accento su trasportabilità e semplicità per applicazioni sul campo. L'architettura meccanica modulare, basata su moduli PCB removibili e supporti stampati in 3D, consente di smontare, trasportare e rimontare il sistema con minimo sforzo, permettendone l'uso in diversi laboratori e siti di prova. Sviluppi futuri potranno includere il perfezionamento del kit portatile per migliorarne robustezza e facilità di impiego in campo.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] IEC 60060-1:2010, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*.
- [2] IEC 60060-2:2010, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*.
- [3] Schilling, F., Passon, S., Meisner, J., Walker, A., Kurrat, M., Weber, B. (2020). High Frequency High Voltage Power Supplies. In: Németh, B. (eds) *Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering. ISH 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 599. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-31680-8\\_139](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31680-8_139)