

Confronto tra le tecnologie di giunzione per cavi MT (11 kV–33 kV)

Introduzione

I giunti per cavi di media tensione sono componenti critici nelle reti elettriche interrate. La loro funzione non è solo quella di collegare due sezioni di cavo, ma di ripristinare le prestazioni elettriche, meccaniche e ambientali il più possibile vicine a quelle del sistema di cavi originale (IEEE, 2022; CENELEC, 2019). In termini pratici, un giunto deve fornire un isolamento affidabile, un controllo stabile del campo elettrico, una protezione meccanica e una tenuta a lungo termine sotto sollecitazioni termiche, elettriche e ambientali (IEEE, 2022; IEC, 2023). Questo white paper confronta le principali tecnologie di giunzione utilizzate nei sistemi da 11 kV a 33 kV: termorestringente, cold shrink, resina, premodellata e architetture ibride. Il confronto si basa su norme, informazioni dei produttori e ricerche pubblicate sugli accessori per cavi, sulle scariche parziali e sull'invecchiamento dei materiali (IEEE, 2022; IEC, 2023; MDPI, 2025; MDPI, 2024).

Requisiti funzionali di un giunto MT

Un giunto di media tensione deve soddisfare tre requisiti fondamentali. In primo luogo, deve resistere alle sollecitazioni elettriche del sistema in esercizio senza creare intensificazioni locali del campo elettrico. In secondo luogo, deve proteggere l'interfaccia del cavo da umidità, contaminazione e danni meccanici. In terzo luogo, deve mantenere tali proprietà per tutta la durata di servizio prevista, compresi i cicli termici e le sollecitazioni associate ai guasti (IEEE, 2022; CENELEC, 2019).

Nella pratica, i guasti nei sistemi di cavi hanno spesso origine negli accessori piuttosto che nel cavo stesso. Per questo motivo, la qualità dell'interfaccia, la costanza dell'installazione e la gestione dei vuoti sono aspetti così importanti nella progettazione dei giunti MT (MDPI, 2025; MDPI, 2023). Le scariche parziali sono particolarmente rilevanti perché si sviluppano tipicamente in vuoti riempiti di gas, interfacce imperfette o aree contaminate e possono degradare gradualmente il sistema di isolamento nel tempo (MDPI, 2025; MDPI, 2023).

Norme e quadro di prova

Per gli accessori per cavi MT nella gamma da 11 kV a 33 kV, il riferimento internazionale più importante è la IEC 60502-4:2023, che specifica i requisiti delle prove di tipo per gli accessori destinati a cavi di energia con tensioni nominali da 3,6/6 kV fino a 18/30 kV e, più in generale, fino ai sistemi da 30 kV coperti dalla norma (IEC, 2023). Per il mercato europeo, la HD 629-1-S3 definisce i requisiti prestazionali per gli accessori per cavi destinati a cavi di energia con isolamento estruso nella stessa gamma generale di tensione (CENELEC, 2019). Questi documenti sono importanti perché forniscono una base tecnica comune per la

valutazione dei giunti, anziché basarsi esclusivamente sulle dichiarazioni di prodotto. La IEEE 404-2022 stabilisce inoltre classi elettriche e requisiti di prova per i giunti utilizzati con cavi schermati ad isolamento estruso e laminato ed è utile come ulteriore punto di riferimento per le aspettative prestazionali e la disciplina di prova (IEEE, 2022).

Anche le prove PD svolgono un ruolo centrale nell'assicurazione della qualità. La pratica industriale utilizza le prove di scarica parziale durante i test di fabbrica e la messa in servizio per individuare cedimenti incipienti e difetti di installazione nei sistemi di cavi MT e nei relativi accessori (Megger, 2025). Questo rende le prestazioni PD un parametro di riferimento rilevante nel confronto tra le diverse tecnologie di giunzione.

Tecnologia termorestringente

I giunti termorestringenti utilizzano materiali attivati termicamente che si contraggono attorno all'interfaccia del cavo preparato. Sono ampiamente utilizzati, meccanicamente robusti e familiari a molti giuntisti (Lovink Enertech, n.d.). Il loro principale punto di forza è l'ampia applicabilità e la struttura relativamente semplice dei materiali, soprattutto quando le condizioni di installazione sono ben controllate e sono disponibili giuntisti esperti. La loro principale limitazione è la sensibilità all'installazione. I sistemi termorestringenti dipendono da un corretto riscaldamento, da una preparazione pulita delle superfici e da un adeguato controllo procedurale durante il montaggio. In ambienti in cui l'uso di fiamme libere è limitato, i permessi sono difficili da ottenere o lo spazio disponibile è ridotto, questo metodo di installazione può risultare meno pratico. In sintesi, il termorestringente può rappresentare una soluzione robusta, ma non è particolarmente tollerante quando le condizioni in campo sono sfavorevoli (Lovink Enertech, n.d.; IEEE, 2022).

Tecnologia Cold Shrink

I sistemi cold shrink utilizzano componenti elastomerici che si contraggono attorno all'interfaccia del cavo senza l'applicazione di calore esterno. Questo migliora la ripetibilità dell'installazione ed elimina la necessità di lavorare con fiamme libere, un vantaggio interessante in molti ambienti industriali. Il metodo riduce inoltre una fonte di variabilità dell'installatore, poiché la forza radiale è incorporata nella geometria dell'accessorio invece di essere generata durante il riscaldamento. La principale questione tecnica riguarda la stabilità a lungo termine dell'interfaccia. Le ricerche pubblicate mostrano che la pressione dell'interfaccia negli accessori per cavi in gomma siliconica è influenzata dalla temperatura e dall'invecchiamento termico e che questi cambiamenti possono influenzare il comportamento elettrico nel lungo periodo (Xia et al., 2023; Du et al., 2024). Questo non significa che il cold shrink sia inadatto; significa piuttosto che l'invecchiamento dell'elastomero e il mantenimento della pressione di contatto sono fattori centrali per le prestazioni durante il ciclo di vita.

Tecnologia a resina

I giunti a base di resina inglobano il collegamento in una massa indurita. Il loro principale vantaggio consiste in una forte protezione esterna: una volta indurito, il giunto fornisce una barriera rigida contro l'ingresso di umidità, i movimenti del terreno e gli impatti meccanici (Lovink Enertech, n.d.). Questo rende la resina particolarmente rilevante quando la tenuta ambientale e la robustezza sono prioritarie. La principale sfida progettuale è che i sistemi rigidi dipendono da una colata priva di vuoti e da una corretta geometria interna. Una volta che la resina si è indurita, i difetti sono difficili da correggere, il che significa che la qualità dell'installazione rimane critica anche se la protezione esterna è meccanicamente robusta. I sistemi a resina risultano quindi interessanti per la loro tenuta e robustezza, ma non compensano intrinsecamente le imperfezioni interne (IEEE, 2022; Lovink Enertech, n.d.).

Tecnologia premodellata

I sistemi premodellati si basano su corpi isolanti realizzati in fabbrica con geometria controllata. Il loro principale punto di forza è la costanza: il profilo isolante e la forma di controllo del campo elettrico vengono prodotti in condizioni di fabbricazione controllate invece di essere creati interamente sul campo (INMR, n.d.). Questo può favorire un controllo affidabile del campo elettrico se l'accessorio è correttamente adattato al cavo e installato correttamente. La loro limitazione è che la qualità dell'installazione continua a essere importante. L'adattamento, la preparazione dell'interfaccia e qualsiasi protezione esterna aggiuntiva influenzano tutti le prestazioni finali del giunto (INMR, n.d.; IEEE, 2022). In altre parole, i sistemi premodellati riducono alcune variabili, ma non eliminano l'importanza della corretta esecuzione dell'installazione.

Controllo del campo elettrico

Il controllo del campo elettrico è uno degli aspetti progettuali centrali nei giunti MT. Nel punto in cui lo schermo del cavo viene rimosso, il campo elettrico si concentra e, senza adeguate misure di mitigazione, questa concentrazione locale del campo può accelerare l'invecchiamento o provocare il cedimento dell'isolamento (Power and Cables, n.d.; IEEE, 2022).

Il controllo del campo elettrico viene quindi ottenuto attraverso una combinazione di geometria, materiali di gradazione del campo e interfacce accuratamente progettate (IEEE, 2022; INMR, n.d.). Anche la compatibilità dei materiali è importante. Se le proprietà dielettriche dell'isolamento del giunto differiscono in modo significativo da quelle dell'isolamento del cavo, il campo elettrico può deformarsi all'interfaccia. Lovink afferma che LoviSil è progettato con un comportamento dielettrico simile a quello dell'XLPE per ridurre questo effetto; nel white paper, questa affermazione dovrebbe essere presentata come una dichiarazione del produttore, salvo il supporto di misurazioni indipendenti (Lovink Enertech, n.d.). Dal punto di vista tecnico, il concetto è valido: una permittività stabile e una buona compatibilità dell'interfaccia favoriscono una migliore gradazione del campo elettrico.

Scariche parziali e affidabilità a lungo termine

Le scariche parziali sono ampiamente riconosciute come uno dei più importanti meccanismi di degrado negli accessori per cavi (MDPI, 2025; MDPI, 2023; Megger, 2025). Esse si sviluppano tipicamente in vuoti, bolle, contaminazioni o interfacce non adeguatamente controllate e possono degradare progressivamente l'isolamento fino al verificarsi di un guasto. Per questo motivo, la qualità dell'interfaccia elettrica interna è spesso più importante dell'aspetto esterno del giunto.

Le ricerche sugli accessori per cavi in gomma siliconica mostrano che l'invecchiamento termico e la compressione meccanica possono modificare nel tempo la pressione dell'interfaccia e il comportamento del materiale (Xia et al., 2023; Du et al., 2024; RSC, 2026). Ciò significa che l'affidabilità a lungo termine dipende non solo dal progetto iniziale, ma anche dal comportamento dell'accessorio dopo anni di cicli termici ed esposizione alle condizioni ambientali. Per questo motivo, le affermazioni relative all'"immunità alle PD" dovrebbero essere evitate, a meno che non siano supportate da prove indipendenti condotte in condizioni di prova pertinenti.

Architettura ibrida

Un'architettura di giunzione ibrida separa le funzioni elettriche e meccaniche dell'accessorio. Nel concetto Lovink, il silicone liquido viene utilizzato per l'isolamento elettrico e per la regione dell'interfaccia, mentre uno strato esterno in resina fornisce resistenza meccanica e tenuta ambientale (Lovink Enertech, n.d.).

La logica progettuale è interessante perché non obbliga un singolo materiale a svolgere entrambe le funzioni con la stessa efficacia. Da un punto di vista ingegneristico, si tratta di un approccio sensato. Il silicone liquido può favorire la gestione dei vuoti e la compatibilità del campo elettrico all'interfaccia, mentre lo strato esterno in resina può fornire una protezione esterna robusta contro l'umidità, la contaminazione e le sollecitazioni meccaniche. Lovink descrive questo approccio come un concetto di giunzione a lunga durata, supportato da esperienza sul campo e prove standardizzate, ma tali affermazioni dovrebbero rimanere chiaramente identificate come dichiarazioni del produttore, salvo il supporto di dati di prova indipendenti (Lovink Enertech, n.d.; IEEE, 2022; IEC, 2023).

Valutazione comparativa

Le tecnologie si differenziano in modo più evidente in quattro aree: sensibilità all'installazione, stabilità dell'interfaccia elettrica, robustezza meccanica e comportamento all'invecchiamento. La tecnologia termorestringente è una soluzione collaudata e versatile, ma dipende maggiormente dalla disciplina di installazione e dal controllo del processo termico (Lovink Enertech, n.d.; IEEE, 2022).

La tecnologia cold shrink migliora la ripetibilità dell'installazione, ma le prestazioni a lungo termine dipendono dall'invecchiamento dell'elastomero e dal mantenimento della pressione all'interfaccia (Xia et al., 2023; Du et al., 2024). I sistemi a resina forniscono una forte protezione esterna e una buona tenuta, ma richiedono una colata di alta qualità e non compensano intrinsecamente i vuoti interni una volta induriti (Lovink Enertech, n.d.; IEEE, 2022). I sistemi premodellati offrono una geometria controllata e un controllo del campo elettrico costante, ma dipendono comunque da un corretto adattamento e da una corretta installazione (INMR, n.d.; IEEE, 2022). I sistemi ibridi offrono un'architettura equilibrata combinando la gestione delle cavità sul lato elettrico con una protezione rigida sul lato meccanico (Lovink Enertech, n.d.).

Criteri di selezione in base all'applicazione

La scelta della tecnologia dovrebbe basarsi sulle condizioni applicative piuttosto che su una singola preferenza generica. Quando è richiesta un'installazione senza fiamme libere, i sistemi non termici presentano un chiaro vantaggio pratico. Quando predominano movimenti del terreno, esposizione all'umidità o carichi meccanici esterni, una protezione esterna basata sulla resina diventa particolarmente rilevante. Quando la principale preoccupazione riguarda la qualità a lungo termine dell'interfaccia elettrica, il controllo del campo elettrico e la soppressione delle scariche parziali, il fattore decisivo diventa la progettazione dell'interfaccia stessa (MDPI, 2025; MDPI, 2023; Megger, 2025).

In questo contesto, i sistemi ibridi meritano attenzione perché combinano la gestione dell'interfaccia elettrica con una tenuta e una protezione esterna robuste. Per le applicazioni MT più impegnative, la tecnologia migliore è generalmente quella che meglio si adatta all'ambiente operativo reale, ai vincoli di installazione e agli obiettivi di affidabilità richiesti (IEEE, 2022; CENELEC, 2019).

Conclusione

Nessuna singola tecnologia di giunzione rappresenta la soluzione migliore per tutte le applicazioni MT. I sistemi termorestringenti, cold shrink, a resina e premodellati hanno tutti un ruolo valido, a seconda del contesto del progetto, delle condizioni di installazione e dei requisiti di affidabilità (IEEE, 2022; IEC, 2023).

La letteratura tecnica dimostra che le scariche parziali, la qualità dell'interfaccia e il comportamento all'invecchiamento sono fattori centrali per le prestazioni a lungo termine, rendendo particolarmente importanti la gestione dei vuoti e il controllo del campo elettrico nella progettazione degli accessori (MDPI, 2025; MDPI, 2023; Xia et al., 2023). Una architettura ibrida basata su silicone liquido e resina è tecnicamente giustificabile perché separa le funzioni elettriche e meccaniche del giunto.



Questo approccio può migliorare l'equilibrio tra stabilità dell'interfaccia, tenuta e robustezza, a condizione che il progetto sia validato secondo le norme applicabili e supportato, ove possibile, da prove indipendenti (Lovink Enertech, n.d.; IEEE, 2022; IEC, 2023).