

Ricerca di Sistema elettrico



Sicurezza Elettrica e Affidabilità di tamponature prefabbricate
in legno con accumulo energetico integrato (LA3.13)

Davide Fabiani



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Sicurezza Elettrica e Affidabilità di tamponature prefabbricate in legno con accumulo energetico integrato

STUDIO DELLA SICUREZZA ELETTRICA E DELL’AFFIDABILITÀ DI TAMPONATURE PREFABBRICATE IN LEGNO CON ACCUMULO ENERGETICO INTEGRATO (LA3.13)

D. Fabiani (Dipartimento di Ingegneria dell’Energia Elettrica e dell’Informazione ‘G. Marconi’, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: 3.13

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Paolo Sdringola, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Dipartimento di Ingegneria dell’Energia Elettrica e dell’Informazione “G. Marconi” – Alma Mater Studiorum Università di Bologna [UNIBO_DEI_1]

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all’interno dell’Accordo di collaborazione “Studio della sicurezza elettrica e dell’affidabilità di tamponature prefabbricate in legno con accumulo energetico integrato”.

Responsabile scientifico ENEA: Simone Beozzo

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Davide Fabiani

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
2.1	Misure della resistenza di isolamento	5
2.2	Misure di Stato di Carica (SOC) del sistema di accumulo	7
2.3	Test di tenuta dielettrica.....	8
3	Prodotti attesi	9
4	Prodotti sviluppati	10
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	11
6	Sintesi delle attività svolte	12
7	Dettaglio delle attività svolte.....	13
7.1	Misura d'isolamento e fattori che la influenzano	13
7.2	Metodi di misura della resistenza di isolamento.....	14
7.2.1	Misura a breve termine	14
7.2.2	Indice di polarizzazione (PI).....	15
7.3	Prove sperimentali sul campione	15
7.3.1	Misura dei parametri legati all'isolamento (resistenza di isolamento, indice di polarizzazione PI).....	16
7.4	Test di tenuta dielettrica.....	17
7.5	Misura dello stato di carica (SOC)	17
7.6	Bibliografia.....	18
7.7	Abbreviazioni ed acronimi.....	18
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	19
9	Publicazioni scientifiche.....	20
10	Eventi di disseminazione	21

Indice delle figure

Figura 1 – Resistenza di isolamento R_1 (a) e R_{10} (b) per differenti valori di RH al variare del tempo di prova a 50°C.....	6
Figura 2 – Indice di Polarizzazione per differenti valori di RH al variare del tempo di prova a 50°C.	6
Figura 3 – Resistenza di isolamento (a) e PI (b) al variare della temperatura di prova a RH=50%.	7
Figura 4 – Stato di Carica (SOC) del sistema di accumulo al variare del tempo di prova per le RH testate.....	8
Figura 5 – Componenti della corrente misurate durante una prova voltamperometrica [1]. ...	14
Figura 6 – Immagine dell'elemento attivo del sistema di accumulo (a) e del tamponamento (b) al cui interno è stato inserito l'elemento di accumulo per le prove di invecchiamento eseguite in camera climatica	16
Figura 7 – Circuito di prova per la misura della resistenza di isolamento	16

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Esiti test di tenuta dielettrica.....	8
---	---

1 Risultati attesi

I risultati attesi come da capitolato vigente sono i seguenti:

1. Misura della resistenza di isolamento e della tenuta dielettrica in varie condizioni ambientali e verifica con i livelli stabiliti dalle norme.
2. Misura delle grandezze caratteristiche del condensatore durante le prove di invecchiamento e verifica che rientrino nelle specifiche richieste.

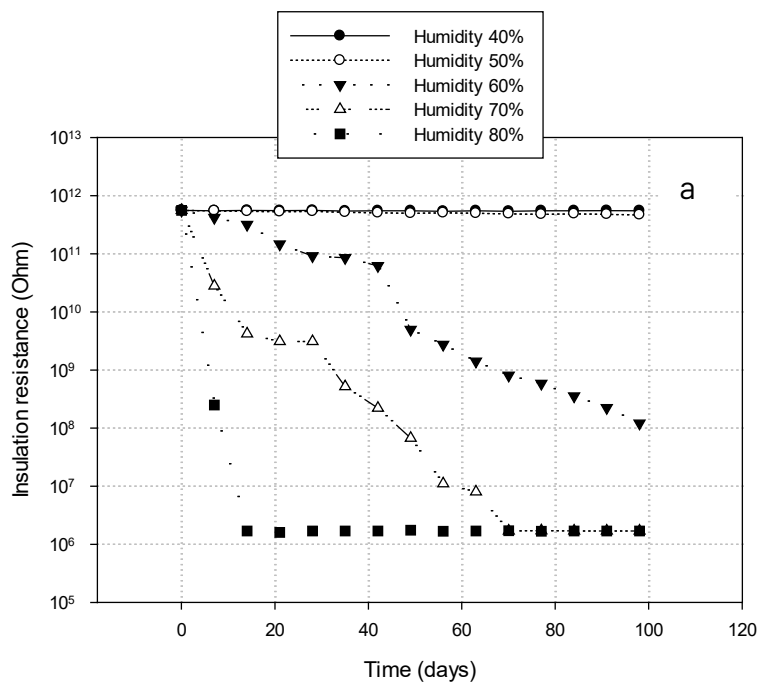
2 Risultati ottenuti

2.1 Misure della resistenza di isolamento

Nella Figura 1 sono riportati i risultati delle misure di resistenza di isolamento a 1 min, R_1 (Fig. 2a) e a 10 minuti, R_{10} , (Fig. 2b) per le prove effettuate con umidità relativa RH variabile da 30% a 80% per un tempo massimo di 98 giorni alla temperatura di 50°C. Nella figura 2 è riportato l'indice di polarizzazione PI, definito nel paragrafo 6.2.2 e calcolato mediante l'equazione (1).

Come si può osservare, in ambiente secco (RH=40%) la resistenza di isolamento non cambia apprezzabilmente durante l'intervallo di prova considerato (98 giorni). Anche a RH=50%, valore di umidità molto comune in ambiente, si può osservare che al passare del tempo la resistenza di isolamento non si modifica apprezzabilmente, passando dal valore iniziale $R_{10} = 1920 \text{ G}\Omega$ a $R_{10} = 1390 \text{ G}\Omega$. L'indice di polarizzazione, PI, diminuisce leggermente dopo circa 80 giorni di invecchiamento da 3.5 a circa 3, indice di una leggera contaminazione dell'isolamento da parte dell'umidità assorbita dall'involucro.

In ambienti più umidi, invece, si osserva una notevole riduzione sia di R_1 che R_{10} : per RH=60% dopo i primi 40 giorni la resistenza di isolamento si è ridotta di 1 ordine di grandezza. Al termine dell'invecchiamento, dopo 98 giorni, il valore di R_{10} si è ridotto di quasi 4 ordini di grandezza a $R_{10} = 105 \text{ M}\Omega$. Con RH 70% il decremento di R_{10} e R_1 è estremamente più veloce e dopo circa 70 giorni ha raggiunto il valore minimo di 3.2 MΩ. Per RH=80% tale valore viene raggiunto dopo soli dieci giorni. Si può quindi considerare che 3.2 MΩ siano il valore minimo di resistenza di isolamento che viene raggiunto quando l'involucro è completamente saturato di umidità. Analoghe osservazioni possono essere fatte per il PI (Fig. 2) che raggiunge valori critici solo per i livelli di umidità più elevati. Ad ogni modo il valore minimo di resistenza di isolamento misurato di 3.2 MΩ risulta comunque maggiore del valore limite di sicurezza di 1 MΩ imposto dalle norme.



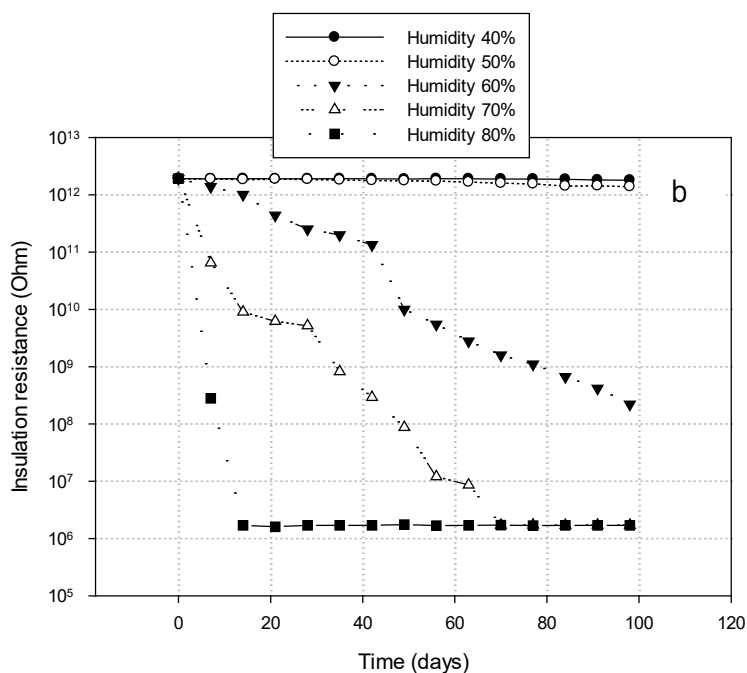


Figura 1 - Resistenza di isolamento R_1 (a) e R_{10} (b) per differenti valori di RH al variare del tempo di prova a 50°C.

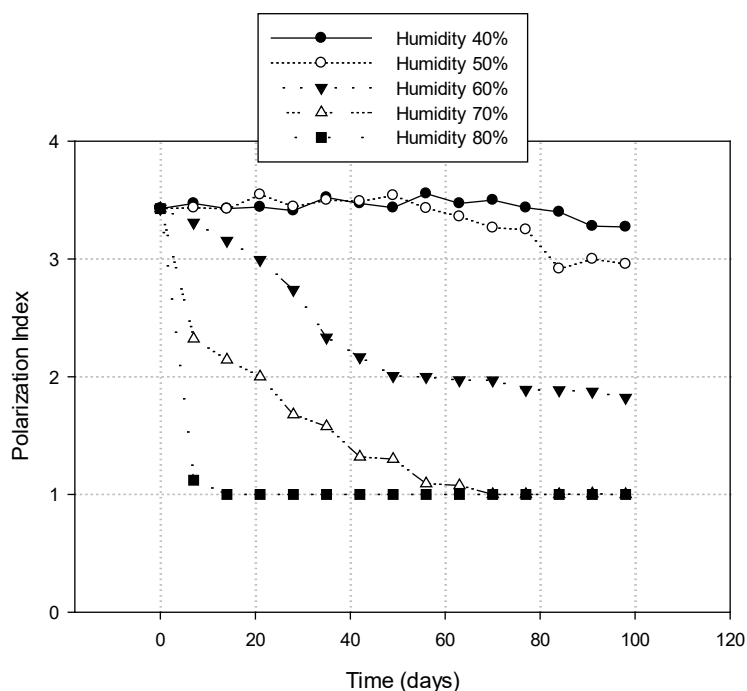


Figura 2 - Indice di Polarizzazione per differenti valori di RH al variare del tempo di prova a 50°C.

Al termine di ogni prova in camera climatica in umidità, il campione è stato asciugato per 72h in ambiente secco (RH=10%) ed è stata misurata di nuovo la resistenza di isolamento; in tutti i casi, i valori di resistenza di isolamento sono risultati circa uguali a quelli misurati inizialmente, segno che non vi è stata alcun peggioramento permanente delle condizioni di isolamento elettrico del prototipo.

In ultimo è stata valutata la variazione della resistenza di isolamento con la temperatura. Nella figura 3 sono riportati i valori di resistenza di isolamento R_1 e R_{10} e del PI al variare della temperatura di prova ad umidità fissata RH=50%. Come si può osservare, la resistenza di isolamento R_{10} cala di circa tre ordini di grandezza, da 7.9 TΩ a 32 GΩ, passando da 20°C a 110°C, mentre il PI è molto meno sensibile all'incremento di temperatura, anche se diminuisce

leggermente all'aumentare della temperatura applicata. Si osservi che il valore inferiore di resistenza risulta di gran lunga maggiore del valore limite di sicurezza di 1 M Ω .

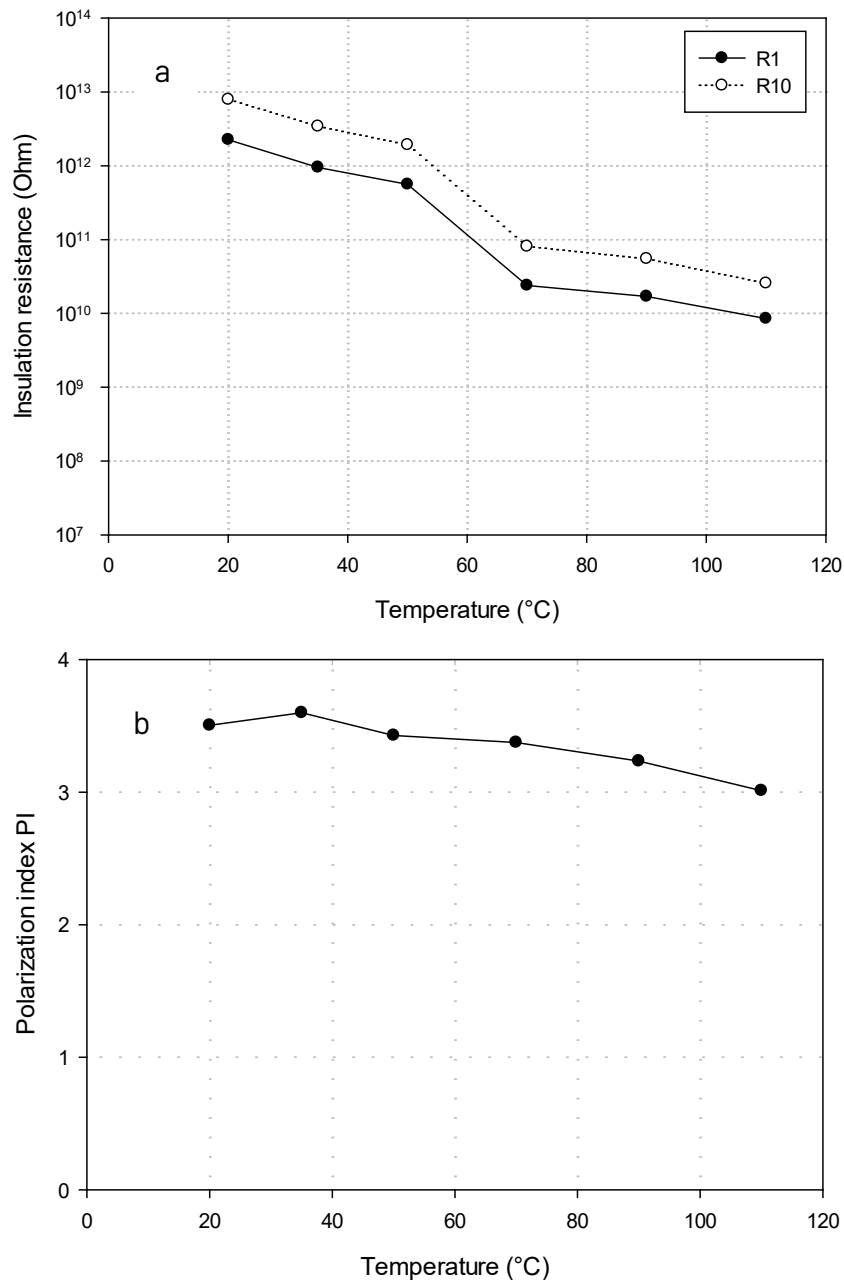


Figura 3 – Resistenza di isolamento (a) e PI (b) al variare della temperatura di prova a RH=50%.

2.2 Misure di Stato di Carica (SOC) del sistema di accumulo

Dal momento che il sistema di accumulo in prova non è un condensatore puro, non è stato possibile misurare capacità e tandelta del campione, come preventivato in fase di progetto. Per valutare tuttavia la variazione delle capacità di accumulo durante i cicli di invecchiamento in camera climatica, è stato misurato periodicamente lo Stato di Carica (SOC) del campione. I risultati sono riportati nella figura 5 per le prove eseguite a RH 40%, 50%, 60%, 70% e 80% per un facile confronto.

Si osserva che il valore del SOC cala leggermente durante il tempo di prova, fino a valori di umidità relativa pari a RH=60%, e cioè dal 100% al 90% al termine del periodo di invecchiamento di 98 giorni. In condizioni di umidità maggiori, il SOC cala molto più rapidamente (Fig. 5). In particolare per RH=70% il SOC passa dal 100% al 20% a 98 giorni. In un ambiente ancora più umido, RH=80%, il SOC raggiunge un valore < 2% dopo circa 80 giorni di invecchiamento a causa delle elevate correnti di leakage che producono effetti significativi di autoscarica.

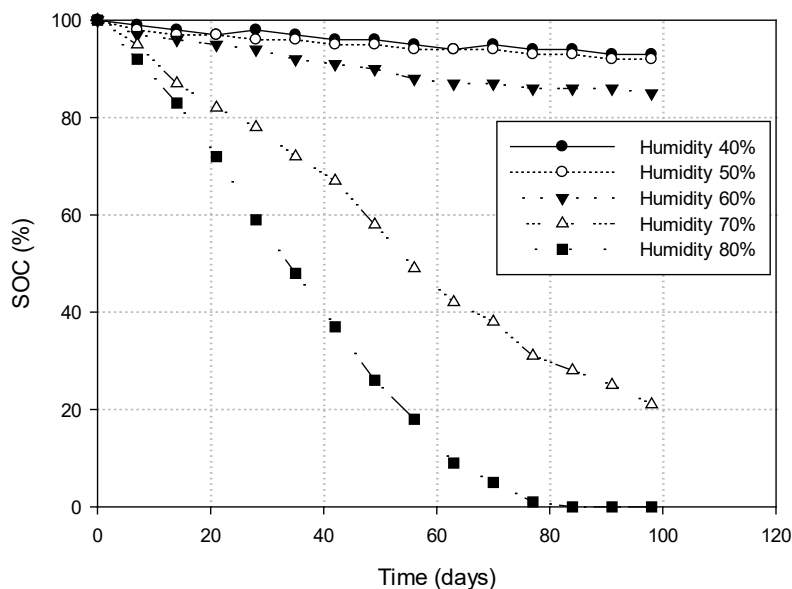


Figura 4 – Stato di Carica (SOC) del sistema di accumulo al variare del tempo di prova per le RH testate.

2.3 Test di tenuta dielettrica

Le prove di tenuta dielettrica sono state eseguite sul campione al termine di ogni periodo di invecchiamento di 98 giorni in umidità. Come si può vedere dalla Tabella 1, tutte le prove hanno avuto esito positivo, senza guasti del campione.

Tabella 1 - Esiti test di tenuta dielettrica

RH	Test a 1.5 U_{NDC} per 10 s	Test a 2.0 U_{NDC} per 2 s
40	OK	OK
50	OK	OK
60	OK	OK
70	OK	OK
80	OK	OK

3 Prodotti attesi

Come da capitolato vigente, la linea di attività prevede la produzione di un report tecnico riguardante la misura della resistenza di isolamento e delle principali grandezze (capacità e tandelta) dei prototipi realizzati in relazione alle varie condizioni ambientali di invecchiamento con eventuali indicazioni sul miglioramento del processo di progettazione e produzione su scala preindustriale.

4 Prodotti sviluppati

Nel corso della Linea di Attività è stato prodotto il presente report tecnico, comprendente una descrizione delle attività condotte e dei risultati raggiunti.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Come accennato nella Sezione 3, non è stato possibile effettuare una misurazione diretta della capacità e del fattore di dissipazione ($\tan \delta$) dei condensatori, in quanto i dispositivi forniti da ENEA si sono rivelati essere più propriamente degli ibridi tra batterie e supercondensatori, caratterizzati da un comportamento elettrochimico non riconducibile ai modelli convenzionali dei soli condensatori. Questo ha reso inadeguate le classiche tecniche di misura per determinare i parametri dielettrici. Per valutare comunque l'effetto dell'invecchiamento accelerato in camera climatica (in termini di temperatura e umidità controllate), si è deciso di analizzare l'autoscarica dei dispositivi nel tempo, utilizzando la misura del *State of Charge* (SOC) come indicatore indiretto della stabilità elettrochimica dei provini. In particolare, il SOC è stato monitorato a intervalli regolari dopo la carica iniziale, al fine di identificare eventuali variazioni nella capacità di mantenere l'energia immagazzinata, che potrebbero suggerire fenomeni di degrado o modifiche strutturali indotte dalle condizioni ambientali simulate.

Tale scostamento non ha influenzato il raggiungimento degli obiettivi della LA3.13.

6 Sintesi delle attività svolte

È stato analizzato un modulo di accumulo "Supercapacitive Module" da 1 kWh - 48 V DC, inserito in un prototipo di tamponamento edilizio. Le attività hanno riguardato prove di sicurezza elettrica, quali la misura della resistenza di isolamento e dell'indice di polarizzazione in condizioni ambientali controllate. Il dispositivo è stato sottoposto per 3 mesi a cicli di invecchiamento in camera climatica con temperatura e umidità variabili. Le misure sono state effettuate a intervalli regolari ed hanno mostrato un peggioramento della resistenza di isolamento, anche se al di sopra dei valori minimi consentiti dalla norma. Sono stati inoltre eseguiti test di tenuta dielettrica, prima e dopo l'invecchiamento. Tutti i provini hanno passato i test anche dopo l'invecchiamento più gravoso. Infine, è stato monitorato lo stato di carica tramite prove di autoscarica, per valutare eventuali variazioni nella capacità di accumulo del sistema in seguito all'esposizione prolungata a condizioni ambientali critiche.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Misura d'isolamento e fattori che la influenzano

La resistenza d'isolamento viene generalmente misurata attraverso un metodo voltamperometrico basato sulla legge di Ohm. Questo approccio prevede l'applicazione di una tensione continua di valore noto, inferiore a quello utilizzato nei test dielettrici, e la misurazione della corrente risultante. Da questa misura, è possibile determinare il valore della resistenza d'isolamento. In teoria, tale resistenza ha un valore molto elevato, ma non infinito. Di conseguenza, misurando con un amperometro sensibile la debole corrente che circola, e conoscendo la tensione applicata, si può calcolare la resistenza d'isolamento. Questo parametro fornisce un'indicazione sulla qualità dell'isolamento tra due conduttori o tra un conduttore e la massa esterna, permettendo di valutare il rischio di eventuali correnti di dispersione.

Quando si applica una tensione costante al circuito in esame, la resistenza misurata e la corrente rilevata possono essere influenzate da diversi fattori, tra cui temperatura e umidità, che possono alterare significativamente i risultati. Inizialmente, supponendo l'assenza di fattori di disturbo, analizziamo le diverse componenti della corrente che circola durante la misurazione dell'isolamento.

La corrente totale che attraversa l'isolante è costituita da tre componenti principali:

- **Corrente di carica capacitiva:** rappresenta il processo di carica della capacità dell'isolamento. Ha un comportamento transitorio, partendo da un valore inizialmente elevato e decrescendo esponenzialmente verso zero man mano che il circuito si carica, in modo simile alla carica di un condensatore. È consigliabile attendere alcuni secondi affinché la componente residua diventi trascurabile rispetto alla corrente di interesse.
- **Corrente di assorbimento:** è dovuta al riassetto delle molecole dell'isolante sotto l'effetto del campo elettrico applicato. Questa corrente diminuisce molto più lentamente rispetto alla corrente di carica capacitiva e impiega diversi minuti per ridursi quasi a zero.
- **Corrente di dispersione o di conduzione:** rappresenta la componente stabile nel tempo ed è indicativa della qualità dell'isolamento.

La Figura 5 mostra l'evoluzione nel tempo di queste tre correnti, con una scala temporale che può variare in base al materiale testato.

La corrente totale che attraversa il circuito in esame, generata dall'applicazione costante della tensione, varia nel tempo, influenzando così la stabilità del valore della resistenza misurata.

Prima di analizzare nel dettaglio i diversi metodi di misurazione, è fondamentale considerare i principali fattori che possono influenzare la resistenza d'isolamento.

Uno di questi fattori è la temperatura, che modifica la resistenza d'isolamento seguendo un andamento approssimativamente esponenziale, come accade per la conducibilità degli isolanti. Per garantire misurazioni affidabili nell'ambito di programmi di manutenzione preventiva, è consigliabile eseguire i test in condizioni termiche costanti. Qualora ciò non fosse possibile, i valori rilevati dovrebbero essere corretti per riportarli a una temperatura di riferimento. Ad esempio, un incremento di 10 °C può ridurre la resistenza d'isolamento della metà, mentre una diminuzione di 10 °C tende a raddoppiarla.

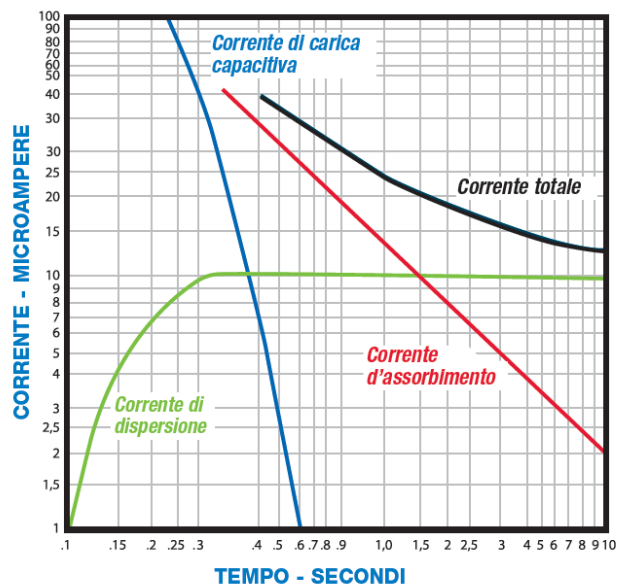


Figura 5 – Componenti della corrente misurate durante una prova voltamperometrica [1].

Anche il tasso di umidità ha un impatto significativo, in particolare in relazione al grado di contaminazione delle superfici isolanti. In generale, le misurazioni dovrebbero essere effettuate solo se la temperatura è superiore al punto di rugiada, per evitare che la condensazione influisca negativamente sui risultati.

Nel contesto della sicurezza, quando si misura la resistenza d'isolamento di un dispositivo, è essenziale considerare che fattori ambientali come umidità e temperatura possono ridurre significativamente il valore misurato. Per questo motivo, i test dovrebbero essere progettati in modo da simulare le condizioni più critiche, verificando che i livelli di isolamento rimangano adeguati a impedire il trasferimento di tensioni pericolose sul dispositivo.

7.2 Metodi di misura della resistenza di isolamento

7.2.1 Misura a breve termine

Questo metodo, il più semplice tra quelli disponibili, prevede l'applicazione di una tensione di test per un breve intervallo di tempo (30 o 60 secondi), seguita dalla misurazione immediata della resistenza d'isolamento. Come già evidenziato, questo tipo di misurazione è fortemente influenzato da fattori ambientali come temperatura e umidità. Pertanto, è essenziale normalizzare il valore ottenuto a una temperatura standard e registrare il livello di umidità per confrontarlo in modo coerente con misurazioni precedenti.

L'adozione di questo metodo consente di monitorare l'andamento nel tempo della resistenza d'isolamento, offrendo un'indicazione più efficace dell'evoluzione delle caratteristiche di isolamento dell'apparecchiatura testata. Inoltre, il valore misurato può essere confrontato con le soglie minime previste dalle normative sugli impianti e sui materiali elettrici, al fine di garantire una corretta valutazione.

Se le condizioni di misura rimangono costanti (stessa tensione di test, stesso tempo di misura, ecc.), l'analisi delle variazioni nei test periodici permette di ottenere una diagnosi affidabile sullo stato dell'isolamento dell'impianto o del materiale. Oltre alla valutazione del valore assoluto, è utile esaminare anche la sua stabilità nel tempo: un valore di isolamento

relativamente basso ma costante è meno preoccupante rispetto a una resistenza d'isolamento che varia in modo significativo, anche se inizialmente superiore ai limiti raccomandati.

In ogni caso, un calo improvviso della resistenza d'isolamento rappresenta un segnale d'allarme che richiede ulteriori verifiche.

7.2.2 Indice di polarizzazione (PI)

Le misure effettuate con variazione del tempo di applicazione della tensione di prova, possono essere suddivise in due rilevamenti: a 1 minuto e a 10 minuti. Il rapporto tra la resistenza d'isolamento a 10 minuti e quella ad 1 minuto si chiama Indice di Polarizzazione (PI) che permette di definire la qualità dell'isolamento.

$$PI = \frac{\text{Risolamento a 10 minuti}}{\text{Risolamento a 1 minuto}} \quad (1)$$

Un indice di polarizzazione molto basso, vicino a 1, indica che la corrente di polarizzazione è prevalentemente influenzata dalla corrente di dispersione. Questo valore suggerisce un possibile problema nel sistema isolante, che potrebbe derivare da una riduzione dell'isolamento superficiale causata da sporcizia, umidità o degrado del materiale isolante.

È fondamentale considerare che il metodo basato sul calcolo dell'indice di polarizzazione è adatto principalmente per il controllo di materiali isolanti solidi. Al contrario, non è consigliato per apparecchiature come trasformatori a olio o condensatori in carta e olio, poiché in questi casi il test tende a fornire risultati poco significativi, anche quando l'isolamento è in buone condizioni.

7.3 Prove sperimentali sul campione

Il dispositivo in prova è costituito da un elemento di accumulo, denominato "Supercapacitive Module", realizzato da UFLEX, atto a immagazzinare energia elettrica pari a 1 kWh nominale alla tensione di 48 V DC (Fig. 6A)). L'elemento così realizzato è dotato di 2 elettrodi disposti alle estremità dei lati corti, che consentono la messa in serie/parallelo di più sistemi di accumulo per aumentare la capacità di accumulo complessiva. Tale elemento è stato poi inserito all'interno di un tamponamento di legno (Fig. 6B) che rappresenta la parete entro cui verrà installato. Fondamentale per la sicurezza elettrica risulta la resistenza di isolamento tra tali elettrodi metallici e l'involucro del prototipo che, una volta inserito nel muro, potrebbe trasferire dei potenziali pericolosi ad una persona che lo toccasse in caso di un difetto di isolamento.

Poiché, come si è detto nelle sezioni precedenti, l'isolamento è fortemente condizionato dalle condizioni ambientali, cioè peggiora alle alte temperature e con elevata umidità, risulta fondamentale verificare che il mattone non trasferisca potenziali pericolosi anche in condizioni estreme di umidità e temperatura. Tali condizioni sono state simulate inserendo il campione, che incluso all'interno dell'involucro di tamponamento, in una camera climatica per 98 giorni misurando ogni 7 giorni la resistenza di isolamento, l'indice di polarizzazione PI, lo stato di carica SOC. Di seguito vengono descritti i circuiti di misura utilizzati.

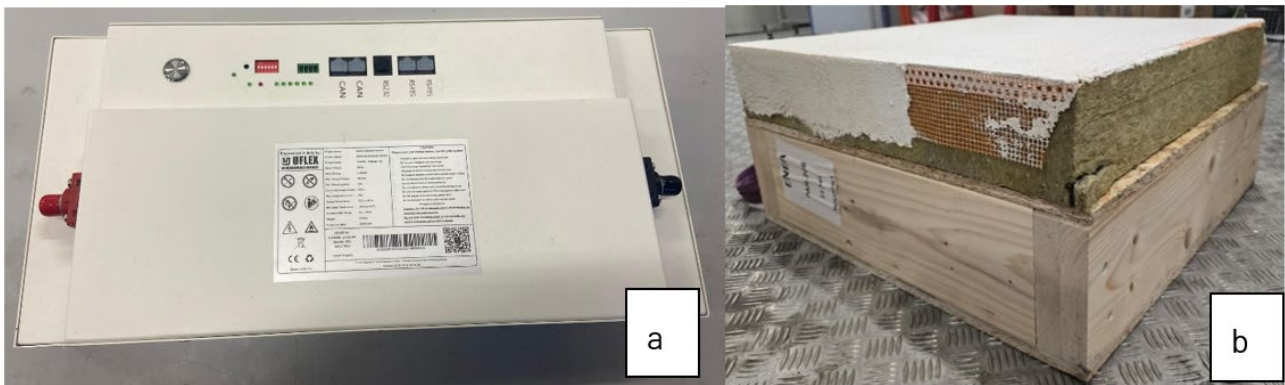


Figura 6 - Immagine dell'elemento attivo del sistema di accumulo (a) e del tamponamento (b) al cui interno è stato inserito l'elemento di accumulo per le prove di invecchiamento eseguite in camera climatica

7.3.1 Misura dei parametri legati all'isolamento (resistenza di isolamento, indice di polarizzazione PI)

I parametri legati all'isolamento sono stati misurati effettuando una prova voltamperometrica costituente in una fase di carica della durata massima di 10 minuti e in una scarica di pari durata. Il circuito utilizzato è rappresentato in Figura 7 [2, 3].

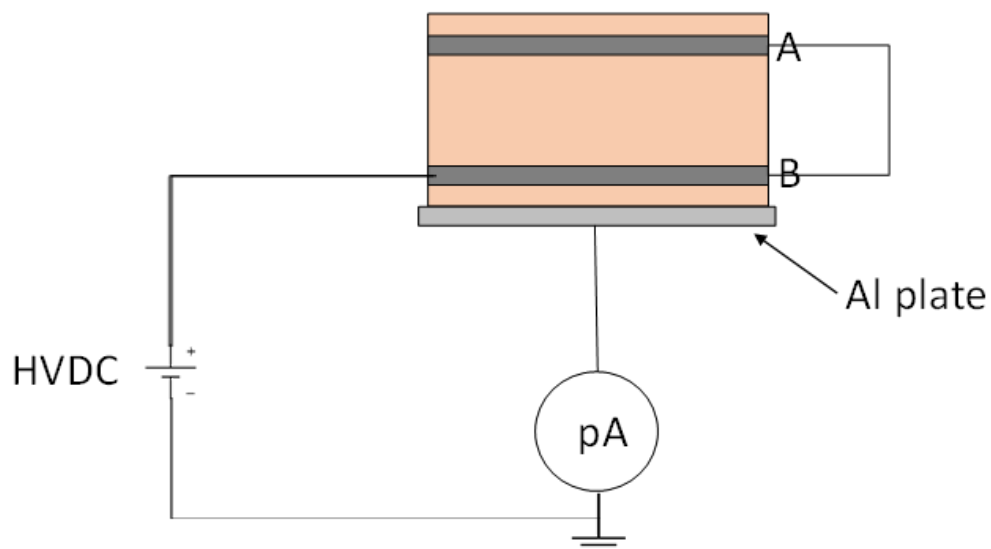


Figura 7 - Circuito di prova per la misura della resistenza di isolamento

I due elettrodi del condensatore (A e B) sono stati cortocircuitati e collegati all'elettrodo di alta tensione di generatore in continua HVDC *Keithley 2290E-5* che fornisce una tensione variabile tra 0 e 5000 V. Un picoamperometro *Keysight B9281A* è collegato all'involucro esterno del prototipo appoggiato su un supporto di alluminio. L'altro elettrodo del picoamperometro è collegato alla stessa terra del generatore di alta tensione. La fase di polarizzazione è stata eseguita ad una tensione di $V = 1000 \text{ V DC}$.

La resistenza di isolamento è stata calcolata mediante la seguente equazione:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

dove V è la tensione di prova e I la corrente misurata. Poiché la corrente varia a causa del transitorio di polarizzazione del condensatore, le norme indicano di effettuare la misura a 1 minuto e ripeterla a 10 min. Come valore di resistenza di isolamento, normalmente, si considera quello che deriva dall'equazione (2), inserendo per la corrente il valore misurato a 10 min, R_{10} , ma a volte anche il valore a 1 min, R_1 , può essere di interesse. In particolare, il valore a 1 min è utile per calcolare l'indice di polarizzazione, PI , definito come segue:

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (3)$$

Dove R_{10} = resistenza di isolamento precedentemente definita e R_1 = valore ricavato dall'equazione (1) con I = corrente misurata dopo 1 minuto dall'inizio della prova.

Come spiegato nella sezione 2, R_1 e R_{10} possono differire anche di ordini di grandezza, con $R_1 < R_{10}$ a causa della corrente di polarizzazione che nei primi minuti di applicazione della tensione può essere molto elevata, fino a quando le specie polari non si sono tutte orientate e il processo di polarizzazione è concluso.

Normalmente per un buon isolante il valore di PI è > 2 , quando $PI \approx 1$, invece, la corrente di conduzione (di volume o superficiale) prevale sulla polarizzazione, indicando una forte contaminazione superficiale del campione o una perdita di isolamento significativa.

Il prototipo in prova è stato inserito in camera climatica per misurare la variazione di resistenza di isolamento al variare umidità e temperatura. Le prove sono state condotte per circa 6 mesi, da luglio a dicembre 2024.

Sono stati effettuati due protocolli di prova:

1. Temperatura costante e umidità variabile
2. Umidità costante e temperatura variabile

Per quanto riguarda il protocollo 1), la temperatura è stata fissata a 50°C e sono state fatte prove a umidità relativa 40%, 50%, 60%, 70% e 80% della durata di 98 giorni ciascuna. L'intervallo a cui sono state fatte le misure è di 7 giorni. Le prove a temperatura variabile, invece, sono state eseguite a umidità relativa costante 50% e temperatura variabile da 20°C a 110°C con intervalli di variazione di 1 giorno ciascuno.

7.4 Test di tenuta dielettrica

Il costruttore del condensatore dichiara che il condensatore è in grado di sopportare una sovratensione di prova pari a 1.5 U_{NDC} per 10 s e 2.0 U_{NDC} per 2 s alla temperatura di 20°C, ove U_{NDC} , è la tensione nominale del condensatore in DC, cioè 48 V. Tali test sono stati ripetuti prima e dopo i cicli di invecchiamento in camera climatica per verificare la tenuta del sistema di isolamento interno dell'apparecchiatura. I test sono stati eseguiti con un generatore HVDC *Keithley 2290E-5* che fornisce una tensione variabile tra 0 e 5000 V. L'eventuale guasto durante la prova viene rivelato dall'eventuale intervento del limitatore di massima corrente del generatore.

7.5 Misura dello stato di carica (SOC)

Lo stato di carica è stato misurato collegando un carico resistivo da 1 kW ai morsetti di batteria al termine di ogni intervallo di invecchiamento. Dalla misura della durata di scarica si ricava quindi il valore dello stato di carica (SOC) del sistema di accumulo in prova.

7.6 Bibliografia

1. Chavin Arnoux, "Guida alla Misura dell'Isolamento", ed. 2010.
2. CEI EN 62631-3-1 "Proprietà dielettriche e resistive dei materiali isolanti solidi Parte 3-1: Determinazione delle proprietà resistive (metodi in c.c) - Resistenza e resistività di volume - Metodi generali"
3. CEI EN 62631-3-2 "Proprietà dielettriche e resistive dei materiali isolanti solidi Parte 3-2: Determinazione delle proprietà resistive (metodi in c.c) - Resistenza e resistività superficiali", 2016.

7.7 Abbreviazioni ed acronimi

RH = Umidità relativa

R_{10} = Resistenza misurata a 10 min

R_1 = Resistenza misurata a 1 min

SOC = Stato di carica

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno della LA3.13 il capitolato vigente non prevede consulenze, né sono state utilizzate nel corso dello svolgimento della LA.

9 Pubblicazioni scientifiche

Al momento della stesura della presente relazione non sono state completate pubblicazioni sull'attività svolta.

10 Eventi di disseminazione

Ad oggi i risultati della presente LA non sono stati ancora oggetto di eventi di disseminazione in quanto le prove sono terminate negli ultimi mesi del triennio. Tali attività potranno essere previste nel prossimo futuro.