

Ricerca di Sistema elettrico



Definizione di una configurazione ibrida accumulo elettrico-
elettrolizzatore per la produzione di idrogeno da fonti
rinnovabili in un caso applicativo reale (LA2.13)

Alfonso Damiano e Giuseppe Bossi



DEFINIZIONE DI UNA CONFIGURAZIONE IBRIDA ACCUMULO ELETTRICO-ELETTROLIZZATORE PER LA PRODUZIONE DI IDROGENO DA FONTI RINNOVABILI IN UN CASO APPLICATIVO REALE (LA2.13)

A. Damiano, G. Bossi

Università degli Studi di Cagliari

Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica

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: 1.3 - Progetto Integrato Tecnologie dell'Idrogeno

Linea di attività: *Work package 2 "Trasporto e accumulo"* - LA 2.13

Responsabile del Progetto: Luca TURCHETTI, ENEA

Responsabile del Work Package: *Luca TURCHETTI*, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Alfonso, Damiano, Università degli Studi di Cagliari

Mese inizio previsto: luglio 2023

Mese inizio effettivo: luglio 2023

Mese fine previsto: dicembre 2024

Mese fine effettivo: dicembre 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: *"Integrazione di tecnologie di accumulo elettrico e di produzione di idrogeno elettrolitico per la definizione di sistemi ibridi alimentati da fonti rinnovabili"*

Responsabile scientifico ENEA: *Paolo DEIANA*

Responsabile scientifico Co-beneficiario: *Alfonso DAMIANO*

Indice

1	Risultati attesi	4
1.1	Descrizione dei risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
2.1	Descrizione dei risultati ottenuti	5
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
4.1	Descrizione sintetica dei prodotti sviluppati.....	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	9
6	Sintesi delle attività svolte	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Analisi di fattibilità della topologia impiantistica proposta.....	11
7.2	Caratterizzazione elettrica impianto PtG MENHIR ENEA e sua modellizzazione	18
7.3	Modellizzazione della struttura di integrazione dell'impianto PtG MENHIR ENEA	26
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte	31
9	Pubblicazioni scientifiche	32
10	Eventi di disseminazione	33

Indice delle figure

Figura 1 – Esempio didascalia **Errore. Il segnalibro non è definito.**

Indice delle tabelle

Tabella 1: Sonde di misura della corrente utilizzate e relative caratteristiche tecniche20

1 Risultati attesi

- Caratterizzazione dei carichi elettrici tipici del processo di produzione di idrogeno per elettrolisi;
- Analisi di diverse configurazioni di processo e ibridizzazione con altre tecnologie;
- Modellazione per la simulazione dei processi
- Definizione di una configurazione di retrofit con accumulo energetico e gestione processi da integrare in un sistema di generazione idrogeno in un caso applicativo reale (Impianto PtG MENHIR ENEA)

1.1 Descrizione dei risultati attesi

L'attività di ricerca aveva come obiettivo lo sviluppo di un sistema di alimentazione in corrente continua per l'alimentazione diretta di un elettrolizzatore da fonte rinnovabile caratterizzato da coefficiente di utilizzo tale da consentire un miglioramento delle prestazioni del processo di produzione di idrogeno verde. Tale linea di attività era strettamente connessa ai risultati ottenuti dalla linea LA2.12. Nello specifico, questa linea di attività prevedeva lo sviluppo iniziale di una caratterizzazione dell'elettrolizzatore installato nell' Impianto PtG MENHIR ENEA allo scopo di sviluppare una analisi delle attuali prestazioni elettriche del sistema di condizionamento dell'energia elettrica utilizzato e, definire successivamente, le diverse possibili configurazioni idonee alla sua conversione in un impianto di produzione di idrogeno verde. In particolare, l'obiettivo era quello di definire una configurazione ibrida caratterizzata dall'utilizzo di un sistema di accumulo elettrochimico connesso all'impianto fotovoltaico e all'elettrolizzatore per la fornitura di energia elettrica secondo le specifiche richieste. A tale scopo era stata prevista una modellizzazione e la simulazione elettrica del sistema esistente. Obiettivo finale era quello di giungere ad una topologia impiantistica in grado di realizzare il retrofit dell'impianto PtG MENHIR ENEA.

2 Risultati ottenuti

- È stata condotta una caratterizzazione elettrica sia statica che dinamica dell’impianto PtG MENHIR ENEA – indicatore di raggiungimento del risultato: 100%
- Sono state analizzate diverse configurazioni impiantistiche volte alla realizzazione di un’ibridizzazione del sistema di produzione di idrogeno verde – indicatore di raggiungimento dell’risultato: 100%;
- È stato sviluppata una modellizzazione e simulazione del sistema di conversione elettrico installato dell’impianto PtG MENHIR ENEA. Inoltre, sono stati sviluppati i sistemi per la modellizzazione e simulazione del dispositivo di interfaccia proposto – indicatore di raggiungimento dell’risultato: 100%;
- È stata sviluppato una progettazione preliminare del sistema di retrofit per l’impianto PtG MENHIR ENEA – indicatore di raggiungimento dell’risultato: 100%;
- E’ stata sviluppata una nuova topologia impiantistica di alimentazione di un elettrolizzatore alcalino idonea all’ibridizzazione e all’interfacciamento con la rete di alimentazione.
- È stata implementata una metodologia di caratterizzazione di componenti sensibili della topologia di conversione proposta e test sperimentali di verifica e validazione del modello.
- Sono stati condotti i primi test sperimentali di verifica e validazione dei modelli di simulazione del sistema di conversione DC/DC proposti.

2.1 Descrizione dei risultati ottenuti

Sulla base delle analisi sviluppate durante la LA2.12 è stata definita una nuova topologia di sistema di condizionamento dell’energia elettrica dedicata all’alimentazione di elettrolizzatori per l’alimentazione diretta da fonti rinnovabili per la produzione di idrogeno verde. Allo scopo di massimizzare il numero di ore di utilizzo dell’elettrolizzatore è stata sviluppata una metodologia di dimensionamento dell’impianto fotovoltaico e del sistema di accumulo dedicato alla minimizzazione del costo di produzione. Inoltre, è stata definita la topologia di sistema di condizionamento riportata schematicamente nella Figure 1. Esso prevede l’alimentazione diretta dell’elettrolizzatore da parte di un impianto fotovoltaico attraverso una rete in corrente continua interfacciata attraverso un convertitore Multi Active Bridge (MAB) all’elettrolizzatore al sistema di accumulo elettrochimico e al convertitore elettronico di interfaccia con la rete di distribuzione. Funzione del convertitore MAB a quattro porte è quello di gestire i flussi di potenza tra il sistema di produzione, l’elettrolizzatore, il sistema di accumulo e la rete in maniera tale da realizzare i profili di controllo e gestione descritti nella LA2.12 adattando allo stesso tempo le tensioni ai valori richiesti dalla batteria e dall’elettrolizzatore nelle diverse condizioni di esercizio. Allo scopo di poter validare la topologia e la strategia di controllo proposta è stata sviluppata in collaborazione con ENEA e Sardegna Ricerche una campagna di misura sul sistema PtG MENHIR ENEA sito in Casaccia. Sulla base delle misure condotte è stato possibile modellizzare il sistema di condizionamento presente e definire le condizioni operative in AC e in DC del sistema. Successivamente è stato implementato in ambiente Plecs il sistema di condizionamento elettrico del PtG MENHIR ENEA sito in Casaccia e i risultati delle simulazioni sono stati confrontati con i dati sperimentali evidenziandone una sostanziale sovrapposizione. In particolare, sono state confermate le analisi riportate nella LA2.12 relative al tasso di distorsione armonica della corrente introdotto dal sistema di condizionamento costituito dal raddrizzatore a SCR con 6 impulsi di controllo. Successivamente sono state sviluppate le analisi relative al sistema proposto costituito da un MAB sia a tre che a quattro porte. Nello specifico, sono state condotte le modellizzazioni per lo

sviluppo di una configurazione MAB a tre porte che fosse caratterizzata da un disaccoppiamento completo. A tale scopo è stata analizzata e implementata una configurazione intrinsecamente disaccoppiata particolarmente idonea per tali applicazioni. Ciò ha richiesto una specifica modellizzazione dei trasformatori in alta frequenza utilizzati nei MAB. In particolare, è stata sviluppata una nuova procedura di caratterizzazione parametrica dei trasformatori in alta frequenza (sino a 13 MHz) attraverso l'utilizzo di strumentazione specifica utilizzando un prototipo di trasformatore ad alta frequenza commissionato nell'ambito del progetto. Tale attività è stata svolta su trasformatori di potenza nominale pari a 20 kW operanti a frequenza di 20 kHz e tensione di ingresso pari a 700 V con rapporti di trasformazione 1:1, 1:2 e 1:4 le cui specifiche sono state definite per il presente progetto. Il lavoro svolto ha consentito di realizzare un'accurata modellizzazione dei trasformatori e conseguentemente sviluppare il dimensionamento e la validazione prima numerica e poi sperimentale del TAB intrinsecamente disaccoppiato. Tale attività ha consentito di validare prima numericamente e poi sperimentalmente la configurazione topologica proposta e di sviluppare conseguentemente un dimensionamento preliminare del sistema di condizionamento da installare in parallelo al sistema PtG MENHIR ENEA di Casaccia.

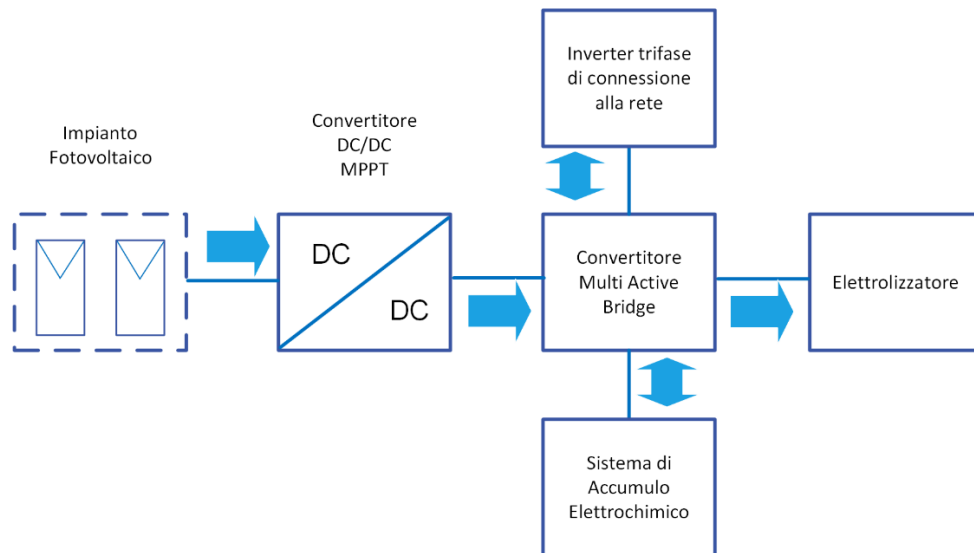


Figure 1: Diagramma a blocchi del sistema di condizionamento della potenza per l'alimentazione dell'elettrolizzatore

3 Prodotti attesi

Rapporto tecnico (R2.13-1): "Definizione di una configurazione ibrida accumulo elettrico-elettrolizzatore per la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili in un caso applicativo reale"

4 Prodotti sviluppati

- Rapporto tecnico (R2.13-1): "Definizione di una configurazione ibrida accumulo elettrico-elettrolizzatore per la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili in un caso applicativo reale".
- Sviluppo di un codice di simulazione in ambiente Plecs del sistema elettrico di conversione AC/DC per l'alimentazione dell'elettrolizzatore dell'impianto PtG MENHIR ENEA.
- Sviluppo di un codice di simulazione in ambiente Plecs del sistema di conversione DC/DC per dedicato all'alimentazione di un elettrolizzatore alcalino alimentato da fonte solare.

4.1 Descrizione sintetica dei prodotti sviluppati

È stato redatto il rapporto tecnico relativo all'attività svolta nel periodo indicato con l'indicazione dei risultati conseguiti rispetto a quelli attesi. Inoltre, è stato sviluppato un codice di simulazione in ambiente Plecs del sistema elettrico di conversione AC/DC per l'alimentazione dell'elettrolizzatore dell'impianto PtG MENHIR ENEA e del sistema di conversione DC/DC per dedicato all'alimentazione di un elettrolizzatore alcalino alimentato da fonte solare per il dimensionamento dell'upgrade ibridizzato dell'impianto Impianto PtG MENHIR ENEA.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Le attività relative al LA2.13, inserite nel WP2, riguardanti lo “Definizione di una configurazione ibrida accumulo elettrico-elettrolizzatore per la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili in un caso applicativo reale” è stato svolto in accordo con il programma inizialmente definito.

Dal punto di vista economico si registrano differenze nei costi imputati alle singole voci del progetto. In particolare, la voce relative alla strumentazione ha registrato un significativo incremento a causa delle necessità di condurre verifiche non preventivate sui trasformatori in alta frequenza utilizzati per la realizzazione del prototipo. Tale necessità si è manifestata nella fase conclusiva del progetto (settembre-dicembre 2024) e ha richiesto l'utilizzo di strumentazione dedicata (impedenziometro ad alta frequenza) affittata per lo scopo. Tale imprevisto ha inevitabilmente condotto a effettuare dei tagli nelle altre voci di spesa (consulenza non rinnovata a settembre e tagli su missioni/conferenze e componentistica elettronica) per rimanere all'interno del budget assegnato. Inoltre, l'attività di ricerca è stata imputata esclusivamente ad un ricercatore del Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica (DIEE) di UNICA. Infatti, a causa di eventi non prevedibili al momento della presentazione del progetto, non è stato possibile coinvolgere altre figure a tempo indeterminato del DIEE competenti in materia a causa della saturazione del monte orario disponibile. Inoltre, la concomitante attivazione di progetti PNRR di Ateneo ha reso difficile il reclutamento di nuove figure a tempo determinato. Il dottorando Giuseppe Bossi è stato coinvolto scientificamente a causa dell'affinità della sua tesi con le tematiche sviluppate ma non economicamente, giacché la sua borsa di dottorato è stata finanziata su altri fondi.

6 Sintesi delle attività svolte

È stata sviluppata l'analisi di una configurazione di alimentazione diretta in corrente continua da fonte rinnovabile di un elettrolizzatore alcalino. In particolare, il sistema di condizionamento elettrico proposto prevede l'alimentazione dell'elettrolizzatore da parte di una rete in corrente continua alimentata da un impianto fotovoltaico supportato per la gestione dei flussi di potenza richiesti da un sistema elettrochimico e da un dispositivo di condizionamento AC/DC bidirezionale trifase di tipo grid-connected connesso alla rete di distribuzione. Nello specifico, il sistema elettrico proposto prevede di utilizzare la rete di distribuzione elettrica in AC come ausilio sia per l'immissione in rete dell'energia in surplus nelle micro-reti in DC sia quale back-up in caso di malfunzionamenti o manutenzione di alcuni componenti del sistema. Durante tale periodo è stata sviluppata l'analisi, la modellizzazione, la validazione sperimentale e il dimensionamento preliminare dei sistemi di interfaccia costituenti il sistema di condizionamento proposto in vista di un futuro up-grade del sistema PtG MENHIR ENEA sito in Casaccia. A tale scopo è stata sviluppata, in collaborazione con ENEA e Sardegna Ricerche, una campagna di misura sul sistema PtG MENHIR ENEA sito in Casaccia. Che ha permesso di modellizzare e simulare il sistema di condizionamento esistente e definire le condizioni operative in AC e in DC del sistema di condizionamento. Successivamente è stato modellizzato, simulato e validato in scala prototipale un sistema di condizionamento Multi Active Bridge (MAB) per l'interfacciamento in DC degli impianti di produzione, accumulo e elettrolisi, propedeutico all'implementazione delle strategie di controllo già proposte in LA2.12. Le attività svolte hanno permesso di definire un dimensionamento preliminare del sistema di condizionamento da installare in parallelo al sistema PtG MENHIR ENEA di Casaccia.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Analisi di fattibilità della topologia impiantistica proposta

La topologia impiantistica proposta prevede la realizzazione di un sistema in corrente continua per la gestione dei flussi di potenza prodotta da un impianto fotovoltaico per l'alimentazione di un elettrolizzatore alcalino. Le analisi effettuate durante la LA2.12 hanno evidenziato che a seguito di un dimensionamento dedicato dell'impianto fotovoltaico e di un sistema di accumulo sia possibile realizzare, per una definita taglia di potenza dell'elettrolizzatore, la produzione di idrogeno verde in configurazioni sia in isola sia connesse alla rete con coefficienti di utilizzo dell'elettrolizzatore rispettivamente pari al 61% (5343 ore/anno) e 67,7% (5931 ore/anno) con costi di produzione per un elettrolizzatore da 25 kW_e inferiori ai 12€/kg. Per poter realizzare tali obiettivi è necessario poter implementare i profili di potenza definiti dalla strategia di controllo proposta sia in produzione sia in accumulo che in alimentazione dell'elettrolizzatore garantendo allo stesso tempo un disaccoppiamento galvanico tra i singoli sottosistemi.

Pertanto, è stata proposta una topologia impiantistica basata sulla realizzazione di una micro-rete in corrente continua caratterizzata dalla struttura schematica riportata in Figure 1.

Nello specifico le singole sezioni dell'impianto fotovoltaico (stringhe o pannelli) sono connesse alla micro-rete in DC attraverso dei convertitori DC/DC che svolgono la funzione di inseguimento del punto di massima potenza (MPPT). Questi componenti, già ampiamente utilizzati negli impianti fotovoltaici consentono di inseguire il punto di massima efficienza garantendo delle elevate efficienze di conversione minimizzando allo stesso tempo le criticità connesse ai fenomeni locali di ombreggiamento e/o malfunzionamento di ogni singolo componente di captazione utilizzato per la generazione fotovoltaica. La potenza prodotta, opportunamente condizionata viene immessa nella rete in DC a cui la porta in uscita dal convertitore DC/DC è connessa che deve essere mantenuta costante per il corretto funzionamento dell'MPPT. La scelta della tensione di esercizio della rete in DC dipende dalle caratteristiche dei pannelli fotovoltaici utilizzati. Nel caso specifico per congruità con la possibile configurazione connessa alla rete si è scelto di fissare il valore di riferimento pari a 650 V in accordo con i valori usualmente utilizzati nelle micro-reti in DC interconnesse con le reti di distribuzione AC. La rete su cui insiste l'impianto fotovoltaico è connessa al sistema di accumulo, all'elettrolizzatore e al bus DC di alimentazione del convertitore di rete attraverso un convertitore DC/DC a quattro porte della tipologia Multi Active Bridge (MAB).

Tale configurazione consente di garantire il disaccoppiamento galvanico tra i singoli sistemi e il condizionamento dei livelli di tensione ai valori tipici delle diverse tecnologie, garantendo allo stesso tempo valori di efficienza di conversione alle condizioni operative standard particolarmente elevati compresi tra il 94 e il 97%.

Inoltre, tale topologia di conversione risulta particolarmente idonea a garantire sulla rete DC lato impianto PV valori di tensione costanti in quanto la tensione viene controllata grazie al contributo sia della rete di alimentazione sia dal sistema di accumulo, garantendo, grazie alla intrinseca ridondanza, un elevato grado di immunità verso i disturbi di rete e conseguentemente un maggior livello di affidabilità lato produzione. La topologia impiantistica proposta consente una gestione diretta, stabile e affidabile della potenza di alimentazione dell'elettrolizzatore giacché il sistema è dotato di sistema accumulo dimensionato per gestire l'energia elettrica in eccesso prodotta dall'impianto fotovoltaico e restituirla quando necessario. Come evidenziato nella relazione della LA2.12, tale soluzione impiantistica

permette di supportare l'alimentazione dell'elettrolizzatore in tutte le condizioni di esercizio per un arco di tempo minimo definito e pari ad almeno 8 ore.

Un'altra caratteristica che rende il MAB idoneo a tale specifica applicazione è la possibilità di realizzare uno scambio bidirezionale di potenza tra ogni singola porta. Questa funzionalità consente di utilizzare efficacemente sia il sistema di accumulo nella sua funzione di supporto all'alimentazione dell'elettrolizzatore, sia il convertitore connesso alla rete nella sua funzione di back-up energetico (erogazione in rete del surplus di produzione o supporto all'elettrolizzatore in caso di malfunzionamento o manutenzione di componenti di impianto).

Nello specifico nel caso della configurazione in isola è stata analizzata la configurazione con tre porte mentre nel caso "grid-connected" viene proposta la configurazione a quattro porte.

Allo scopo di valutare la fattibilità della proposta è stata inizialmente analizzata la configurazione a tre porte che è riportata in Figure 2.

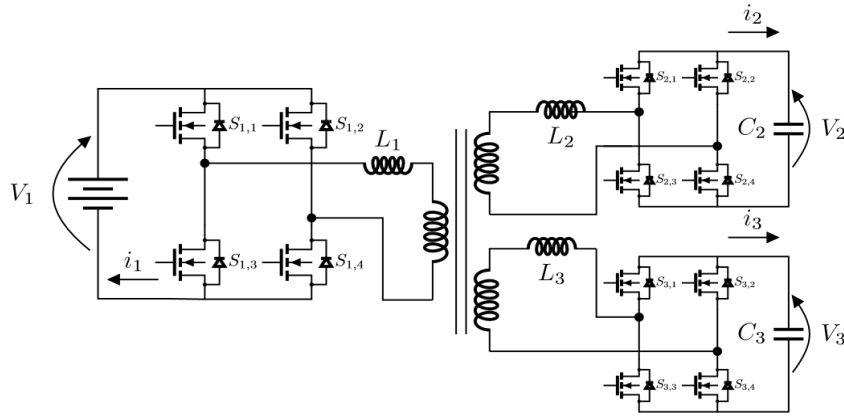


Figure 2: Rappresentazione circuitale del Triple Active Bridge

Tale sistema è costituito da tre ponti ad H ciascuno utilizzato per convertire la tensione di alimentazione DC in una tensione AC ad onda quadra caratterizzata da un duty-cycle del 50%. Le tensioni ad onda quadra alimentano un trasformatore a tre avvolgimenti. La regolazione dello sfasamento δ_{kj} tra le tensioni applicate sulla generica porta k-sima e j-sima consente di regolarne i flussi di potenza tra di esse attraverso le relazioni di seguito riportare. In particolare, la potenza assorbita dalla generica porta k-sima dipende dai contributi forniti sia dalla porta j-esima che da quella i-esima che dalla frequenza dell'onda quadra f_s e i parametri propri del trasformatore quali le induttanze di dispersione L_k . Allo scopo di rendere la modellizzazione del TAB idonea a rappresentare gli scambi di potenza tra le porte si esegue una trasformazione del modello circuitale equivalente a stella del trasformatore in una a triangolo come quella riportata in Figure 3.

$$P_k = \sum_{j \neq k}^3 \frac{V_k V'_j L'_i \delta_{kj} (\pi - |\delta_{kj}|)}{2\pi^2 f_s (L_1 L'_2 + L_1 L'_3 + L'_2 L'_3)} \quad i \neq k, j; \quad (1)$$

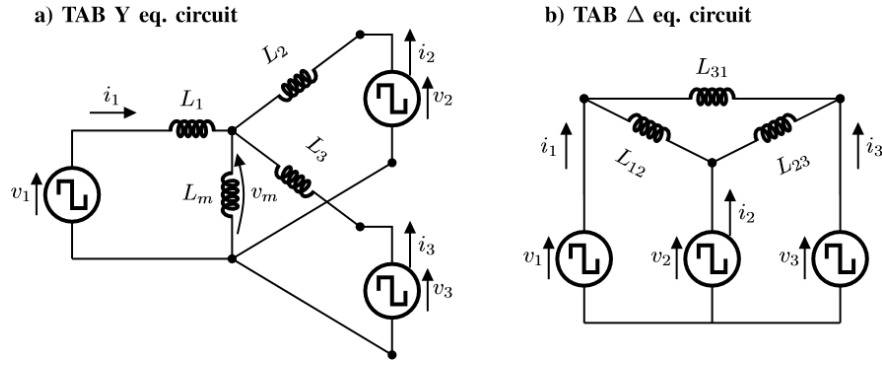


Figure 3: Circuito equivalente del TAB a) e trasformazione stella triangolo b)

Questa trasformazione determina una modifica delle induttanze secondo l'equazione (2),

$$L_{jk} = L_j + L_k + \frac{L_j L_k}{L_i}, \quad i, j, k = 1, 2, 3; \quad i \neq j, k; \quad (2)$$

conseguente la relazione che permette di determinare le potenze scambiate tra i singoli nodi assume la forma (3).

$$P_{jk} = \frac{V'_j V'_k}{2\pi^2 f_s L_{jk}} \delta_{jk} (\pi - |\delta_{jk}|); \quad (3)$$

Conseguentemente, la potenza scambiata da ogni singolo convertitore può essere determinata come combinazione dei contributi dovuti ad ogni singola interazione reciproca attraverso la (4).

$$P_k = \sum_{j \neq k} P_{kj} = \sum_{j \neq k}^3 \frac{V'_j V'_k}{2\pi^2 f_s L_{kj}} \delta_{kj} (\pi - |\delta_{kj}|); \quad k = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Tale relazione evidenzia che le potenze scambiate tra le porte possono assumere valori sia positivi sia negativi e che vi è una stretta correlazione tra le tre porte come evidenziato dalla relazione (5).

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{12} - P_{31}; \\ P_2 &= P_{23} - P_{12}; \\ P_3 &= P_{31} - P_{23}; \end{aligned} \quad (5)$$

Allo scopo di superare tale criticità si è effettuato uno studio volto a verificare la possibilità di disaccoppiare il controllo di potenza tra le singole porte per rendere possibile una gestione dei flussi di potenza che fosse più flessibile e tale da non interferire reciprocamente sui parametri elettrici di controllo ed in particolare della tensione. Una modellizzazione accurata del sistema riferita alla porta di ingresso n° 1 ha permesso di evidenziare che è possibile sviluppare sia un disaccoppiamento di tipo software, attraverso la cancellazione delle componenti di accoppiamento incrociato, sia un disaccoppiamento hardware attraverso la scelta opportuna delle induttanze di dispersione.

Facendo riferimento al modello in corrente del TAB riportato in (6) dove M_{12} e M_{13} rappresentano rispettivamente il valore del rapporto tra le tensioni di ingresso alle porte 1 e 2 e alle porte 1 e 3,

e le induttanze assumono la forma riportata in (7), si osserva che per α che tende a zero i termini esterni alla diagonale principale tendono a zero e pertanto il sistema assume una configurazione disaccoppiata.

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \frac{4V_1}{\pi^3 f_s L} \frac{1 + M_{13}\alpha}{2\alpha + 1} \begin{bmatrix} -1 & \frac{M_{13}\alpha}{1 + M_{13}\alpha} \\ \frac{M_{12}\alpha}{1 + M_{13}\alpha} & \frac{1 + M_{12}\alpha}{1 + M_{13}\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{12} \\ \delta_{31} \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$L'_2 = L'_3 = L; \quad L_1 = \alpha L; \quad L_{12} = L_{31} = (2\alpha + 1)L; \quad L_{23} = \left(\frac{2\alpha + 1}{\alpha} \right) L; \quad (7)$$

Tale condizione impone che l'induttanza L_1 sia uguale a zero. Pertanto, nel caso in cui L_1 sia uguale a zero il sistema teoricamente è completamente disaccoppiato. Tale condizione è puramente teorica e pertanto assume una notevole importanza la scelta dei componenti da utilizzare ed in particolare del trasformatore ad alta frequenza. Nell'ambito del progetto in esame è stata effettuata un'analisi di mercato ed è stato commissionata la realizzazione di due trasformatori per applicazioni in alta frequenza caratterizzati da tre e quattro porte. I trasformatori dovevano essere in grado di operare ad una potenza nominale di 20 kW con tensioni di alimentazioni sulla porta di ingresso di 700 V e rapporti di trasformazione definiti 1:1 1:2 e 1:4 e dovevano presentare induttanze di dispersione trascurabili. La frequenza di lavoro è stata fissata a 25 kHz. Inoltre, allo scopo di minimizzare gli effetti capacitivi e i conseguenti effetti di compatibilità elettromagnetica è stato richiesto di distribuire gli avvolgimenti in maniera tale da ridurre significativamente la capacità parassite. Il trasformatore è stato realizzato sulle specifiche indicate e successivamente caratterizzato da UNICA. La caratterizzazione è stata condotta con un analizzatore di impedenza Keysight E9440A noleggiato nell'ambito del progetto e in grado di operare le misure di richieste sino ad una frequenza di 13 MHz. Le analisi condotte si sono concentrate sulla modellizzazione del sistema allo scopo di poter verificare l'utilizzabilità del trasformatore per la specifica applicazione.

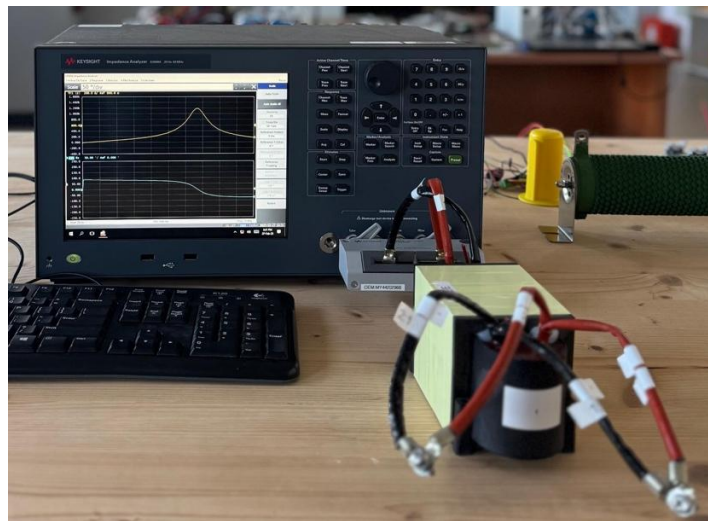


Figure 4: Trasformatore ad alta frequenza a tre avvolgimenti durante la caratterizzazione.

Per poter giungere ad una rappresentazione fedele del comportamento del trasformatore in alta frequenza si è reso necessaria l'introduzione di un modello piuttosto complesso e riportato in Figure 5 che ha richiesto una complessa e laboriosa modellizzazione in frequenza.

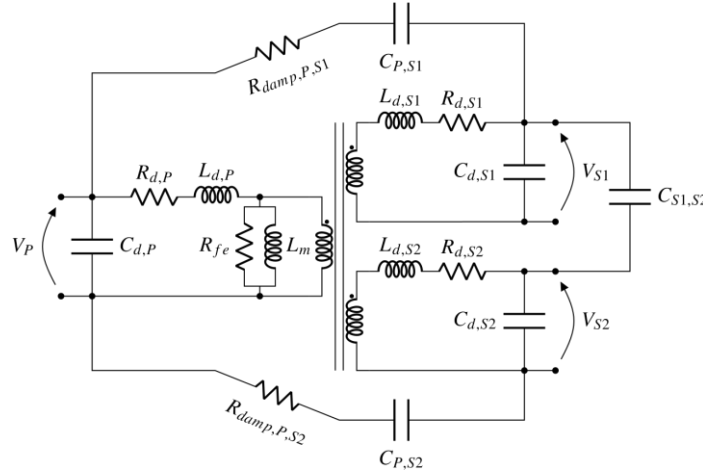


Figure 5: Modello di circuito equivalente a π proposto

I risultati ottenuti a seguito della modellizzazione hanno consentito di rappresentare abbastanza fedelmente in comportamento in frequenza del sistema come riportato nelle Figure 6 e Figure 7. In particolare, si riportano rispettivamente i valori delle evoluzioni in frequenza delle impedenze di circuito aperto e di corto circuito in modulo e fase modellizzate e misurate con lo strumento. La sovrapposizione tra i dati del modello e quelli delle misure può essere ritenuto più che soddisfacente. Sulla base di risultato è stato condotto un test di verifica sperimentale orientato a confrontare i risultati del modello simulato con quelli sperimentali. A tale scopo il trasformatore è stato connesso ad un ponte ad H come mostrato in Figure 8 ed è stato alimentato con un'onda quadra caratterizzata da una frequenza di 20 kHz e un'ampiezza di 400 V.

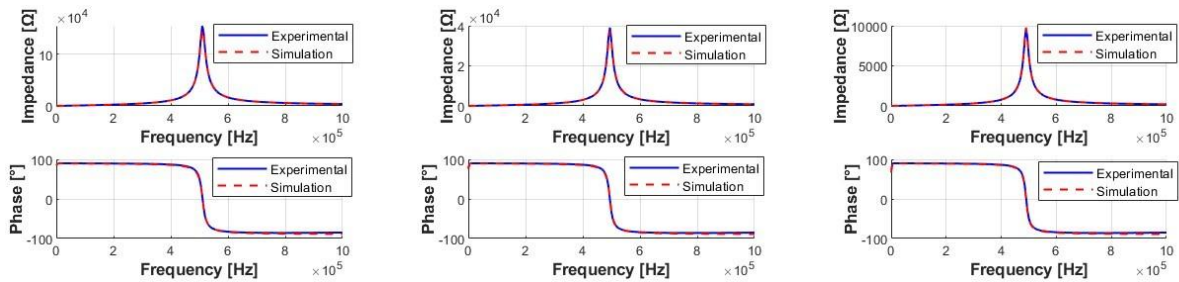


Figure 6: Impedenza primaria, secondaria e terziaria in condizioni di circuito aperto.

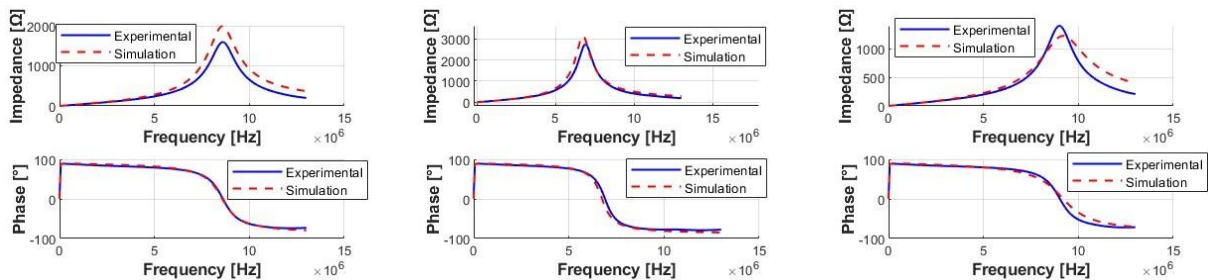


Figure 7: Impedenze di corto-circuito

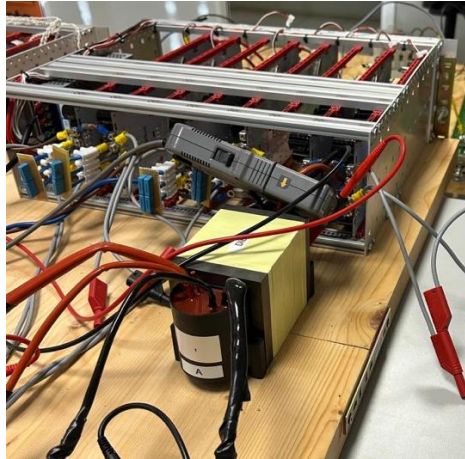


Figure 8: Trasformatore ad alta frequenza – test a vuoto con onda quadra a 20 kHz.

I risultati riportati in Figure 9 evidenziano una sostanziale sovrapposizione tra i dati sperimentali e quelli simulati in particolare durante i transitori di tensione nei quali il comportamento dei componenti parassiti appare più significativo. In particolare, l'analisi condotta ha permesso di evidenziare che i valori delle induttanze di dispersione del trasformatore riportate al primario sono comprese tra 2,8 e 3,2 μH , 1000 volte più piccole dell'induttanza di magnetizzazione e circa 30 volte più piccole delle induttanze di dispersione necessarie per la realizzazione delle potenze di progetto. Tali condizioni consentono la realizzazione di un TAB che può definirsi quasi intrinsecamente disaccoppiato.

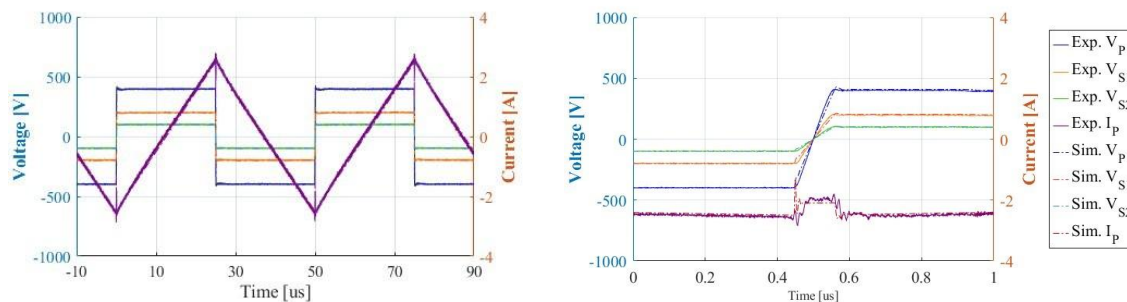


Figure 9: Confronto tra risultati sperimentali e modello del trasformatore ad alta frequenza.

Sulla base di tali risultati è stata sviluppata una modellizzazione in ambiente PLECS per verificare il disaccoppiamento del sistema TAB. Successivamente, utilizzando un set-up a disposizione di UNICA e riportato in Figure 10 sono stati condotti dei test identici a quelli condotti in simulazione per validare sperimentalmente il modello di TAB utilizzato. Nello specifico è stato applicato un gradino di carico su una delle porte di uscite ed è stato monitorato il comportamento sull'altra esercita in una condizione di carico costante e considerando la porta di riferimento alimentata a tensione costante. Il sistema di controllo implementato aveva l'obiettivo di controllare gli sfasamenti tra le singole tensioni applicate sul TAB in maniera tale da mantenere i valori delle tensioni di uscita delle tre porte costanti a valori predefiniti da specifici set-point.

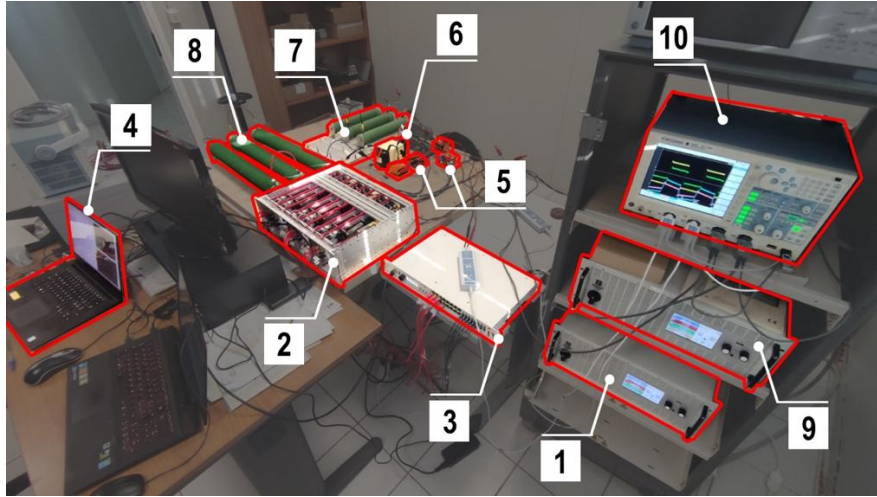


Figure 10: Sistema utilizzato per la validazione sperimentale: 1->alimentatore elettronico emulante la generazione PV; 2-> ponti ad H per l'alimentazione del TAB; 3-> controller per la prototipazione rapida; 4-> computer di interfaccia; 5-> induttanze esterne; 6-> trasformatore ad alta frequenza; 7+8-> carico resistivo variabile emulante variazioni di carico a gradino; 9-> carico elettronico

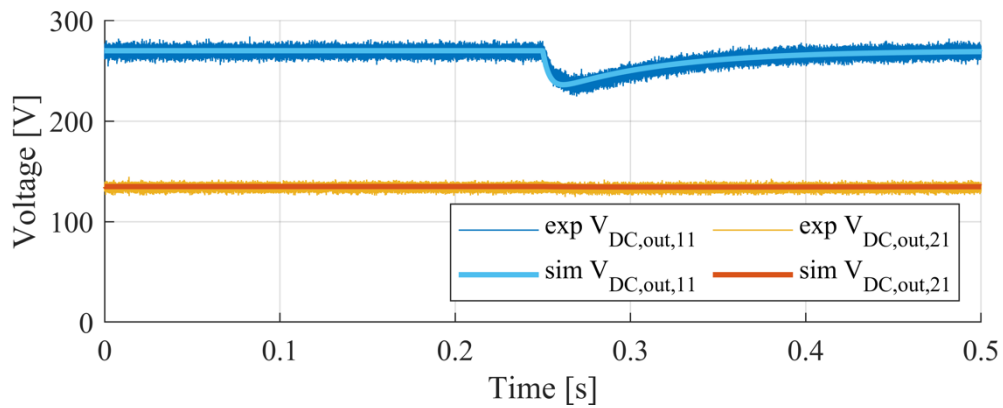


Figure 11: Evoluzione delle tensioni sulle due porte di uscite all'applicazione di un gradino di carico sulla porta 1

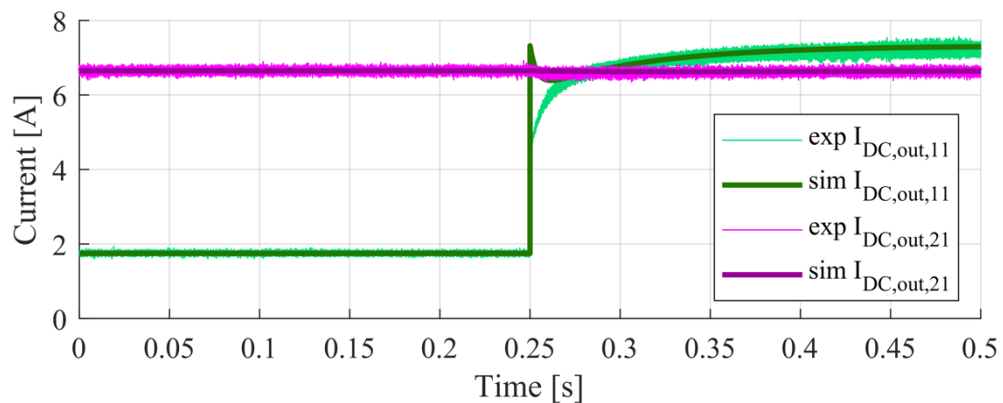


Figure 12: Evoluzione delle correnti sulle due porte di uscite all'applicazione di un gradino di carico sulla porta 1

I risultati riportati in Figure 11 e Figure 12 mostrano che l'evoluzione della tensione e della corrente di carico sulla porta di uscita non subiscono alcuna variazione nel momento in cui si registra la variazione di carico sull'altra. Ciò conferma la condizione di disaccoppiamento tra i due sistemi. Inoltre, i risultati sperimentali e quelli numerici sono perfettamente sovrapposti indice di una corretta modellizzazione del sistema proposto. I buoni risultati del processo di validazione hanno permesso quindi di utilizzare lo strumento modellistico sviluppato per la fase

di predisposizione del retrofit dell'impianto PtG MENHIR ENEA. Pertanto, il confronto tra i dati numerici e quelli sperimentali ha consentito di confermare che la struttura proposta consente di realizzare gli obiettivi di gestione disaccoppiata dei flussi di potenza.

7.2 Caratterizzazione elettrica impianto PtG MENHIR ENEA e sua modellizzazione

Definita la topologia impiantistica da realizzare e sviluppato lo strumento di simulazione idoneo a riprodurre la funzionalità del sistema di condizionamento è stata condotta una campagna di caratterizzazione dell'impianto di elettrolisi PtG MENHIR ENEA sito in Casaccia. Tale attività è stata sviluppata in stretta collaborazione con il gruppo di ENEA e con Sardegna Ricerche, contrattualizzata per lo svolgimento di questa specifica attività. La predisposizione delle fasi di caratterizzazione del sistema di alimentazione dell'elettrolizzatore è stata inizialmente pianificata con ENEA sulla base delle informazioni disponibili e gli schemi funzionali del sistema. In particolare, è emerso che il sistema è caratterizzato da un sistema di condizionamento costituito da un raddrizzatore a SCR con 6 impulsi di controllo, schematicamente riportato in Figure 13.

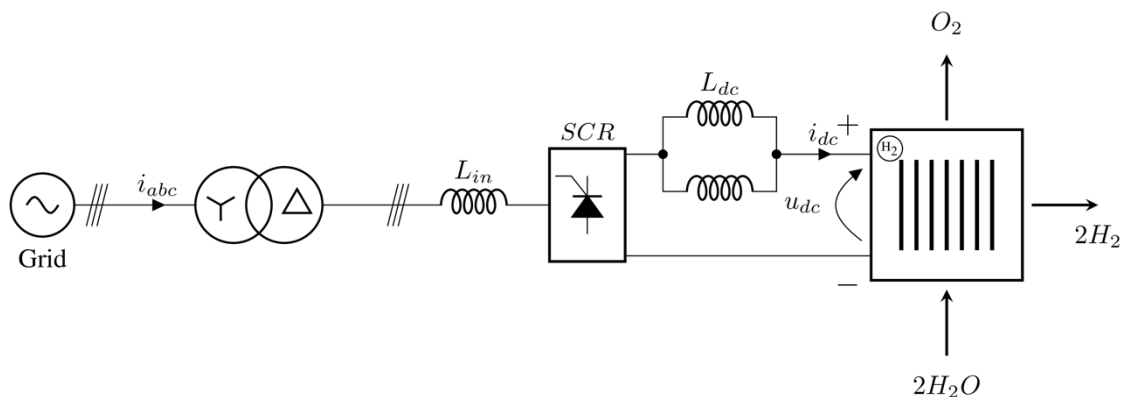


Figure 13: Rappresentazione schematica del sistema di condizionamento elettrico dell'impianto PtG MENHIR ENEA

Il sistema è costituito da un trasformatore trifase in connessione stella triangolo di potenza di potenza 35 kVA connesso ad un ponte di raddrizzamento a tiristori la cui uscita è connessa direttamente all'elettrolizzatore da 22 kW mediante una induttanza di filtro di valore pari a 1,5 mH. Il controllo del ponte di raddrizzamento è realizzato con un sistema di retroazione in corrente. Nello specifico un regolatore PI confronta la corrente misurata sull'elettrolizzatore con il valore di riferimento e fornisce come output l'angolo di innesco dei tiristori allo scopo di controllare il valore della tensione media applicata sull'elettrolizzatore. Obiettivo della campagna di misura è stato quello di registrare, in condizioni di esercizio reale, le evoluzioni delle correnti e delle tensioni su alcuni punti considerati caratteristici del sistema in esame. In particolare, è stato predisposto il set-up di misura con lo scopo di monitorare evoluzione elettrica in AC in ciascuno dei punti di seguito denominati A, B e C, e allo stesso tempo registrare in contemporanea le grandezze elettriche all'ingresso dell'elettrolizzatore nel punto in DC indicato come punto D.

Nello specifico i punti su cui sono state condotte le misure sono:

Punto A – Situato nel quadro elettrico che alimenta il generatore di idrogeno con tutte le utenze elettriche ausiliari. Le misurazioni acquisite in questo punto riportano il consumo totale dell'impianto.

Punto B – Ingresso del trasformatore primario.

Punto C – Uscita dal trasformatore secondario.

Punto D – Alimentazione DC dell'elettrolizzatore a monte delle induttanze filtro.

Le campagne di monitoraggio condotte hanno permesso di monitorare e acquisire, nei punti di misura concordati, l'evoluzione dei parametri elettrici dal momento dell'alimentazione e avvio della macchina sino allo spegnimento totale.

Si specifica che, come riferito dai referenti ENEA dell'impianto, nell'intervallo di tempo che intercorre tra l'avvio dello stack e il raggiungimento della condizione di regime con la corretta erogazione dell'idrogeno si avvicendano tre fasi transitorie tipiche. La prima è la fase associata alla pressurizzazione dell'impianto che termina al raggiungimento del valore di 12 bar. La seconda è quella associata al transitorio termico e termina al raggiungimento di 60°C da parte dello stack. Vi è infine un transitorio chimico necessario per garantire il giusto grado di purezza dell'idrogeno prodotto. La durata totale della fase transitoria non ha un tempo stabilito e costante, ma dipende dalle condizioni esterne e dallo stato della macchina (es: un riavvio che avviene dopo poco tempo dal precedente spegnimento richiede un transitorio termico più breve).

Essendo il parametro di controllo della produzione di H₂ la corrente di alimentazione dello stack IDC, durante le tre campagne di monitoraggio sono stati imposti diversi set point secondo la sequenza concordata e mostrata in Figure 14.

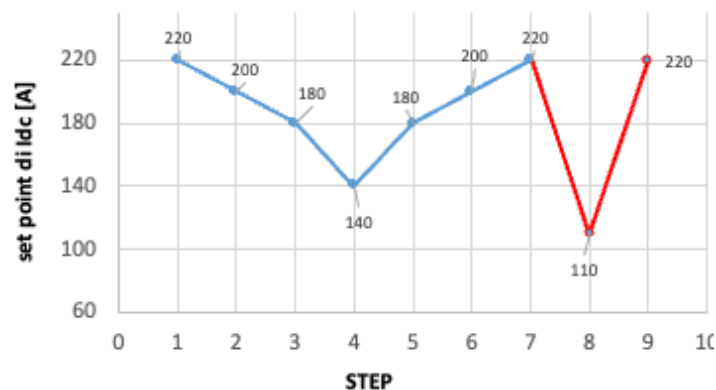


Figure 14: Sequenza di set point della corrente Idc imposti durante le campagne di monitoraggio.

Le rampe finali in discesa e in salita con estremi 220A e 110A, evidenziate in rosso nel grafico di Figure 14, sono state imposte e monitorate in tutte le campagne di monitoraggio.

Le misure elettriche effettuate durante le tre campagne hanno permesso di registrare le tensioni, le correnti e i rispettivi valori di tasso di distorsione armonico (THDx), le potenze attive in DC e in AC e le potenze reattive in AC.

Sono inoltre stati acquisiti i dati relativi alle forme d'onda della corrente e della tensione AC in corrispondenza delle condizioni di regime successive all'imposizione dei diversi set point di corrente e nei momenti più significativi dei transitori di tutte e tre le campagne di monitoraggio per mezzo di un oscilloscopio.

Per le prove è stato utilizzato un analizzatore di rete Yokogawa Power Analyzer WT5000 opportunamente configurato e interfacciato ad un PC con il software WTVIEWER per il controllo dello strumento e il monitoraggio delle grandezze elettriche. Per misurare le correnti AC sono state utilizzate tre pinze amperometriche Yokogawa 96001, mentre la misura di corrente DC è

stata effettuata con una pinza Chauvin Arnoux PAC17. Le principali caratteristiche tecniche delle sonde utilizzate sono riportate nella Tabella 1.

Le pinze in AC sono state posizionate consecutivamente nei punti di misura A, B, e C per l'effettuazione delle tre campagne di monitoraggio, mentre la pinza in DC è rimasta sempre nello stesso punto di misura D durante tutti i tre monitoraggi. A titolo di esempio, nelle Figure 16 e 17 sono mostrate le pinze in AC e DC posizionate rispettivamente nei punti di misura A e D.

Tabella 1: Sonde di misura della corrente utilizzate e relative caratteristiche tecniche

Modello pinza amperometrica	Tipo di misura	Caratteristiche
Yokogawa 96001 AC Current Clamp	Corrente in AC	➤ Range di misura dinamico: 0 ÷ 400 Arms (AC); Max. 600 Apk (AC) ➤ Banda passante: 20 Hz to 20 kHz ($\pm 5\%$) ➤ Accuratezza: $\pm 1.0\%$ of rdg ± 0.2 mV ➤ Output di tensione: 10 mV/A
Chauvin Arnoux PAC17	Corrente in DC	Due range di misura settabili: ➤ 0,5 ÷ 40 A AC RMS / 0,5 ÷ 60 A DC o picco (output: 10 mV/A) ➤ 0,5 ÷ 400 A AC RMS / 0,5 ÷ 600 A DC o picco (output: 1 mV/A) ➤ Accuratezza: 1.5% ➤ Banda passante: DC .. 30 kHz (-3 dB)

I test sono stati eseguiti in stretta collaborazione con i colleghi di ENEA e le registrazioni sono state con loro condivise. Nello specifico si evidenziano alcuni dei risultati più rilevanti. In particolare, nella Figure 15 è riportata l'evoluzione della potenza attiva registrata sul quadro di alimentazione del sistema (punto A).

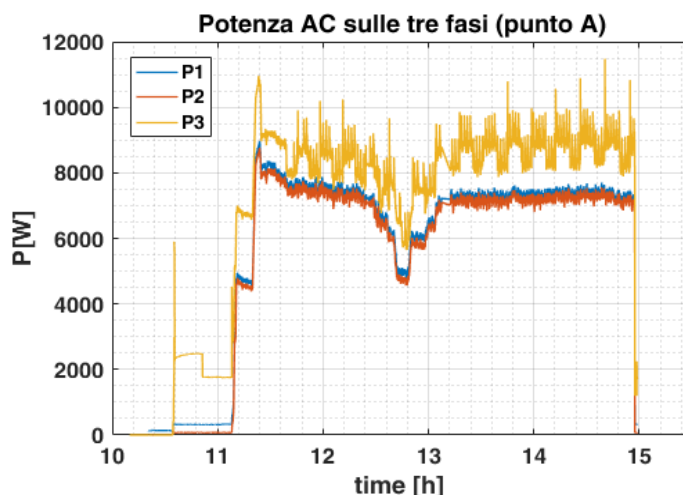


Figure 15: Evoluzione della potenza attiva sulle tre fasi rilevata nel punto A durante i test.

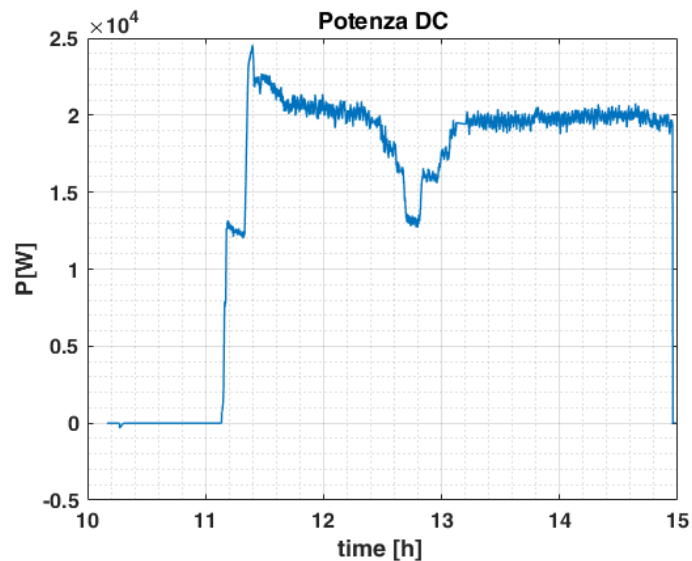


Figure 16: Evoluzione della potenza assorbita dall'elettrolizzatore in DC nel punto D.

Da questa si evince che la potenza fornita dalle fasi due e tre segue esattamente il profilo di potenza impostata per la regolazione dell'elettrolizzatore riportata in Figure 16; mentre la fase tre presenta un'evoluzione differente caratterizzata da una componente aggiuntiva rappresentata dagli ausiliari. Questo risultato è confermato anche dall'analisi degli schemi impiantistici che evidenziano la presenza di carichi ausiliari di tipo monofasico tutti collegati alla medesima fase. Da tale campagna è stato quindi possibile determinare l'entità e l'incidenza in potenza degli ausiliari sull'intero sistema. Questi richiedono una potenza media che è pari a circa 7,5% della potenza nominale richiesta da parte dell'elettrolizzatore.

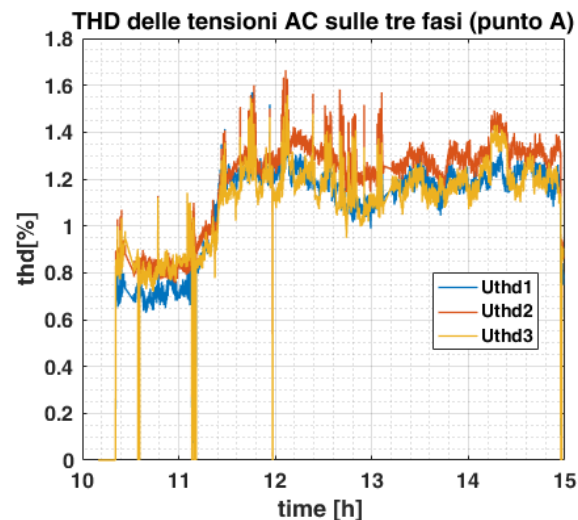


Figure 17: Evoluzione dei tassi di distorsione armonica della tensione di alimentazione (punto A).

L'analisi del THD delle tensioni di alimentazione nel punto di fornitura (Punto di misura A) durante tutta la fase di test, riportatato in Figure 17, evidenzia una buona qualità della fornitura. Infatti, il valore del THD della tensione non supera in nessuna condizione operativa il valore del 1,7%; valore ampiamente compatibile con le specifiche di qualità richieste alla fornitura di energia elettrica. D'altra parte, i valori registrati relativi ai THD delle correnti nel punto di fornitura risultano oltre i limiti indicati dalle normative internazionali di settore (IEC 60146-1-1 ed IEC 61000) relative alla "power quality". Esse fissano un tasso di distorsione armonica

massimo della corrente, valutato sulle prime 50 armoniche dispari, inferiore al 5%. Nel caso in esame si raggiungono valori riportati in Figure 18 compresi tra 15% e 25%.

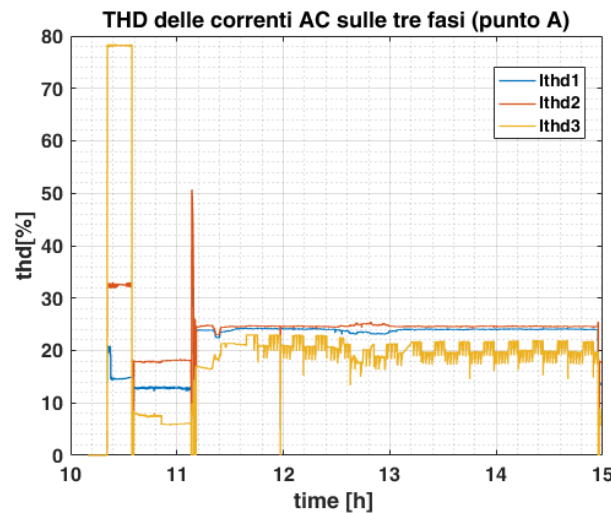


Figure 18: Evoluzione del tasso di distorsione armonica della corrente nel punto di alimentazione (punto A).

Tale risultato era atteso ed è imputabile al tipo di sistema di condizionamento utilizzato caratterizzato dall'utilizzo di un raddrizzatore SCR a sei impulsi. L'efficienza di conversione comprensiva anche degli effetti degli ausiliari è stata valutata durante l'intero processo di monitoraggio ed è riportata in Figure 19. L'efficienza elettrica di conversione complessiva si attesta intorno all'85% in condizioni di carico nominale. Considerati i risultati ottenuti dal monitoraggio dell'efficienza del dispositivo di conversione SCR, determinata considerando il rapporto tra la potenza di alimentazione dell'elettrolizzatore (punto di misura D) e la potenza in uscita dal trasformatore (punto di misura C) e riportati in Figure 20, si evidenzia che l'efficienza di conversione dell'SCR è del 96%, tipica di tali sistemi di condizionamento. L'analisi dell'evoluzione di efficienza durante i test di monitoraggio del punto B e del punto D in contemporanea ha consentito di evidenziare che l'efficienza del solo sistema di condizionamento comprensivo del trasformatore è pari al 93%. Pertanto, il trasformatore è responsabile di una perdita di efficienza di circa tre punti percentuali imputabile all'efficienza del trasformatore che seppur molto elevata (97%) determina tale effetto.

Durante lo svolgimento della campagna di misura sono state condotte anche delle acquisizioni delle correnti e delle tensioni attraverso oscilloscopio allo scopo di valutarne e caratterizzarne le loro evoluzioni con risoluzioni temporali molto più accurate. In particolare, si riportano quelle ritenute più indicative a rappresentare il comportamento del sistema di condizionamento ad evidenziarne le caratteristiche. In particolare, gli oscillogrammi riportati in Figure 21 e relativi ad una condizione di esercizio dell'elettrolizzatore al 50% evidenziano come le correnti di alimentazione in ingresso e in uscita dal trasformatore siano caratterizzate da una evoluzione che giustifica pienamente i THD di corrente registrati dall'analizzatore di rete. Risultati analoghi sono rilevati dal monitoraggio della tensione in uscita dal trafo. In particolare, la Figure 22 evidenzia l'effetto dell'induttanza di dispersione del trasformatore che genera degli spike sulla tensione di uscita del trasformatore e dei ritardi nella commutazione dell'SCR evidenziati nella Figure 23. Durante i test sono stati acquisiti anche i transitori di evoluzione delle grandezze tensione e corrente dell'elettrolizzatore allo scopo di definire le dinamiche del sistema di controllo che risultano essere dell'ordine di 1 A/s. Maggiori dettagli saranno riportati nelle pubblicazioni scientifiche programmate. L'evoluzione delle grandezze elettriche più

significative in condizioni di regime con una corrente assorbita dall'elettrolizzatore pari a 200 A è riportata in Figure 23.

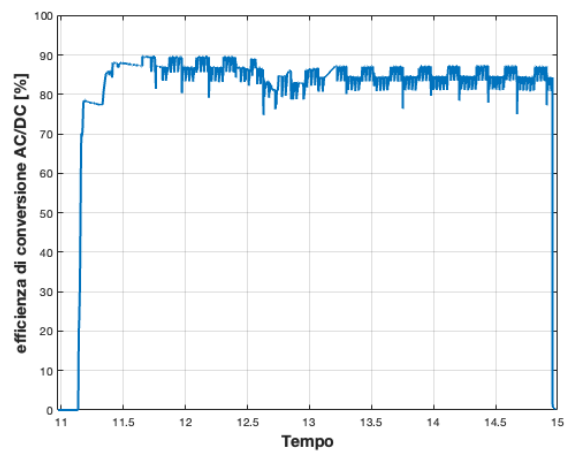


Figure 19: Evoluzione dell'efficienza di conversione elettrica.

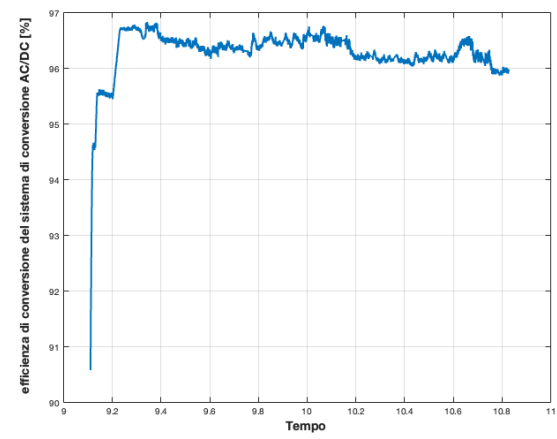


Figure 20: Evoluzione dell'efficienza del sistema di conversione AC/DC con raddrizzatore SCR a sei impulsi.

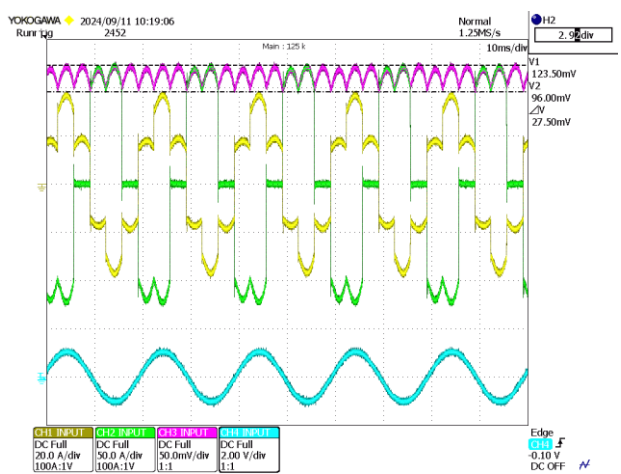


Figure 21: Evoluzione della tensione concatenata di alimentazione (tr. ciano) e delle correnti in ingresso al trafo (tr. gialla) in uscita dal trafo (tr. Verde) e della corrente in ingresso all'elettrolizzatore con una condizione di carico pari al 50% ($I_{dc}=110$ A)

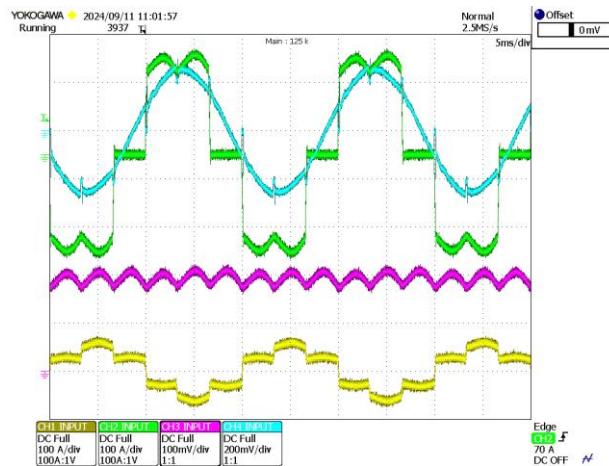


Figure 22: Evoluzione della tensione concatenata di uscita Trafo (tr. ciano) e delle correnti in ingresso al trafo (tr. gialla) in uscita dal trafo (tr. Verde) e della corrente in ingresso all'elettrolizzatore (tr. Magenta) con una condizione di carico pari al 81%.

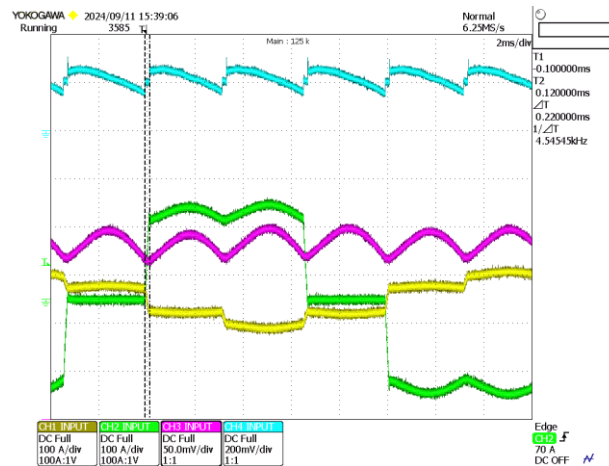


Figure 23: Evoluzione della tensione sull'uscita del raddrizzatore SCR (tr. Ciano) e delle corrispondenti correnti in ingresso al trafo (tr. gialla) in uscita dal trafo (tr. Verde) e della corrente in ingresso all'elettrolizzatore (tr. Magenta) con una condizione di carico caratterizzata da una corrente assorbita di 200 A.

Allo scopo di modellizzare il sistema di alimentazione dell'impianto PtG MENHIR ENEA è stata predisposta e sviluppata una simulazione in ambiente Plecs perfettamente coerente con la struttura impiantistica rilevata. I risultati delle simulazioni riportati dalla Figure 24 alla Figure 27 riproducono fedelmente quanto acquisito. Tale attività ha permesso inoltre di definire le caratteristiche voltamperometriche dell'elettrolizzatore utili per la successiva modellizzazione e valutazione preliminare della struttura di condizionamento proposta.

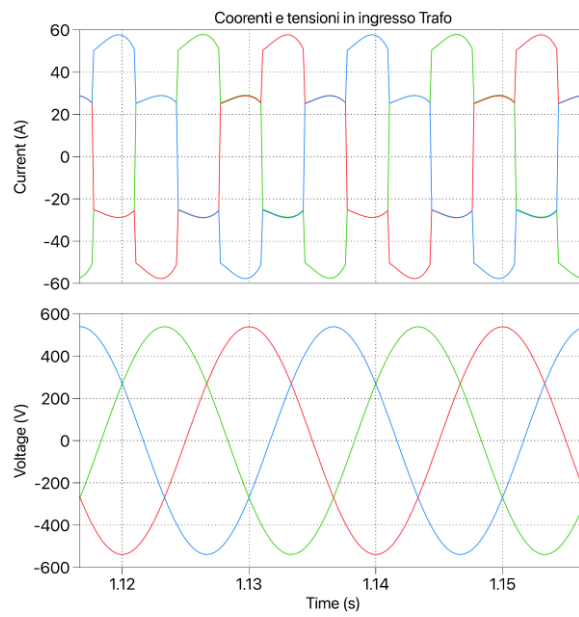


Figure 24: Evoluzione delle tensioni e correnti in ingresso al trafo (punto B di misura)

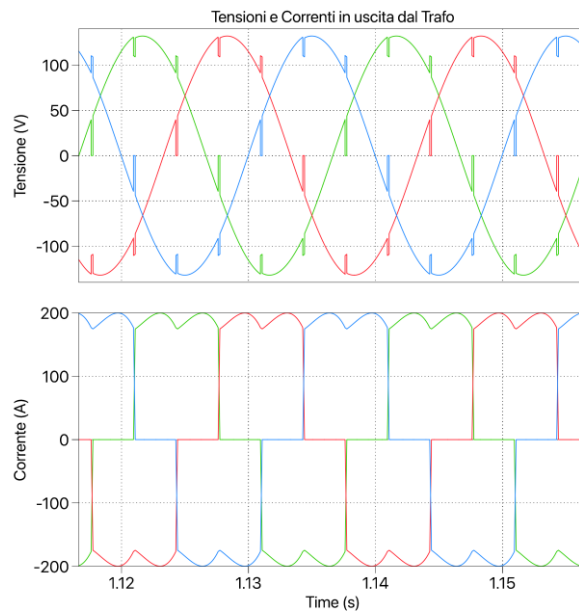


Figure 25: Evoluzione delle tensioni e correnti in uscita dal trafo (punto C di misura)

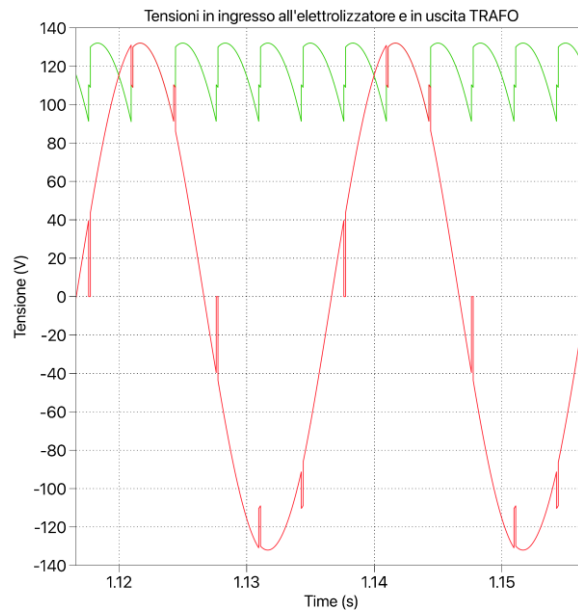


Figure 26: Evoluzione delle tensioni e in uscita dal trafo e in ingresso induttanza di filtro dell'elettrolizzatore (punto D di misura)

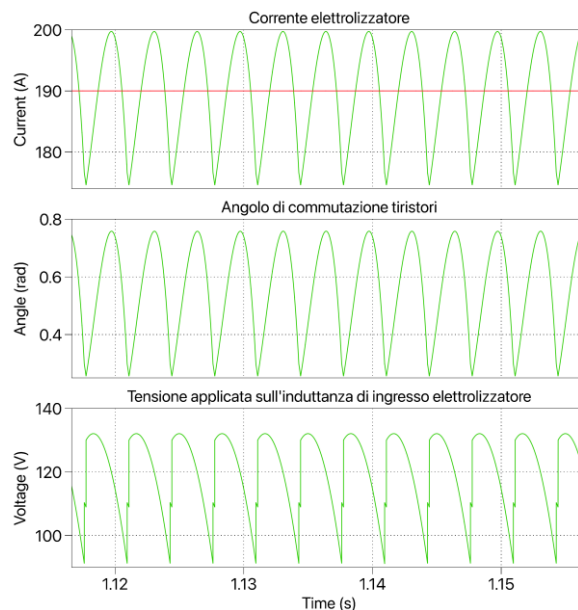


Figure 27: Evoluzione delle correnti e tensioni in ingresso elettrolizzatore (punto di misura D)

7.3 Modellizzazione della struttura di integrazione dell'impianto PtG MENHIR ENEA

Le attività svolte nell'ambito del progetto hanno permesso di sviluppare una modellizzazione completa del sistema proposto sia dal punto di vista hardware che software.

Nello specifico è stato sviluppato un codice in ambiente Plecs dedicato alla modellizzazione dei sistemi elettrici ed elettronici presenti nel sistema comprensivi anche dell'elettrolizzatore. La struttura di controllo è stata sviluppata in ambiente Matlab. Grazie alla compatibilità esistente tra i due ambienti, è stata realizzato un modello di co-simulazione del sistema proposto che rappresenta una immagine molto accurata di quello che sarà il sistema fisico.

Tale strumento ha permesso di valutare la fattibilità del sistema proposto sia dal punto di vista hardware che dal punto di vista software. La struttura sulla quale si è concentrata l'attività è quella riportata in Figure 28.

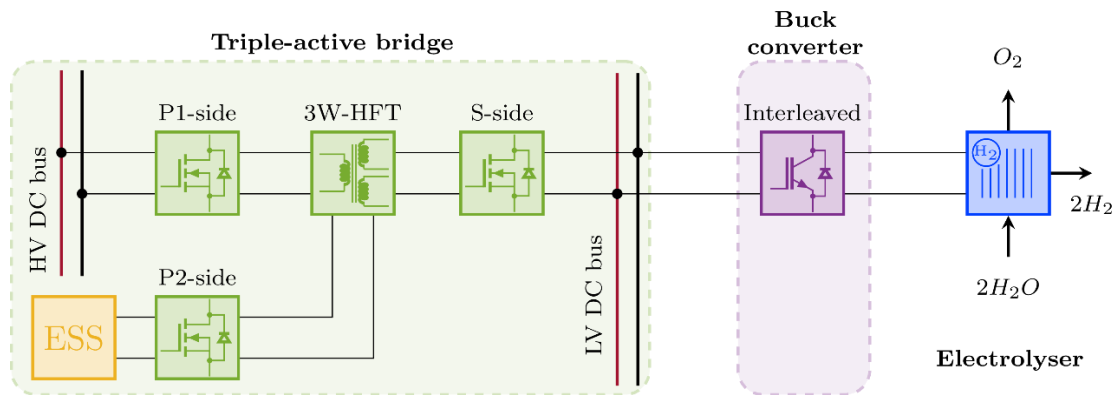


Figure 28: Schema a blocchi del sistema di generazione dell'idrogeno verde

Essa è costituita da un TAB intrinsecamente disaccoppiato collegato ad un sistema DC a più alta tensione connesso all'impianto fotovoltaico, un impianto di accumulo elettrochimico ed infine un sistema in bassa tensione connesso all'elettrolizzatore. Il modello è stato sviluppato riferendosi alle tensioni di esercizio dei trasformati ad alta frequenza modellizzati e caratterizzati. Per lo sviluppo del primo stadio di progettazione del sistema si è scelto di imporre alla porta di alta tensione il valore di 400V, conseguentemente le porte connesse al sistema di accumulo e al sistema di bassa tensione, destinato ad alimentare l'elettrolizzatore, assumono valori nominali di tensione definiti dai rispettivi rapporti di trasformazione e pari a 200 V e 100 V. L'elettrolizzatore alcalino è stato modellizzato in accordo con i dati di letteratura riferendosi ad una potenza nominale di 3,5 kW. In tali condizioni l'elettrolizzatore richiede una corrente di alimentazione di 160 A e una tensione di esercizio di 22 V. Allo scopo di garantire un'elevata efficienza di conversione e di rispettare i vincoli di potenza richiesti e di corrente massima i ponti ad H, connessi a ciascuna porta, sono stati dimensionati riferendosi alle correnti di picco determinate dalle simulazioni in ciascuna porta di ingresso nelle condizioni di esercizio nominali. A tale scopo sono stati selezionati mos-fet in carburo di silicio. Per evitare di sovradimensionare gli stati di conversine del TAB l'uscita s-side è connessa ad uno stadio di conversione buck di tipo interleaved. Tale stadio permette un condizionamento della tensione di uscita dal TAB e una suddivisione della corrente su diversi ponti costituenti lo stadio interleaved. Nello specifico lo stadio è costituito da 4 convertitori connessi in parallelo. Pertanto, il dimensionamento dei componenti è stato effettuato su un quarto della corrente nominale di alimentazione dell'elettrolizzatore.

Per il corretto esercizio del sistema di condizionamento è stato sintetizzato il sistema di controllo. In particolare, il TAB è controllato in tensione attraverso dei regolatori PI i cui parametri sono stati definiti in accordo con la teoria lineare in quanto il campo di esercizio del TAB è stato definito in maniera tale da rispettare sia le condizioni di linearità del legame potenza sfasamento che quello di disaccoppiamento intrinseco precedentemente descritte. I regolatori sono stati sintetizzati in maniera tale da assicurare una banda passante dell'anello di tensione di 80 Hz e un margine di fase di 80°. Il convertitore buck interleaved dedicato al controllo della corrente di alimentazione dell'elettrolizzatore è stato realizzato attraverso 4 regolatori PI (uno per ciascuno dei Buck del sistema). I parametri del regolatore sono stati

sintetizzati per realizzare una banda passante di 80 Hz e un margine di fase di 75°. Un controllore di alto livello definisce i set-point di tensione allo scopo di definire i valori di potenza erogati da ciascuna delle porte connesse all'impianto fotovoltaico e alla batteria.

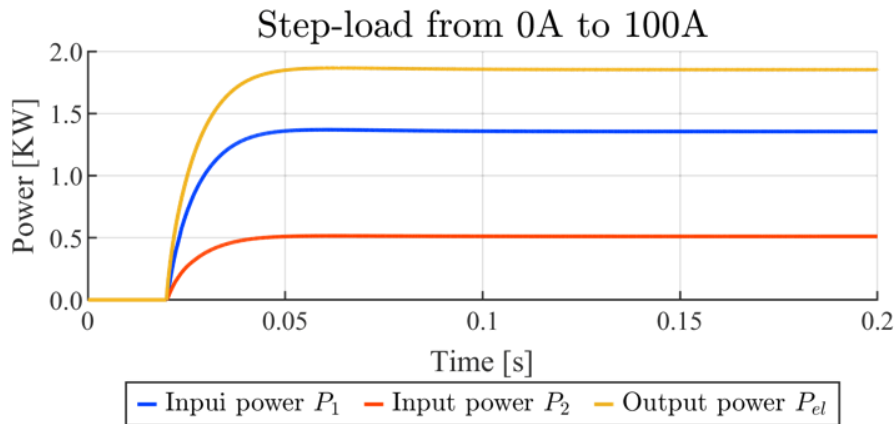


Figure 29: Evoluzione transitoria della potenza sulle tre porte durante il passaggio della corrente nell'elettrolizzatore da 0 a 100 A.

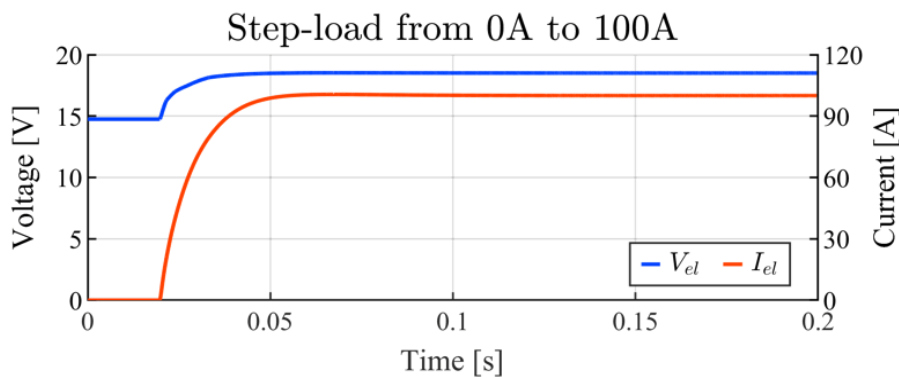


Figure 30: Evoluzione transitoria della tensione e corrente nell'elettrolizzatore durante la variazione di corrente da 0 a 100 A.

L'intero sistema è stato simulato e di seguito si riportano i risultati ottenuti. Nella Figure 29 è riportata l'evoluzione delle potenze durante un transitorio di avvio dell'elettrolizzatore da 0 a 100 A. Il controllo di potenza del TAB distribuisce, come atteso le potenze sulle due porte connesse all'impianto fotovoltaico e alla batteria in modo tale da bilanciare la richiesta di potenza dell'elettrolizzatore. In Figure 30 è riportata l'evoluzione durante il transitorio della corrente e della tensione sull'elettrolizzatore e in Figure 31 è riportata la tensione e corrente sullo stadio di uscita del TAB alimentante l'elettrolizzatore che come atteso dopo un transitorio viene ricondotta al valore di regime pari a 100 V. Lo stesso test è stato condotto nel caso di passaggio della corrente dell'elettrolizzatore da 100 a 160 A. I risultati sono riportati nelle Figure da Figure 31 a Figure 34.

In conclusione, si è giunti alla definizione di uno strumento idoneo al dimensionamento sia del sistema hardware che software per l'alimentazione in DC dell'elettrolizzatore con efficienze di conversione attese superiori al 95%. Lo strumento consente il dimensionamento di ogni singolo componente e una verifica sia elettrica sia magnetica sia termica.

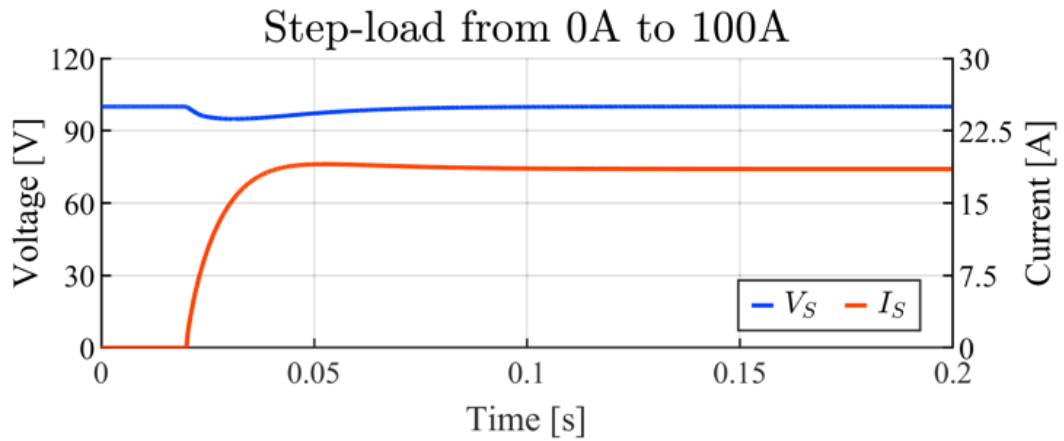


Figure 31: Evoluzione transitoria della tensione e corrente sull'uscita del TAB durante la variazione della corrente nell'elettrolizzatore da 0 a 100 A.

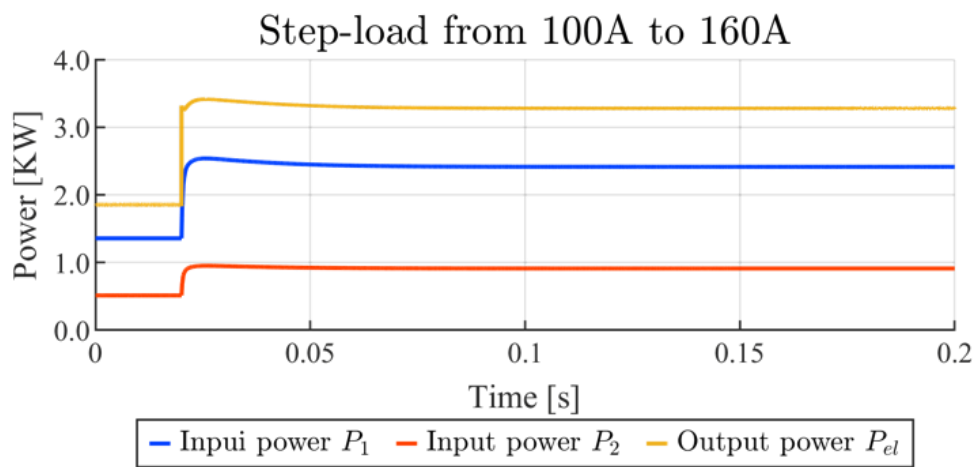


Figure 32: Evoluzione transitoria della potenza sulle tre porte durante il passaggio della corrente nell'elettrolizzatore da 100 a 160 A

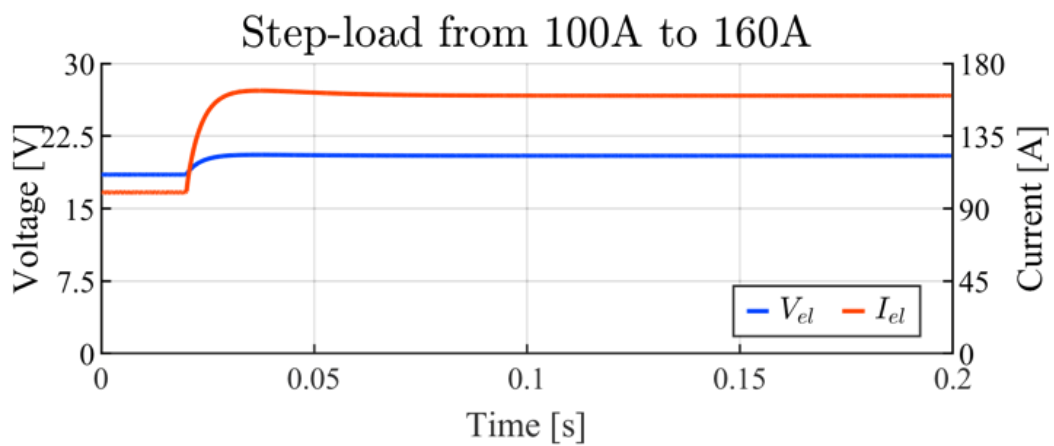


Figure 33: Evoluzione transitoria della tensione e corrente nell'elettrolizzatore durante la variazione di corrente da 100 a 160 A.

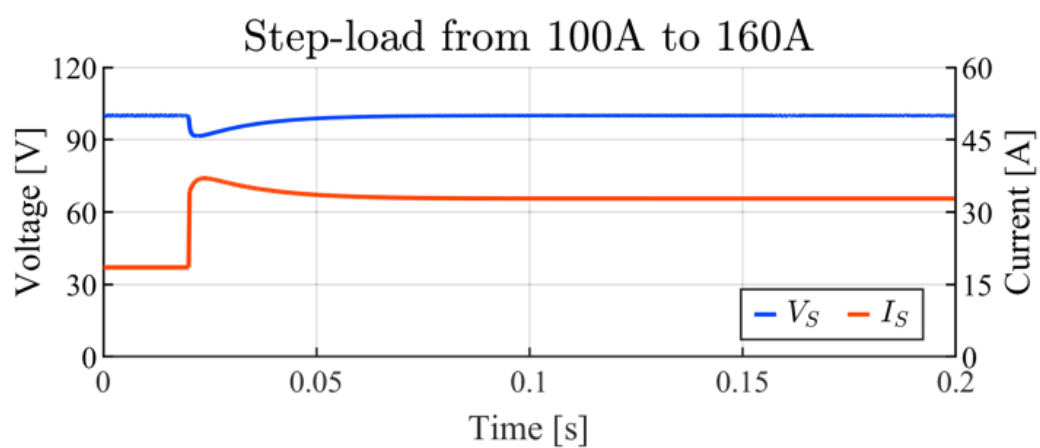


Figure 34: Evoluzione transitoria della tensione e corrente sull'uscita del TAB durante la variazione della corrente nell'elettrolizzatore da 100 a 160 A.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

È stato attivato con la Piattaforma Energie Rinnovabili di Sardegna Ricerche un contratto per il supporto allo svolgimento delle attività di caratterizzazione dell'elettrolizzatore PtG MENHIR ENEA comprensivo dell'utilizzo delle attrezzature a sua disposizione.

9 Pubblicazioni scientifiche

Da definire e concordare con i colleghi di ENEA coinvolti nel progetto.

10 Eventi di disseminazione

Le attività svolte sono state presentati agli eventi divulgativi organizzati da ENEA.

Sono stati programmati almeno due eventi di disseminazione dei risultati a conclusione del progetto.

- Evento di carattere pubblico divulgativo da realizzarsi presso l'Università degli Studi di Cagliari;
- Evento di carattere tecnico rivolto agli operatori di mercato da svolgersi presso La Piattaforma di Energie Rinnovabili di Sardegna Ricerche nella Z.I. di Cagliari sita in Macchiareddu.