



**Bando di gara per progetti di ricerca di cui all'art. 10, comma 2, lettera b) del decreto  
26 gennaio 2000, previsti dal Piano triennale 2019-2021 della Ricerca di sistema  
elettrico nazionale 1.2 Accumulo elettrochimico  
Decreto MISE 7 dicembre 2020**

**Virtual Storage per la Fast Reserve e servizi integrati di inerzia  
sintetica, peak shaving e load levelling**

**ViStoFaRe**

**Deliverable D3.1a**

**CSEAB\_00326**

	<p style="text-align: center;">Sigla CSEAB_00326</p>	<p style="text-align: center;">D3.1a</p>
---	--	--

## SOMMARIO

EXECUTIVE SUMMARY .....	3
1. INTRODUZIONE .....	3
1.1 STATO DELL'ARTE .....	6
1.2 SCHEMA CIRCUITALE DI MASSIMA DEL DISPOSITIVO STORINPLUS IN SCALA REALE .....	10
1.3 SPECIFICHE DI CONTROLLO MACCHINA, CONTROLLO BASE E CONTROLLO AVANZATO DEL DISPOSITIVO .....	14
1.4 SPECIFICHE DELL'INTERFACCIA DI COMUNICAZIONE .....	24

	<p style="text-align: center;">Sigla CSEAB_00326</p>	<p style="text-align: center;">D3.1a</p>
---	--	--

## EXECUTIVE SUMMARY

Il presente documento, deliverable del progetto ViStoFare, sintetizza i risultati delle attività condotte nell'ambito dell'attività LA3.1 ("Individuazione della configurazione circuitale ottimale del dispositivo StorInPlus") del Work Package 3 (WP3).

Obiettivo della attività LA3.1 è la definizione di una soluzione ottimale dal punto di vista tecnico/prestazionale ed economico del dispositivo StorInPlus in scala reale. Uno degli obiettivi sarà rendere il dispositivo modulare in termini di potenza, per garantire differenti soluzioni in funzione delle applicazioni. Dovranno essere analizzate e definite le configurazioni circuitali dei dispositivi di interfaccia tra sorgenti, sistemi di accumulo, carichi, rete elettrica: convertitori di potenza DC/DC, AC/DC e DC/AC, al fine di trovare soluzioni efficienti che garantiscano il rispetto delle normative vigenti in materia di compatibilità elettromagnetica, nonché adeguati livelli sicurezza elettrica.

Pertanto, è possibile individuare quattro punti su cui si è focalizzata l'attività:

- 1) Analisi dello stato dell'arte degli inverter e dei suoi principali componenti per applicazione di integrazione di SdA;
- 2) Definizione dello schema circuitale di massima del dispositivo StorInPlus in scala reale;
- 3) Definizione delle specifiche di controllo macchina, controllo base e controllo avanzato del dispositivo;
- 4) Definizione delle specifiche dell'interfaccia di comunicazione.

## 1. INTRODUZIONE

Lo scopo delle attività è stato la definizione di una soluzione ottimale dal punto di vista tecnico/prestazionale ed economico del dispositivo StorInPlus in scala reale.

Sono state studiate diverse soluzioni circuitale, in modo tale da rendere il dispositivo StorInPlus scalabile e modulare in termini di potenza, quindi permetterne l'utilizzo in diverse soluzioni ed applicazioni, anche di diversa potenza.

Sono state proposte diverse configurazioni circuitali, che possono prevedere l'interfaccia con la rete elettrica, l'interfaccia con sistemi di generazione (prediligendo quelli da fonti rinnovabili), l'interfaccia con sistemi di accumulo, l'interfaccia con carichi elettrici, mediante utilizzo di appositi e dedicati convertitori DC/DC e DC/AC, anche bidirezionali. L'obiettivo di queste attività è stato la ricerca di soluzioni efficienti che garantiscano il rispetto delle normative vigenti in termini di compatibilità elettromagnetica ed adeguati livelli di sicurezza elettrica.

	Sigla CSEAB_00326	D3.1a
---	----------------------	-------

Inoltre, sono state definite le specifiche del sistema di controllo (specifiche di controllo macchina, controllo base e controllo avanzato), tenendo in considerazione il rispetto dei requisiti dinamici e quanto sviluppato nella LA1.2, per l'erogazione dei servizi di inerzia sintetica, fast reserve e peak shaving/load leveling.

Sono state definite le possibili interfacce di comunicazione ed i protocolli per l'interfacciamento del dispositivo StorInPlus con il gateway che comunica con la piattaforma ViSto.

Nella fase iniziale, l'attività si è orientata sullo studio dello stato dell'arte su:

- inverter per utilizzo con sistemi di accumulo;
- semiconduttori di potenza (IGBT), in modo da impiegare componenti ottimizzati sia dal punto di vista economico che tecnologico;
- sistemi di controllo.

Gli obiettivi di questi studi sono stati l'individuazione di componenti ottimizzati sia dal punto di vista economico che tecnologico; inoltre, la scelta dei componenti è importante al fine di progettare un dispositivo di StorInPlus affidabile. Infatti, qual ora il dispositivo dovesse poter essere commercializzato, è preferibile avere un dispositivo hardware adattabile ed utilizzabile in diverse configurazioni, mediante sole modifiche firmware, piuttosto che dover ricorrere a modifiche dell'hardware.

Nel dettaglio, nel corso delle attività sono stati condotti studi sullo stato dell'arte in materia di configurazioni e tecnologie di moduli di potenza impiegati per la realizzazione dei convertitori di potenza per l'interfacciamento di sistemi di accumulo e di generazione da fonti rinnovabili alla rete elettrica.

La maggior parte dei sistemi di generazione da fonti rinnovabili sono di tipo distribuito, non programmabili e connessi alla rete di distribuzione. L'introduzione della generazione distribuita causa diversi problemi, principalmente legati alle differenze funzionali e tecnologiche tra le unità di generazione distribuita ed i generatori convenzionali; i principali problemi da affrontare riguardano: la riduzione dell'inerzia del sistema elettrico, quindi il controllo della frequenza, il controllo della tensione ed il comportamento delle unità di generazione distribuita durante i guasti della rete.

Per garantire la sicurezza del sistema elettrico, anche in forte presenza delle fonti di energia non programmabili, i sistemi di accumulo hanno assunto un ruolo importante. Tra le tante applicazioni, l'accumulo permette di disaccoppiare temporalmente la produzione e il consumo di energia elettrica,

	Sigla CSEAB_00326	D3.1a
---	----------------------	-------

il loro impiego per la fornitura di servizi di rete (quali l'inerzia sintetica e la fast reserve), favorendo una maggiore penetrazione dei sistemi di generazione a fonte rinnovabile non programmabile.

La ricerca svolta ha permesso di fornire un quadro generale delle tecnologie di apparati di conversione maggiormente impiegati per la connessione alla rete elettrica di sistemi di generazione distribuita e dei sistemi di accumulo stessi.

Inoltre, sono state analizzate le varie tecnologie di dispositivi di potenza a semiconduttore (IGBT, MOSFET) per individuare quale sia la migliore da utilizzare per la realizzazione dei convertitori di potenza dello StorInPlus; sostanzialmente, le diverse tecnologie si differenziano in funzione delle potenze (tensioni e correnti) in gioco e della frequenza di commutazione del convertitore.

Infine, sono state analizzate le diverse tecnologie di sistemi di controllo che possono essere adottate per l'implementazione delle strategie sviluppate per la gestione dello StorInPlus. Le tecnologie migliori per lo sviluppo di prototipi sono i DSP affiancati da moduli FPGA, che garantiscono maggiore flessibilità e capacità di implementare agevolmente le strategie sviluppate, grazie all'ausilio di appositi software di programmazione. Tuttavia, se si vuole sviluppare un dispositivo che potrà essere successivamente anche commercializzato, la soluzione da preferire è l'impiego di microcontrollori con elevata capacità di calcolo (eventualmente dotati di sistemi multi-core o DSP integrati), opportune periferiche per l'acquisizione delle grandezze elettriche e la generazione di PWM, nonché periferiche per la comunicazione con l'esterno. Questa soluzione garantisce la possibilità di realizzare su una o più schede, opportunamente interconnesse tra loro, un sistema di controllo, isolamento (galvanico oppure ottico) e condizionamento delle grandezze elettriche da monitorare/controllare, che può essere facilmente scalato in termini di potenza e di funzionalità.

Pertanto, sulla base dello studio dello stato dell'arte e di quanto sviluppato nella LA1.2, è stato possibile definire uno schema circuitale di massima del dispositivo StorInPlus che dovrà essere realizzato in scala reale, le principali specifiche del controllo e delle interfacce di comunicazione.

## 1.1 STATO DELL'ARTE

Dallo studio dello stato dell'arte in materia di sistemi di conversione emergono diverse tipologie e configurazioni di convertitori per l'interfacciamento di sistemi di accumulo alla rete elettrica [1]. Una prima classificazione riguarda la connessione diretta sul DC link dei sistemi di accumulo, quindi l'interfacciamento alla rete mediante un convertitore DC/AC (Fig. 1), oppure il posizionamento di uno o più convertitori DC/DC tra l'inverter ed il/i sistemi di accumulo (Fig. 2). L'utilizzo di un convertitore DC/DC per l'interfacciamento del sistema di accumulo permette una gestione ottimale, soprattutto se si vuole connettere sul DC link diversi sistemi di accumulo o altre sorgenti. La soluzione con il sistema di accumulo connesso alla rete direttamente mediante convertitore DC/AC è da preferire se non si ha necessità di interfacciare sistemi di accumulo diversi e/o altre sorgenti.

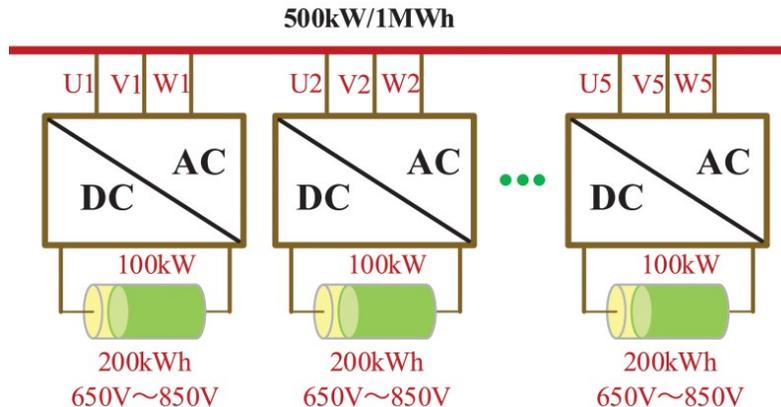


Fig. 1. Interfacciamento alla rete di sistemi di accumulo mediante il solo convertitore DC/AC.

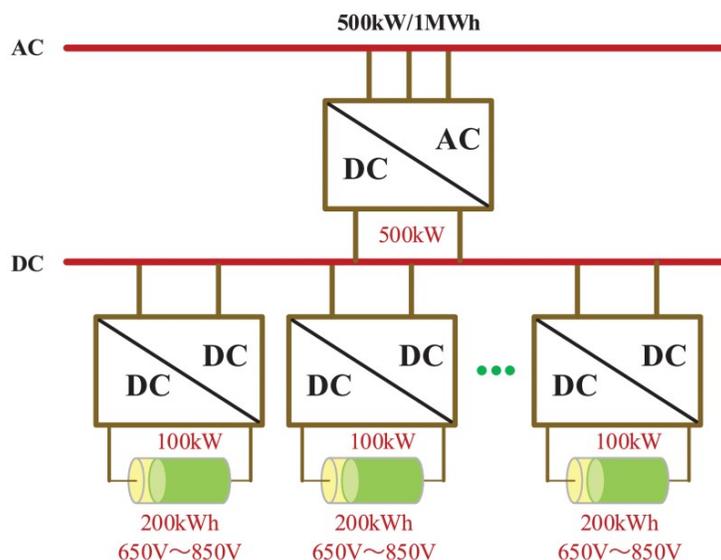


Fig. 2. Interfacciamento alla rete di sistemi di accumulo mediante il solo convertitore DC/AC che interfaccia diversi sistemi di accumulo con un convertitore DC/DC dedicato.

Un'altra classificazione dei sistemi di conversione si basa sulla presenza del trasformatore di isolamento in alternata oppure allo stato solido (integrato nel convertitore DC/DC che interfaccia il sistema di accumulo al DC link) [2].

Se i sistemi da interfacciare alla rete elettrica sono diversi (sistema di accumulo, sorgente da fonte rinnovabile, ecc) allora può risultare conveniente utilizzare un trasformatore di isolamento tra convertitore DC/AC e rete, invece che prevedere un trasformatore allo stato solido per ciascun sistema che si interfaccia al DC link mediante un proprio convertitore DC/DC (Fig. 3).

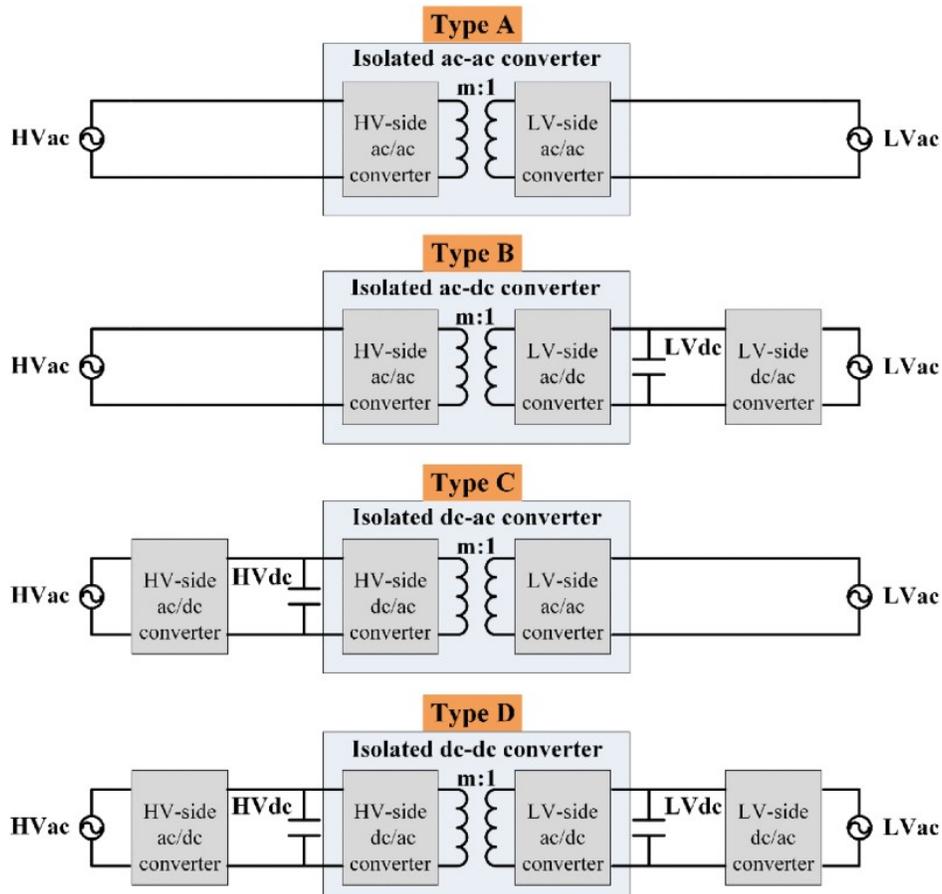


Fig. 3. Isolamento del sistema di accumulo o del convertitore DC/AC.

Le soluzioni tecnologiche per la realizzazione dei sistemi di conversione DC/DC e DC/AC dipendono principalmente dalle potenze in gioco e dalla frequenza di switching alla quale opera il dispositivo. Più aumentano le frequenze di switching più l'utilizzo della tecnologia IGBT è da evitare a favore della tecnologia MOSFET. Inoltre, c'è da tenere presente che, all'aumentare delle tensioni del DC link, gli IGBT sono da preferire ai MOSFET [3, 4].

Altre classificazioni di inverter sono riportate in letteratura in funzione della tipologia di applicazione e delle caratteristiche di uscita delle forme d'onda di tensioni e correnti, configurazione circuitale (half-bridge, full-bridge, multilivello). Gli inverter possono essere classificati in funzione di diverse caratteristiche, le principali di queste sono: la tipologia di connessione alla rete (monofase e trifase), modalità di funzionamento (stand-alone, grid-connected o entrambe), strategia di controllo (grid-feeding o supporting, grid-forming o grid-following) [5-7] (Fig. 4). In particolare quest'ultima classificazione è di notevole interesse per le finalità del progetto, infatti in funzione della particolare strategia di controllo adottata, sarà possibile fornire servizi di rete (come inerzia sintetica, fast-reserve, peak shaving e load levelling) in modo diverso (diversi controllori).

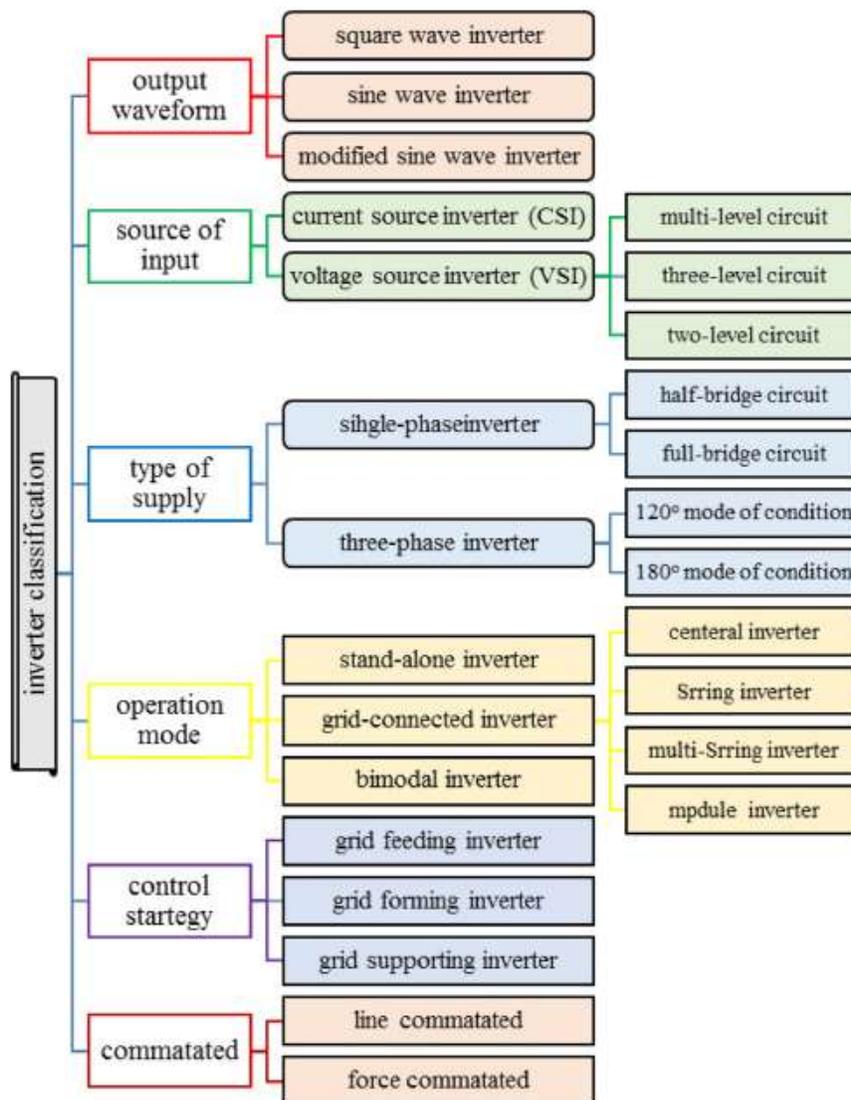


Fig. 4. Classificazione dei convertitori DC/AC.

	Sigla CSEAB_00326	D3.1a
---	----------------------	-------

I sistemi di controllo spesso utilizzati in letteratura sono sistemi di controllo basati su DSP o più spesso FPGA che sono molto più versatili per la realizzazione di prototipi di laboratorio. A livello di sistemi commerciali sono invece utilizzati sistemi a microcontrollore o DSP integrati per garantire una maggiore riduzione di spazi e la realizzazione di dispositivi general purpose, che risultano più facilmente integrabili e scalabili.

Le interfacce di comunicazione più comunemente utilizzate per la comunicazione con i sistemi di accumulo si basano su RS485, con protocolli seriali quali MODBus o CANBus.

[1] Liu, M., Cao, X., Cao, C., Wang, P., Wang, C., Pei, J., ... & Li, J. (2022). A review of power conversion systems and design schemes of high-capacity battery energy storage systems. *IEEE Access*, 10, 52030-52042.

[2] Farivar, G. G., Manalastas, W., Tafti, H. D., Ceballos, S., Sanchez-Ruiz, A., Lovell, E. C., ... & Pou, J. (2022). Grid-connected energy storage systems: State-of-the-art and emerging technologies. *Proceedings of the IEEE*.

[3] Liu, X., Zhao, T., Deng, H., Wang, P., Liu, J., & Blaabjerg, F. (2022). Microgrid energy management with energy storage systems: A review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*.

[4] Ahmad, M. W., & Raushan, R. (2022). Energy Storage System in Microgrid. *Smart Grids and Microgrids: Technology Evolution*, 27-58.

[5] Fani, B., Shahgholian, G., Alhelou, H. H., & Siano, P. (2022). Inverter-based islanded microgrid: A review on technologies and control. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 100068.

[6] Rouholamini, M., Wang, C., Nehrir, H., Hu, X., Hu, Z., Aki, H., ... & Strunz, K. (2022). A Review of Modeling, Management, and Applications of Grid Connected Li ion Battery Storage Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*.

[7] Song, G., Cao, B., & Chang, L. (2022). Review of grid-forming inverters in support of power system operation. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 8(1), 1-15.

## 1.2 SCHEMA CIRCUITALE DI MASSIMA DEL DISPOSITIVO STORINPLUS IN SCALA REALE

Al fine di garantire una maggiore versatilità del dispositivo StorInPlus e della sua configurazione, sono state sviluppate diverse possibili soluzioni, basate sul numero di sistemi di storage e/o sistemi di generazione presenti, da interfacciare alla rete elettrica.

La soluzione circuitale di base, scelta per lo StorInPlus, nel caso in cui si ha a disposizione un solo sistema di accumulo (o sorgente), potrà essere costituita da un solo convertitore, un DC/AC trifase per la connessione del sistema di accumulo alla rete elettrica (Fig.5).

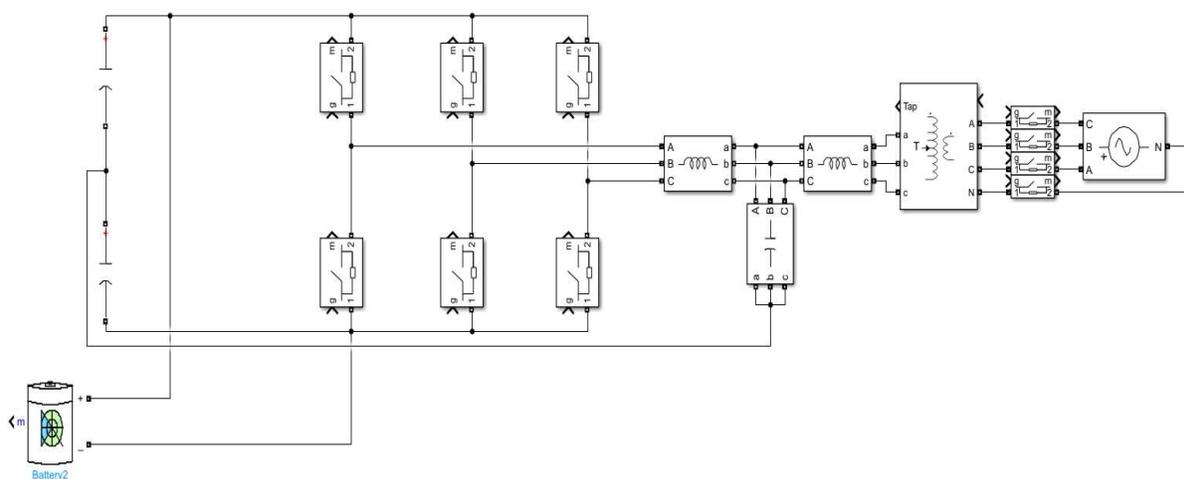


Fig. 5. Configurazione circuitale di base dello StorInPlus.

Una seconda soluzione di base, prevede l'introduzione di un convertitore dedicato per il sistema di accumulo (o sorgente), anche in questo caso si ha un solo sistema di accumulo da interfacciare alla rete elettrica (Fig. 6):

- Un convertitore DC/AC trifase per la connessione del sistema di accumulo alla rete elettrica
- Un convertitore DC/DC per l'interfaccia di un sistema di accumulo o di una fonte rinnovabile (come un impianto fotovoltaico).

La soluzione circuitale più articolata e completa dello StorInPlus (Fig. 7), si ha quando sono presenti più sistemi di accumulo e/o sorgenti, da interfacciare tra loro ed alla rete elettrica, in questo caso può prevedere, se necessario, i seguenti convertitori:

- Un convertitore DC/AC trifase per la connessione del dispositivo alla rete elettrica;

- Un convertitore DC/DC per l'interfaccia di un sistema di accumulo (o la connessione diretta del sistema di accumulo al DC bus);
- Un convertitore DC/DC per l'interfaccia di una fonte rinnovabile, come ad esempio un impianto fotovoltaico (o la connessione diretta dell'impianto al DC bus);
- Un convertitore DC/AC monofase di potenza ridotta, per eventuale alimentazione di carichi critici.

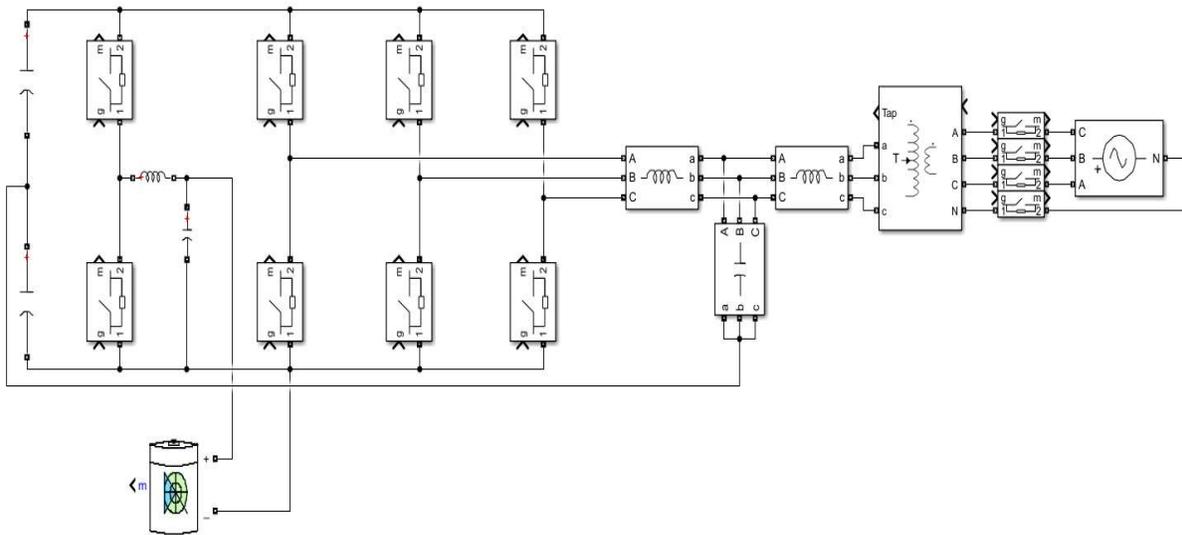


Fig. 6. Configurazione di base dello StorInPlus con sistema di accumulo dotato di convertitore DC/DC dedicato.

I convertitori di interfaccia con sorgenti e sistemi di accumulo possono essere provvisti di trasformatori di isolamento, mentre si rendono necessari per il convertitore DC/AC trifase e per il DC/AC che alimenta i carichi critici, al fine di garantire un adeguato livello di sicurezza elettrica.

I suddetti convertitori potranno essere configurati come di seguito descritto:

- DC/AC trifase: un ponte a MOSFET/IGBT trifase, con filtro LCL e trasformatore trifase;
- DC/DC per sistema di accumulo/sorgente: una gamba ad IGBT (half-bridge) e filtro LC;
- DC/AC per carichi critici: un half-bridge a MOSFET/IGBT, con filtro LC e trasformatore.

In tutte le configurazioni descritte, si può osservare che si è scelto di prevedere l'isolamento galvanico mediante trasformatore trifase (lato rete). Un altro trasformatore è utilizzato per isolamento galvanico

sul lato dell'inverter dedicato ai carichi critici (se presente), al fine di garantire livelli opportuni di sicurezza elettrica.

I sistemi di storage e/o le eventuali sorgenti presenti, sono invece collegate direttamente sul DC bus, oppure interfacciate al DC bus mediante opportuno convertitore DC/DC non isolato. Questa configurazione richiede che i livelli di tensione tra DC bus e sistemi di storage e generazione siano opportunamente selezionati per avere un rapporto non superiore a 3, al fine di ridurre le correnti in gioco.

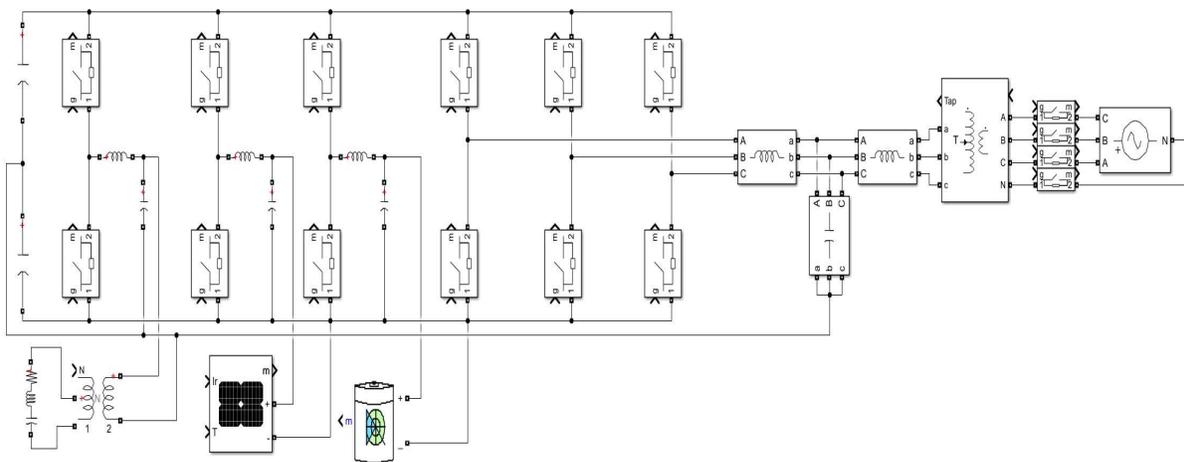


Fig. 7. Configurazione completa dello StorInPlus.

Inoltre, la soluzione con trasformatore di isolamento in AC permette, se necessario, di avere tensioni sul DC bus da 400V ad 800V, in funzione del rapporto di trasformazione scelto. Quindi una maggiore versatilità dello StorInPlus.

Per la realizzazione dei convertitori, considerando che le potenze in gioco oscillano tra i 15kW ed i 100kW, quindi si opta per frequenze di commutazione inferiori ai 20kHz, allora si è deciso di impiegare switch ad IGBT. Per potenze superiori ai 50kW, si opta in genere per dispositivi discreti (singoli IGBT o semi-ponti), mentre per potenze inferiori esistono soluzioni integrate, costituite da ponti trifase, fino a 6 semi-ponti, in un unico dispositivo. Esistono inoltre moduli con caratteristiche elettriche diverse (tensioni e correnti massime), che garantiscono allo StorInPlus la scalabilità in termini di potenza nominale. La scalabilità può essere garantita, entro opportuni limiti, solo variando le correnti nominali dei singoli convertitori; superati i limiti di corrente massimi, per aumentare la

	Sigla CSEAB_00326	D3.1a
---	----------------------	-------

potenza nominale dello StorInPlus si dovrà necessariamente passare dai moduli integrati ai componenti discreti ed eventualmente aumentare la tensione del DC bus.

Lo StorInPlus nella sua configurazione in bassa tensione potrà avere un DC bus a 400-450V, mentre nella configurazione ad alta tensione, si potrà arrivare ad 800-850V. Livelli di tensione elevati permettono di ridurre le correnti in gioco, quindi minori dimensioni dei conduttori, delle piste dei circuiti stampati e dei filtri, mentre necessitano di isolamenti maggiori per garantire livelli di sicurezza adeguati. Inoltre, con tensioni maggiori anche l'isolamento (galvanico o ottico) tra la parte di potenza ed il sistema di controllo dello StorInPlus richiederà maggiori accorgimenti nella fase di progettazione. Tuttavia, quando le potenze da gestire aumentano, la soluzione ad alta tensione è la scelta migliore.

Infine, per garantire lo sviluppo di un prototipo di laboratorio che possa successivamente evolvere in un prodotto commercializzabile, si prevede di realizzare separatamente la parte di elettronica di potenza (convertitori, filtri, driver) da quella di segnale (condizionamento delle misure, dei segnali di comando per i convertitori di potenza, comando dei contattori). Inoltre, per garantire la possibilità di utilizzare diversi sistemi a microcontrollore (anche in previsione di possibili 'phase out' dello stesso), è sempre meglio realizzare una apposita interfaccia tra la scheda di segnale e quella del microcontrollore, questo garantisce una maggiore intercambiabilità per il microcontrollore, senza dover andare a modificare le schede dello StorInPlus.

### 1.3 SPECIFICHE DI CONTROLLO MACCHINA, CONTROLLO BASE E CONTROLLO AVANZATO DEL DISPOSITIVO

Nel corso dell'attività sono state definite le specifiche relative alla gestione ed al controllo del dispositivo StorInPlus. Di seguito verranno spiegate le strategie utilizzate per governare al meglio il sistema e, in seguito, verranno descritti gli schemi di controllo utilizzati per i singoli convertitori connessi sul DC bus soffermandosi principalmente sulla strategia di controllo del convertitore di Rete. L'attività ha fornito come risultato ad una prima pubblicazione scientifica in fase di revisione<sup>1</sup>.

#### GESTIONE DEL SISTEMA

I nodi del sistema StorInPlus e la loro interazione e priorità sono gestiti mediante una classica strategia DC Bus Signaling (DBS). Grazie a questo sistema di gestione è possibile decentralizzare il controllo e by-passare i sistemi di comunicazione tra i nodi. Questo è perché l'unica informazione necessaria per definire i parametri di controllo di ogni singolo nodo è la tensione del DC bus ( $V_{bus}$ ).

Uno schema esemplificativo della DBS è riportato in Fig. 8.

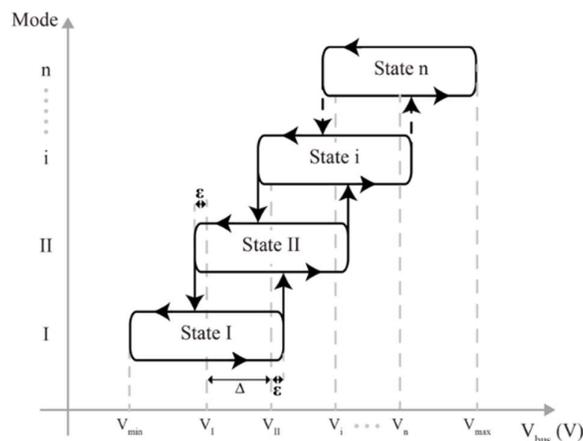


Fig. 8 – Schema DBS

<sup>1</sup> G. Brusco, D. Menniti, A. Pinnarelli, N. Sorrentino, J. C. Vasquez "Flexible and Advanced Dbs Control Strategy for a Dc-Nanogrid" Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4527913> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4527913> submitted Electric Power System Research (Elsevier) EPSR-D-23-02766.

	Sigla CSEAB_00326	D3.1a
---	----------------------	-------

Le transizioni di stato si basano sulla tensione del bus CC ( $V_{bus}$ ) e ogni modalità operativa o stato corrisponde a un livello specifico di  $V_{bus}$ , noto come  $V_{bus\_state}$  (Eq. 1). Per garantire un funzionamento regolare, esiste una variazione di tensione consentita ( $\Delta$ ) tra le modalità operative consecutive.

Il valore  $\Delta$  è scelto con cura per evitare cambi di stato impropri dovuti a errori di misura o a disturbi. Se  $\Delta$  è troppo piccolo, potrebbe portare a cambi di modalità errati, mentre un  $\Delta$  troppo grande potrebbe causare inefficienze o guasti ai nodi. È previsto anche un ciclo di isteresi ( $\epsilon$ ) per evitare inutili cambiamenti di stato.

$$V_{bus\_state\_i} = V_{bus\_ref\_node\_i} \pm \Delta \quad \text{Eq. 1}$$

Assieme alla DBS è implementata una macchina per la gestione degli stati del sistema. Tale sistema serve per scandire gli stati di funzionamento del sistema a partire dall'avviamento, con relativa scelta di priorità dei nodi da collegare, fino alla fase di funzionamento e di shutdown del sistema.

Un diagramma rappresentativo della macchina a stati è riportato in Fig .9.

Quando lo StorInPlus è avviato esegue un check sul livello di tensione del DC bus e se superiore ad un livello minimo, controlla che il DC bus sia inferiore al livello massimo, quindi se le verifiche sono positive, per un certo tempo, allora il dispositivo è operativo (stato di RUN). Altrimenti, se la verifica sulla tensione massima da esito negativo, allora il dispositivo è in errore e passa allo stato STOP.

Mentre, se da esito negativo la verifica sulla tensione minima, allora il dispositivo è avviato ma non in RUN; quindi, devono essere collegate le sorgenti (PV o fotovoltaico, ESS o sistema di storage, Grid o rete).

Per ciascuna sorgente vengono controllate le tensioni, per verificare che siano entro limiti ammissibili, se il controllo da esito positivo si connette la sorgente e si passa alla successiva, per passare in fine allo stato di RUN. Se una verifica da esito negativo, si fanno più tentativi, se la verifica è sempre negativa si passa alla sorgente successiva.

In presenza di errori o condizioni che pregiudicano il funzionamento in sicurezza dello StorInPlus, allora la macchina a stati fornisce un errore ed il dispositivo passa allo stato di STOP, ovvero una condizione in cui tutte le sorgenti sono disconnesse ed il dispositivo è progressivamente spento.

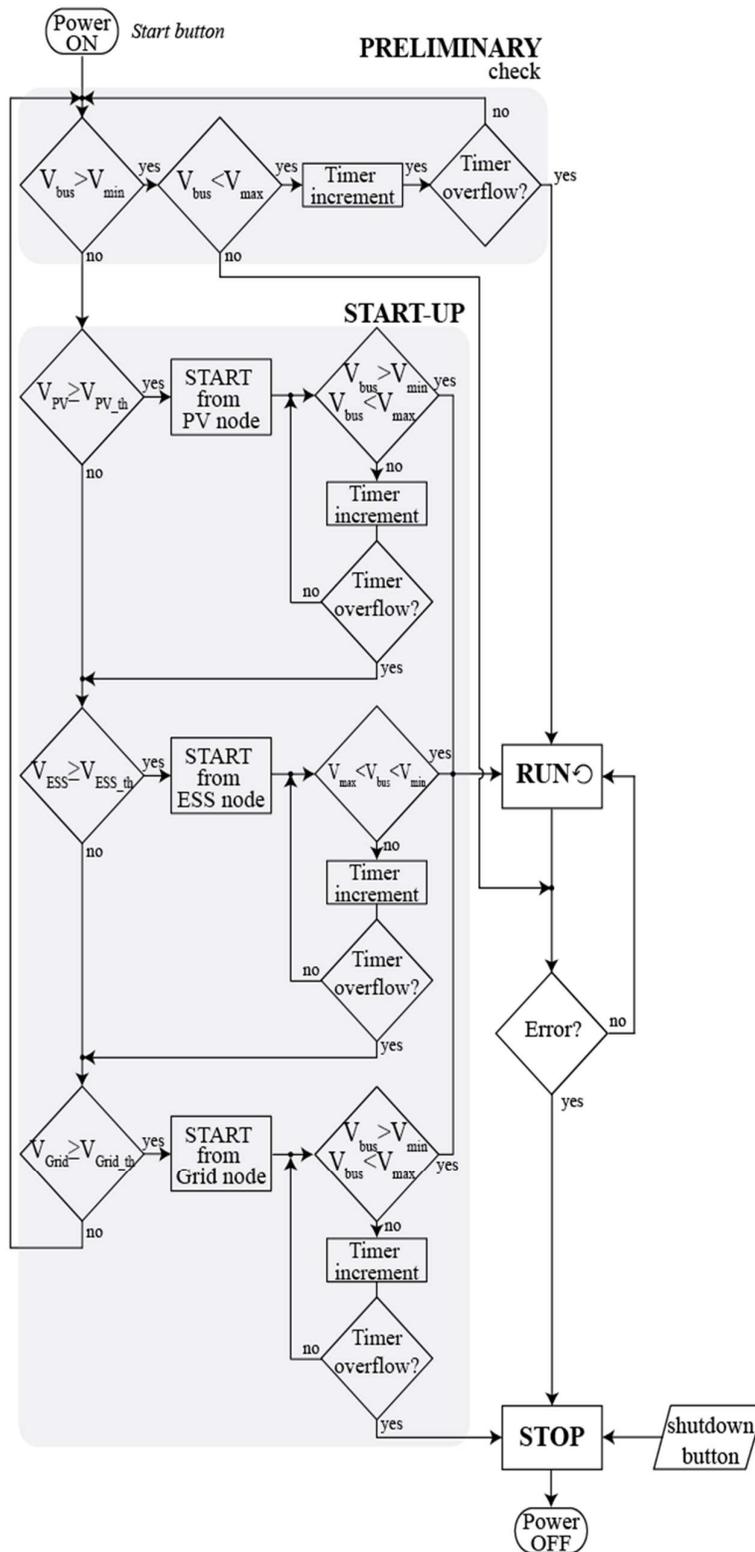


Fig. 9 – Macchina a stati dello StorInPlus.

CONTROLLO DEI CONVERTITORIConvertitore Accumulo

Il controllo del convertitore DC/DC per il sistema di accumulo, che permette la gestione dello stesso, sia in carica che in scarica, è riportato in Fig. 10. In funzione delle necessità e dell'andamento dei flussi di potenza all'interno dello StorInPlus, definiti mediante DBS e macchina a stati, il controllo definisce i segnali PWM che permettono al convertitore di prelevare energia dal sistema di accumulo o immagazzinarla.

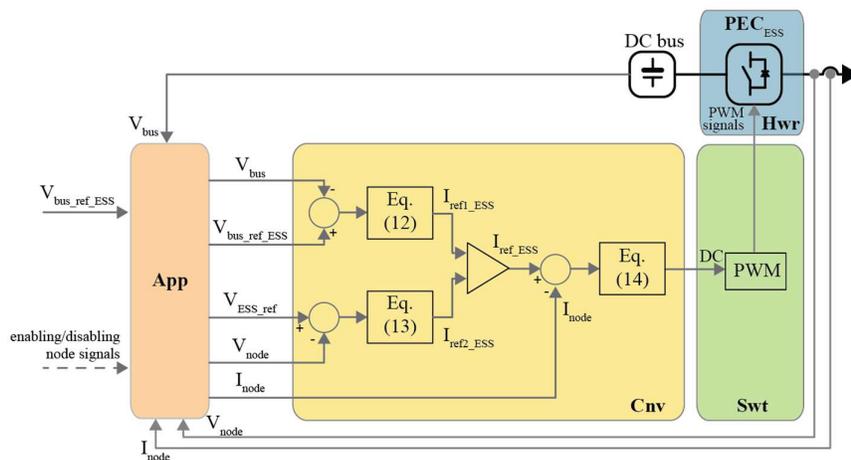


Fig. 10 – Controllo convertitore Accumulo.

Convertitore PV

Il controllo del convertitore DC/DC per la sorgente PV definisce la strategia di estrapolazione della massima potenza dall'impianto fotovoltaico, ed eventualmente il funzionamento a tensione costante se tale potenza non può essere utilizzata. Lo schema di controllo è riportato in Fig. 11. Una volta definita la modalità di funzionamento in base alle strategie di gestione sopra descritte, mediante il controllo vengono generati i segnali PWM con cui pilotare gli switch del convertitore per prelevare dall'impianto la potenza desiderata.

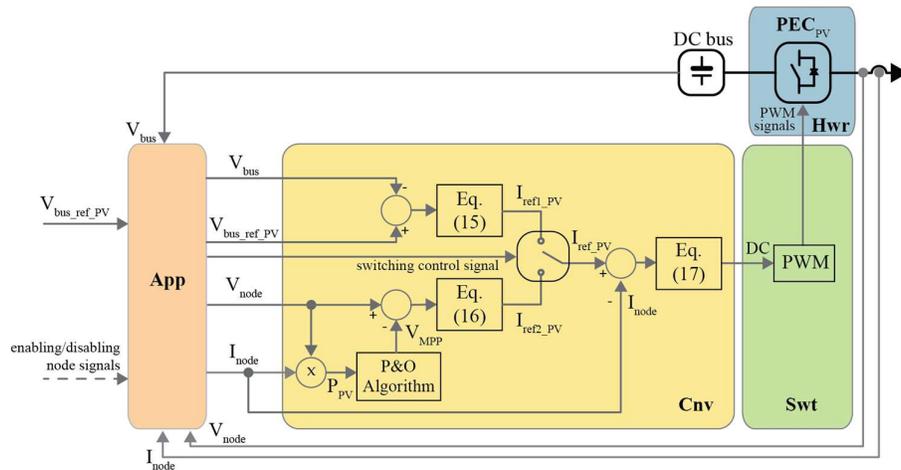


Fig. 11 – Controllo convertitore PV.

### Convertitore Rete

Il focus principale dell'attività è la definizione della strategia di controllo del convertitore di rete. È stata inizialmente definita, simulata e implementata una strategia base classica mediante la quale l'interfaccia trifase viene controllata seguendo dei setpoint di potenza attiva e reattiva. In seguito, tale strategia, è stata leggermente modificata per rendere il sistema in grado di fornire i servizi di stabilità richiesti. In ultimo, è stato effettuato un breve studio su una strategia alternativa a quella classica.

### Controllo Rete base

Il controllo base per il convertitore trifase DC/AC di interfaccia con la rete si basa sull'approccio classico che prevede la sincronizzazione con la rete e il conseguente lavoro in modalità grid-following. Una volta che il sistema è sincronizzato, in sintesi, vengono leggermente modificate fase e ampiezza della tensione generata rispetto a quella di rete per poter scambiare le potenze attiva e reattiva richieste.

Tutto ciò va però tradotto in termini di anelli di controllo. Il convertitore sarà gestito mediante un controllo basato sulla tradizionale scomposizione in componenti  $dq0$ . Mediante le trasformate di Clarke e Park si passa, infatti, dal sistema abc al sistema  $dq0$ , attraverso l'utilizzo delle coordinate  $\alpha\beta0$ .

In questo modo è possibile lavorare con grandezze non sinusoidali e suddividere l'anello di controllo sulle componenti  $d$  e  $q$ . Il convertitore è gestito, dunque, utilizzando lo schema in Fig. 12.

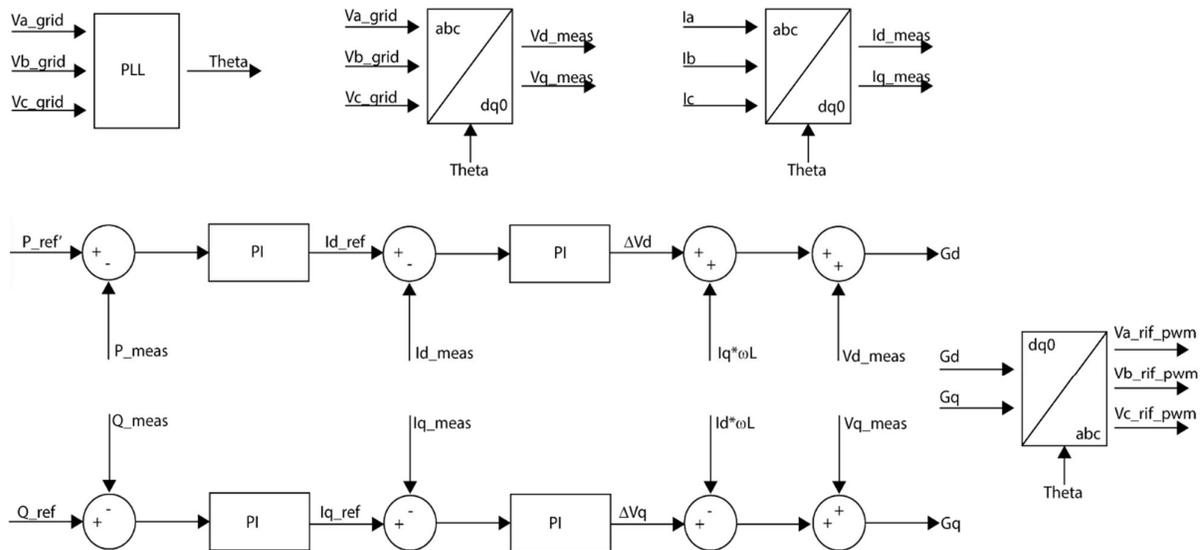


Fig. 12 – Controllo base del convertitore di Rete.

Come si può notare si tratta di due controlli in parallelo sulle componenti  $d$  e  $q$ . Entrambi sono formati da un doppio anello, quello esterno riferito al setpoint di potenza (attiva per la componente  $d$  e reattiva per la componente  $q$ ) ed un anello interno di corrente.

In uscita dall'anello di corrente si ottiene un valore che corrisponde alla variazione di tensione da dover imporre sulle due componenti per ottenere i riferimenti desiderati. Tale valore deve essere sommato alle tensioni dq0 misurate per ottenere  $G_d$  e  $G_q$ .

$G_d$  e  $G_q$  vengono, in ultimo, anti-trasformate (trasformata inversa di Clarke-Park) per ottenere i valori di  $V_{a\_rif\_PWM}$ ,  $V_{b\_rif\_PWM}$  e  $V_{c\_rif\_PWM}$  che servono per generare i segnali PWM che controllano i moduli del convertitore.

Va sottolineato che, in uscita al controllore PI di corrente è presente una sommatoria che funga da decoupling per garantire il disaccoppiamento delle due componenti sul valore dell'induttanza del filtro.



	Sigla CSEAB_00326	D3.1a
---	----------------------	-------

- Scegliere come la potenza debba variare in base alla variazione di frequenza.

A seguito di prime valutazioni su due possibili strategie di misura della frequenza (un circuito squadratore e un PLL digitale) i primi risultati sembrano indicare come più performante il PLL e dunque, al momento si è scelto di proseguire su quella strada.

Tale scelta è dovuta anche al fatto che il PLL, mediante l'integrazione di un PI digitale, permette anche una (all'apparenza) sufficientemente precisa misurazione della derivata della frequenza.

Entrambe queste scelte sono state coerentemente con l'attività dei partner, soprattutto l'Università di Genova.

La scelta della relazione tra frequenza e potenza attiva ha visto lo studio di due possibili soluzioni: drop semplice e drop sulla derivata.

Il primo è un approccio molto semplificato e non permette di rispondere con un comportamento effettivamente inerziale, bensì modifica il setpoint di P secondo una semplice caratteristica drop e, quindi, proporzionalmente alla variazione di frequenza. La semplice equazione è riportata in (Eq. 2)

$$\Delta P = K_{Drop} * (f_{ref} - f_{meas}) \quad \text{Eq. 2}$$

Il secondo approccio è più corretto in termini di definizione di inerzia in quanto considera effettivamente la derivata della frequenza. In questo modo si definisce essenzialmente il parametro  $K_{ROCOF}$  che altro non sarebbe che 2H nella modellazione classica delle macchine generatrici.

L'equazione che descrive questo approccio è riportata in Eq. 3.

$$\Delta P = K_{ROCOF} * \frac{df_{meas}}{dt} = K_{ROCOF} * ROCOF \quad \text{Eq. 3}$$

Tra le due è stato scelto, coerentemente con l'attività degli altri partner, di utilizzare la seconda strategia.

Il controllo avanzato permetterà, dunque, di definire i riferimenti di P e Q sulla base dei servizi di Inerzia Sintetica o Fast-Reserve che vengono richiesti oppure di inseguire i profili inviati dalla

piattaforma ViSto per i servizi di peak-shaving e load-leveling. La piattaforma trasmetterà i requisiti di servizio che verranno trasposti dal sistema di controllo avanzato locale implementato su ciascun dispositivo StorInPlus in opportuni profili operativi.

*Controllo Rete in modalità Grid-Forming*

Parallelamente al controllo avanzato è stato ipotizzato anche un ulteriore approccio per fornire supporto alla frequenza di rete. Questa seconda opzione, inoltre, garantisce la possibilità di lavorare anche in isola e non per forza connessi alla rete. In tal modo è possibile creare delle microreti all'interno delle quali la frequenza dipende dalla potenza scambiata. Si passa, dunque, dall'approccio Grid-Following a quello Grid-Forming.

Diverse tipologie di approccio Grid-Forming sono state proposte negli ultimi anni e ognuna ha delle caratteristiche che cercano di rendere il comportamento dell'inverter più o meno somigliante a quello di un generatore sincrono con l'obiettivo di riprodurre l'inerzia naturale del sistema.

Una delle più semplici tecniche proposte è quella del droop che lega la frequenza e la potenza scambiata. Questo approccio prevede quindi l'utilizzo di una caratteristica statica e non una vera e propria riproduzione dell'inerzia di una macchina rotante. Si è scelto di partire con questo sistema proprio perché è il più semplice per poi, in seguito, modificare la funzione che lega frequenza e potenza andando ad emulare sempre di più una macchina generatrice classica.

Lo schema che rappresenta questo primo approccio Grid-Forming scelto è riportato in Fig. 13.

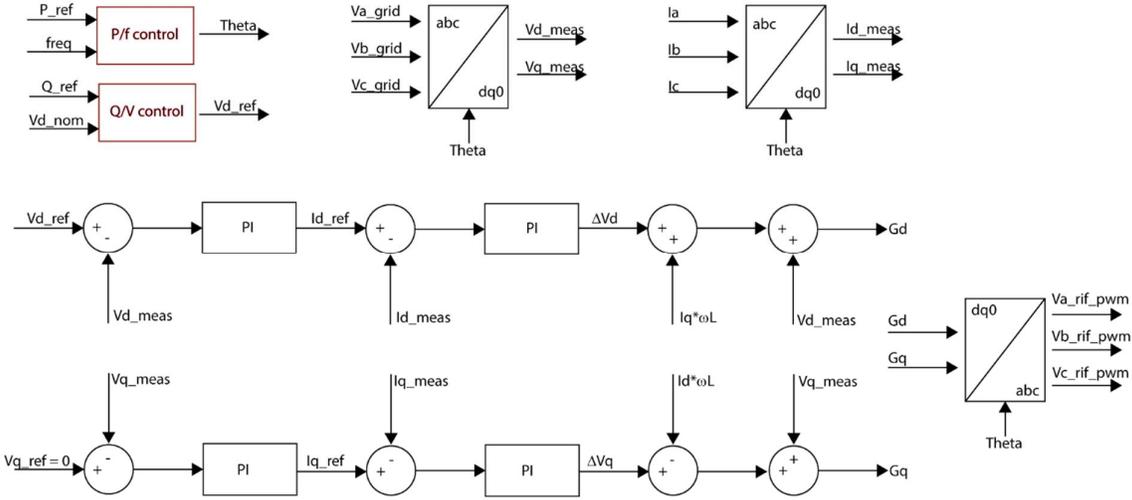


Fig. 13 – Controllo avanzato del convertitore di Rete con approccio Grid-Forming.

	Sigla CSEAB_00326	D3.1a
---	----------------------	-------

Si tratta, come detto, del più semplice tra le strategie classiche proposte. È possibile che tale strategia venga del tutto rivista più avanti nel progetto.

Questo schema prevede, similmente all'approccio Grid-Following, un doppio anello di controllo sulle componenti d e q. la differenza sostanziale sta nella natura del loop esterno di entrambi gli anelli che sono PI di tensione e non di potenza come in precedenza.

Il riferimento per l'anello d,  $V_{d\_ref}$ , è ottenuto tramite l'equazione droop che mette in relazione la potenza reattiva con l'ampiezza della tensione (Eq. 1), mentre il riferimento  $V_{q\_ref}$  è nullo.

$$\Delta V_{d\_ref} = K_{Drop\_Q} * (Q_{ref} - Q_{meas}) \quad \text{Eq. 1}$$

Il secondo anello di controllo sulla corrente è praticamente identico allo schema di controllo Grid-Following. Anche qui, in uscita dall'anello di corrente, otteniamo un valore che rappresenta la variazione di tensione da applicare alle due componenti al fine di raggiungere i riferimenti desiderati. Per ottenere  $Gd$  e  $Gq$ , è necessario sommare questo valore alle tensioni dq0 misurate. Successivamente,  $Gd$  e  $Gq$  vengono sottoposti a un processo di anti-trasformazione utilizzando la trasformata inversa di Clarke-Park. Questo passaggio ci fornisce i valori di  $V_{a/b/c\_rif\_PWM}$ , utilizzati per la generazione dei segnali PWM.

La frequenza viene indirettamente imposta mediante la trasformata e l'anti-trasformata di Clarke-Park per le quali si utilizza la theta ( $\Theta$ ) ottenuta integrando la  $\omega$  che risulta dall' Eq. 2, ovvero la relazione tra potenza attiva e frequenza.

$$\Delta \omega = K_{Drop\_P} * (P_{ref} - P_{meas}) \quad \text{Eq. 2}$$

Va sottolineato che alla base di questo approccio c'è il naturale disaccoppiamento tra P e Q che è valido solo in caso di rete fortemente induttiva. Inoltre, va ribadito che si tratta di un primo approccio al Grid-Forming e che, con ogni probabilità, esistono e saranno sviluppate tecniche più significative e articolate che permettono di emulare il comportamento dei classici sistemi di generazione dotando effettivamente l'inverter di inerzia sintetica.

	<p style="text-align: center;">Sigla CSEAB_00326</p>	<p style="text-align: center;">D3.1a</p>
---	--	--

## 1.4 SPECIFICHE DELL'INTERFACCIA DI COMUNICAZIONE

L'interfaccia di comunicazione dello StorInPlus rappresenta uno dei punti cruciali del progetto, in quanto è il punto di connessione tra il dispositivo e la piattaforma ViSto.

Negli ultimi anni i protocolli che si sono maggiormente diffusi in ambito industriale sono quello Ethernet, il Wi-Fi e quello fieldbus.

Il protocollo Ethernet è quello più sviluppato ed è usato per mettere in comunicazione un numero non elevato di nodi, nel corso degli anni sono nate molte varianti ma essenzialmente si tratta di un sistema di tecnologie necessarie per creare una Local Area Network, ovvero LAN.

Il Wi-Fi invece è una tecnologia che si sta evolvendo in modo sempre più rapido negli ultimi anni perché permette, differentemente dall'ethernet, di bypassare il mezzo fisico del cavo e quindi collegare più facilmente un numero più alto di nodi anche a distanze considerevoli. Le principali criticità di questa tecnologia sono affidabilità e rapidità, entrambe minori rispetto ad altre possibili soluzioni. L'avanzamento della tecnologia degli ultimi anni si è infatti concentrato sulla risoluzione di queste due criticità ed ha portato ad ottenere risultati eccellenti sotto entrambi i punti di vista.

Con il termine bus di campo (fieldbus) si indicano i protocolli standard di comunicazione seriale tra i diversi dispositivi (nodi) costituenti il sistema. La comunicazione tra i nodi è gestita in modo diverso tra i protocolli in funzione del tipo di bus di campo ed il modello ISO/OSI è il riferimento per la loro classificazione. La struttura dei fieldbus può variare in funzione soprattutto della tipologia di relazione tra i nodi, si possono incontrare bus che seguono il modello Master-Slave, Token Ring o Multimaster.

Tra i protocolli fieldbus, i più utilizzati sono il Modbus ed il CANbus. Sono entrambi protocolli seriali, che utilizzano segnali differenziali e garantiscono pertanto una certa sicurezza di integrità del messaggio ma si differenziano per alcune caratteristiche. A loro volta, il protocollo Modbus si suddivide in Modbus RTU e TCP, il CANbus in diversi altri protocolli da esso derivati.

Il Modbus è un protocollo seriale che definisce il formato e la modalità di comunicazione tra un "master" che gestisce il sistema ed uno o più "slave". Un limite del Modbus è che si possono connettere un master e fino a 247 slave sul bus. La lunghezza massima del bus è funzione della velocità di trasmissione (bit Rate) ma generalmente non supera i 1200m. Questa caratteristica è derivata direttamente dal tipo di comunicazione seriale scelta, ovvero RS-485 ed è in comune anche con il CANbus. Il formato dei messaggi Modbus è 8, N, 1, che vuol dire: 8 bit di dati, nessun controllo di parità e con 1 bit di stop. Il master gestisce la linea e può comunicare con un solo slave per volta

	<p style="text-align: center;">Sigla CSEAB_00326</p>	<p style="text-align: center;">D3.1a</p>
---	--	--

oppure, in modalità broadcast, con tutti gli slave contemporaneamente. Nell'identificativo del messaggio quindi verrà passato per prima cosa un bit di identificazione del nodo slave che andrà da 0 a 247, con 0 che indica il messaggio broadcast mentre i numeri da 1 a 247 sono gli indirizzi degli slave. Si tratta di una logica domanda risposta tra master e slave, il messaggio inviato dal master contiene un codice funzione che identifica quale informazione deve essere inviata dallo slave che riceve.

Tra i protocolli CANbus, uno dei più diffusi nel settore industriale è il CANOpen. Il CANOpen è un protocollo generato a partire dal CANbus (Controller Area Network), nato come protocollo di comunicazione seriale che si integrava con il controllo distribuito e garantiva un certo livello di sicurezza ed inizialmente fu studiato per consentire la comunicazione fra i dispositivi elettronici sugli autoveicoli. Il CANbus è un protocollo di comunicazione seriale che ha come peculiarità un'elevata capacità di resistere ai disturbi elettromagnetici e mantenere quindi integro il messaggio. Inoltre è caratterizzato anche dal plug-and-play, ovvero dalla possibilità di aggiungere (o eliminare) nodi senza intaccare il funzionamento della comunicazione. È un bus di tipo lineare e multi cast, che prevede la connessione di più organi comunicanti (i nodi). Per quanto riguarda le specifiche generiche del CAN esse ricadono nei primi due livelli del modello ISO/OSI ovvero physical layer e data link.

Nel protocollo CANbus tutti i nodi sono in grado di inviare e ricevere messaggi, si tratta quindi di una struttura di tipo Multimaster. I messaggi hanno una determinata struttura e contengono, oltre ai byte di dati, anche dei byte che permettono, tra le altre cose, di gestire le priorità sul bus (identifier), di codificare il messaggio (stuffing) e di effettuare il controllo di eventuali errori (CRC). Per questo motivo il CAN è un protocollo message-based, ogni nodo prima di inviare un eventuale messaggio verifica che il bus sia libero, dopodiché parte il messaggio e, se è presente un conflitto, esso viene risolto attraverso l'identificativo seguendo una regola di priorità.

Va sottolineato che, a prescindere dal tipo di protocollo, ogni nodo va messo in comunicazione col bus mediante un transceiver che ha il compito di adattare in termini di opportuni livelli di tensione la comunicazione tra il microcontrollore dello StorInPlus ed il bus stesso, in funzione del protocollo scelto.

Per quanto concerne lo StorInPlus, esso deve comunicare con la piattaforma ViSto mediante protocollo MQTT (con accesso ad internet), inviando e ricevendo i vari dati e parametri. Tuttavia, la soluzione più conveniente è che sia presente un apposito gateway che si interfaccia tra dispositivo StorInPlus e piattaforma ViSto. In questo modo il dispositivo StorInPlus potrà interfacciarsi verso

<b>ViStoFaRe</b>	Sigla CSEAB_00326	D3.1a
------------------	----------------------	-------

l'esterno con uno dei protocolli industriali standard e tramite questo, il gateway, farà da interfaccia verso la piattaforma ViSto utilizzando il protocollo MQTT.

In definitiva, la soluzione prospettata è che l'interfaccia di comunicazione tra il dispositivo StorInPlus e piattaforma ViSto sarà implementata su un dispositivo che si collegherà localmente allo StorInPlus, mediante un protocollo proprietario di tipo seriale (USB, RS232 o RS485, Modbus o CANbus) e comunicherà con la piattaforma mediante protocollo MQTT via internet, come schematizzato nella Fig. 14.

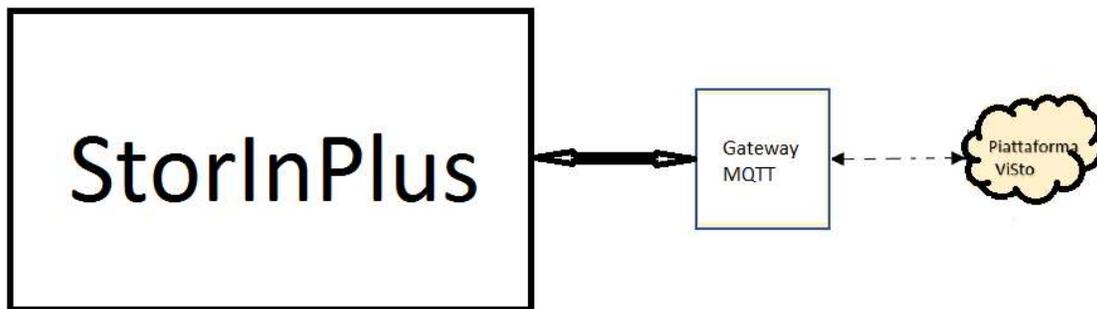


Fig. 14. Schema di comunicazione tra StorInPlus e Piattaforma ViSto.