

Dynamic Analysis of a Hybrid Energy Storage System (H-ESS) Coupled to a Photovoltaic (PV) Plant

Energies 2018, 11, 396; doi:10.3390/en11020396

***Linda Barelli ¹, Gianni Bidini ¹, Fabio Bonucci ², Luca Castellini ³, Simone Castellini ⁴,
Andrea Ottaviano ¹, Dario Pelosi ¹ and Alberto Zuccari ⁵***

¹ Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 1/A4, 06125 Perugia, Italy

² VGA Srl, Via dell'Innovazione SNC, 06053 Deruta, Italy;

³ Umbra Cuscinetti SpA, Via V. Baldicini 1, 06034 Foligno, Italy

⁴ ERA Electronic Systems Srl, Via G. Benucci 206, 06135 Perugia, Italy

⁵ QFP Srl, Via Gullotti 31, 06049 Spoleto, Italy

Introduzione al problema

Crescente diffusione di impianti basati su fonti energetiche rinnovabili (RES)

Produzione intermittente e fluttuante -> problematiche di sicurezza e stabilità di rete

Possibile soluzione?

Sistemi di energy storage (ESS: Energy storage system)

*Problematiche che
impediscono l'integrazione di
ESS classici con RES*



Economico/tecnologiche

In questo scenario per superare il problema unire in architetture ibride le caratteristiche positive di diversi sistemi di storage così da estendere il loro range applicativo

Obiettivo della ricerca

Analizzare le performance di un sistema ESS ibrido volano-batteria (H-ESS) integrato in una micro-rete con impianto di generazione da fotovoltaico, al fine di:

- 1. superare i limiti intrinseci** delle singole tecnologie ed estendere il range di funzionamento;
- 2. Sulla base dei profili di carica e scarica ottenuti, valutare gli effetti del dimensionamento e le caratteristiche tecniche dei singoli componenti sulle performance del sistema (durata e prestazioni energetiche).**

L'analisi è stata effettuata a diverse condizioni meteo e di carico caratterizzando l'impatto delle fluttuazioni di potenza sulla corrente della batteria e sulla potenza scambiata con la rete.

Modellazione dinamica Simulink

Fasi del lavoro

- ***Definizione della micro-grid:***
 - a) Caratterizzazione della **richiesta elettrica** tipica di una utenza **residenziale**;
 - b) Dimensionamento dei componenti della **micro-rete: volano, batteria e impianto fotovoltaico**
- ***Modellazione dinamica*** dei componenti della micro-rete
- ***Integrazione dei modelli e implementazione dell'algoritmo di controllo***
- ***Simulazioni e valutazione delle performance*** al variare della produzione dell'impianto fotovoltaico
- ***Analisi dell'impatto della variabilità della produzione*** da RES sulla batteria e sulla rete

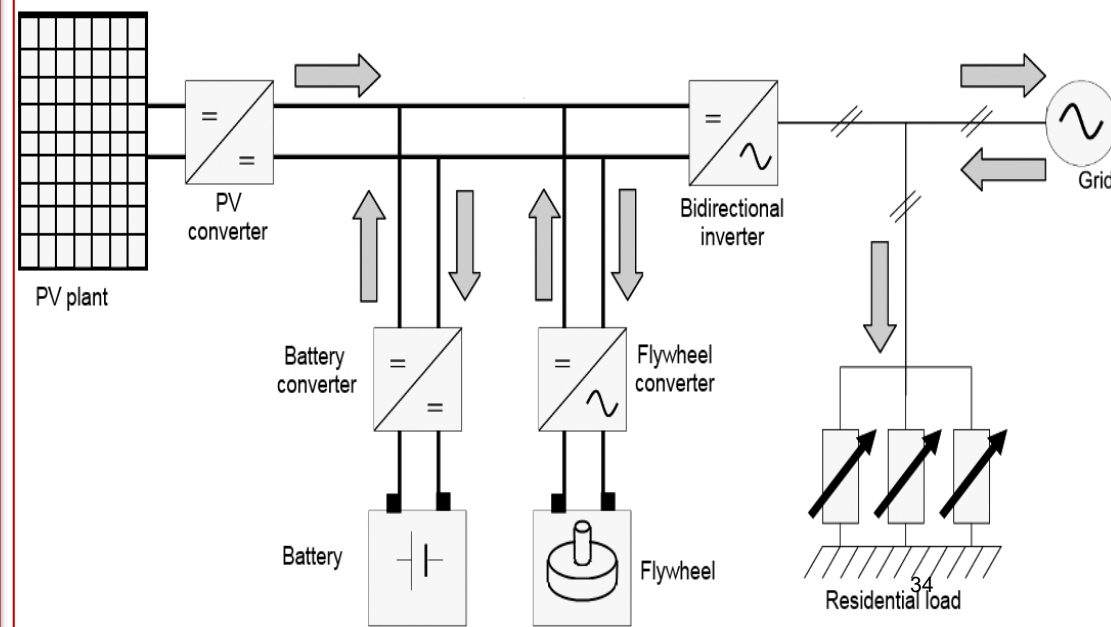
Micro-Grid Layout

Architettura analizzata -> 4 sezioni:

- **Produzione:** impianto fotovoltaico 11 kWp
- **H-ESS:**
 - **Pacco batterie:** 10 kWh (tecnologia LFP: litio ferro fosfato) -> sistema primario di storage
 - **Volano:** $W_{\max}$ 11 kW con una capacità di 2 kWh -> peak-shaving, fornisce o assorbe i picchi di potenza riducendo le fluttuazioni di potenza verso/da la batteria e la rete.
- **Richiesta energetica:** 3 utenze residenziali

Da studio preliminare , ottimizzato autoconsumo e vita batteria, rispetto al caso senza storage:

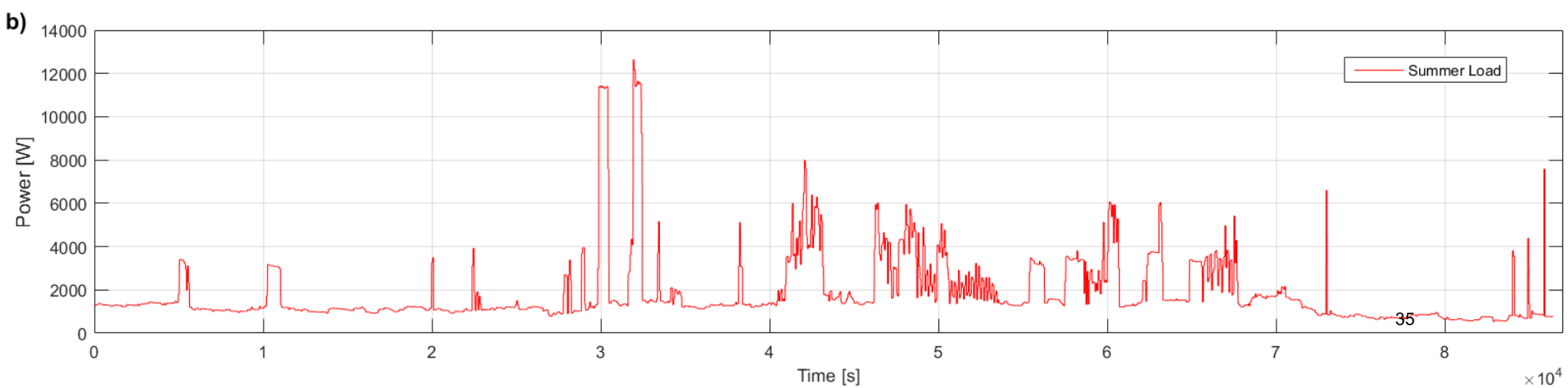
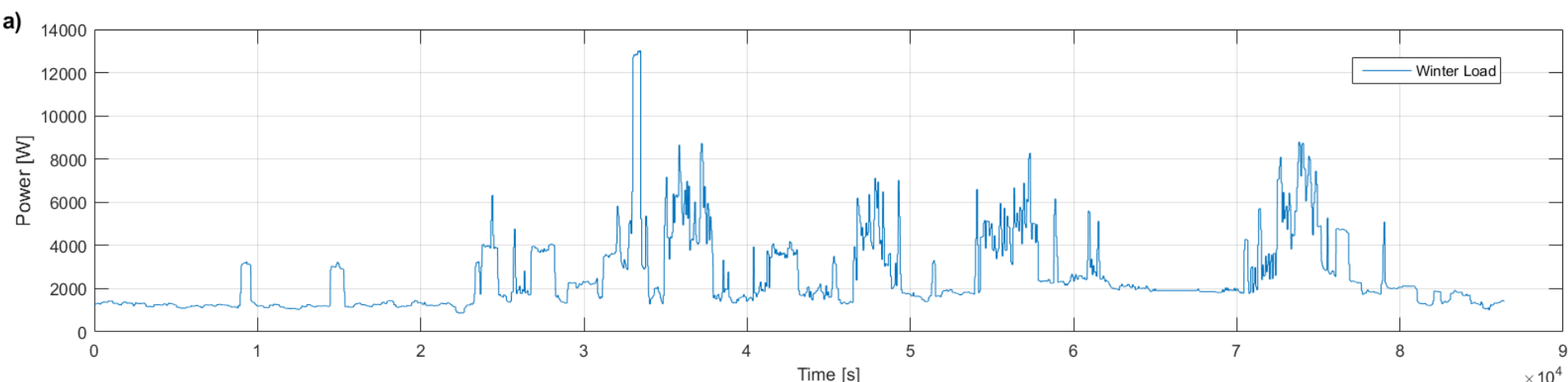
- 1) Rapporto autoconsumo/prodFV aumento del 15% (30->45%)
- 2) Rapporto prelievo da rete/richiesta carico diminuzione del 21% (54%->33%)
- 3) aumento vita batteria rispetto al caso di sola batteria con capacità equivalente di oltre 4 volte.



Analisi del profilo di carico

Il profilo di richiesta energetica utilizzato è basato su **dati sperimentali** ottenute da 20 case campionate in continuo per 2 anni con intervalli di 8 secondi

Nello studio è stato utilizzato un carico relativo a 3 utenze residenziali.



Modello Volano

Datasheet volano:

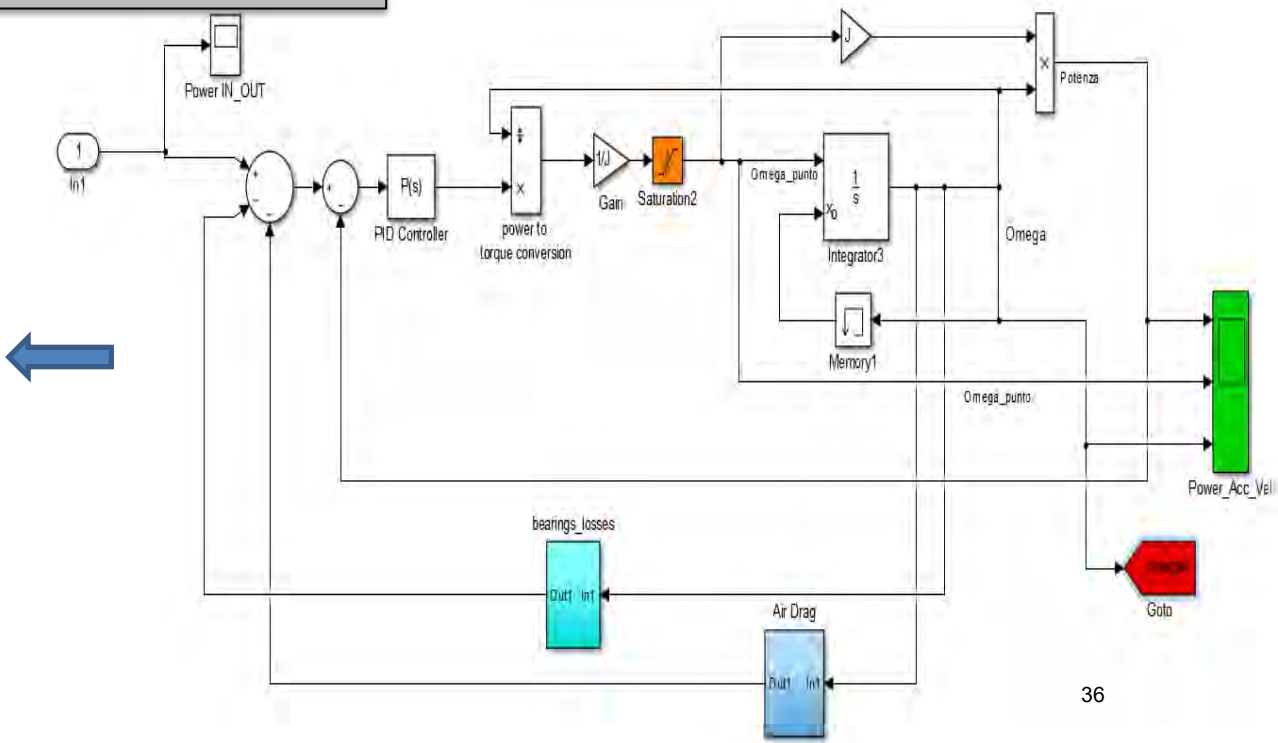
- Potenza massima: 11 kW
- Energia stoccabile: 2.1 kWh
- Velocità rotazione: max 10800, min 3000
- Raggio: 0.4 m
- Altezza : 0.08 m
- Peso: 160 kg
- Materiale: acciaio

$$P = T \omega$$
$$T = J \dot{\omega} + T_d + T_b$$

Td: Perdite Aerodinamiche
Tb: Perdite Attrito

Output

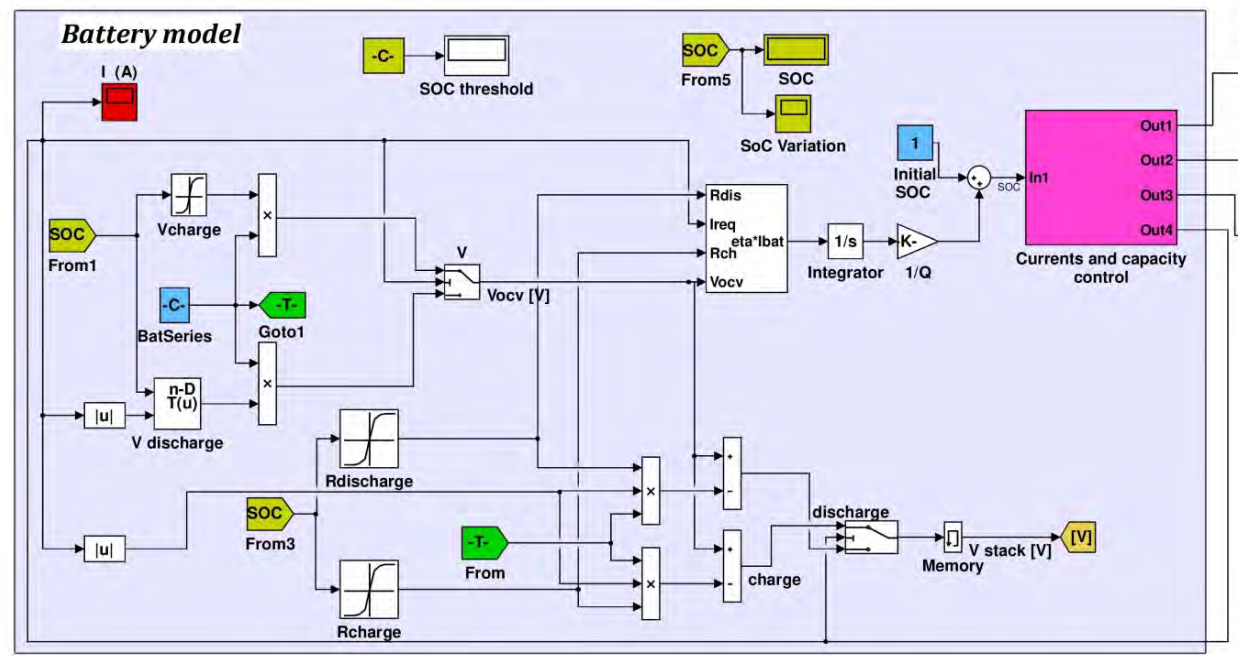
- Potenza scambiata
- Accelerazione
- Rpm (stato di carica)



Modello batteria

LFP (Lithium iron phosphate)
Capacità modulo: 79.4 Ah
Tensione nominale modulo: 29 V
Moduli in serie: 5 -> 10 kWh

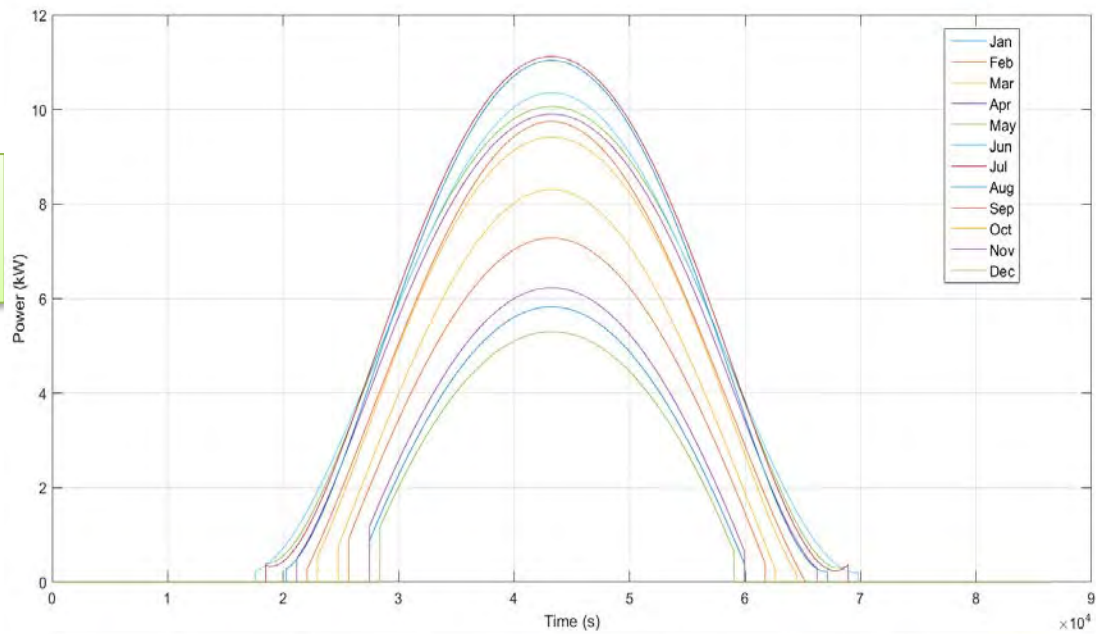
Dati sperimentali f(SOC)
 V_{charge} , $V_{discharge}$, R_{charge} , $R_{discharge}$



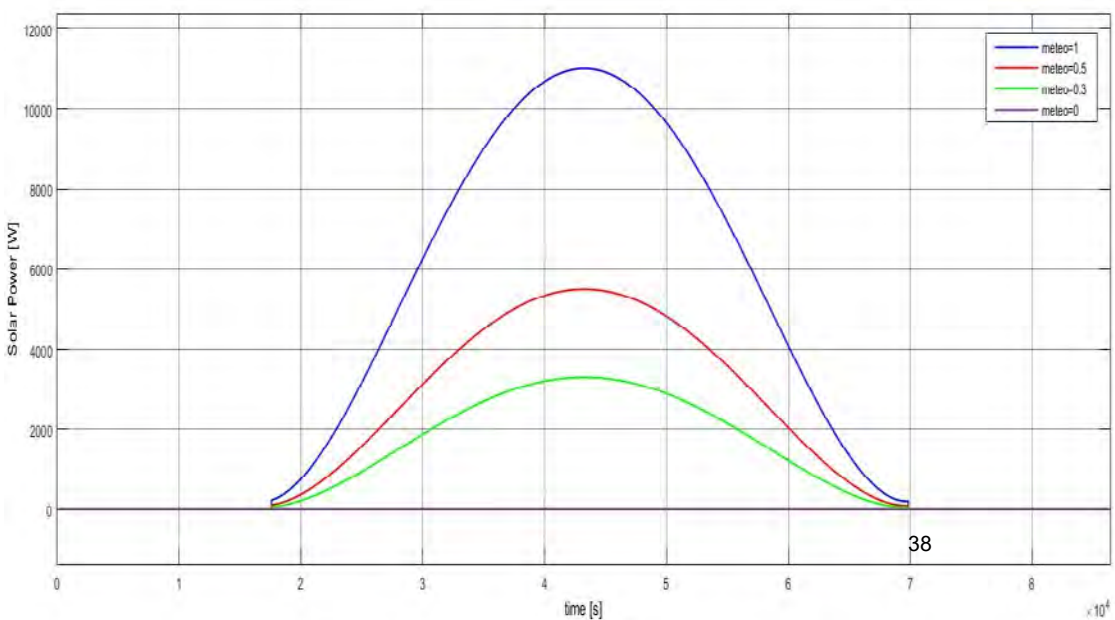
Output
• SOC
(state of charge)

Produzione fotovoltaica

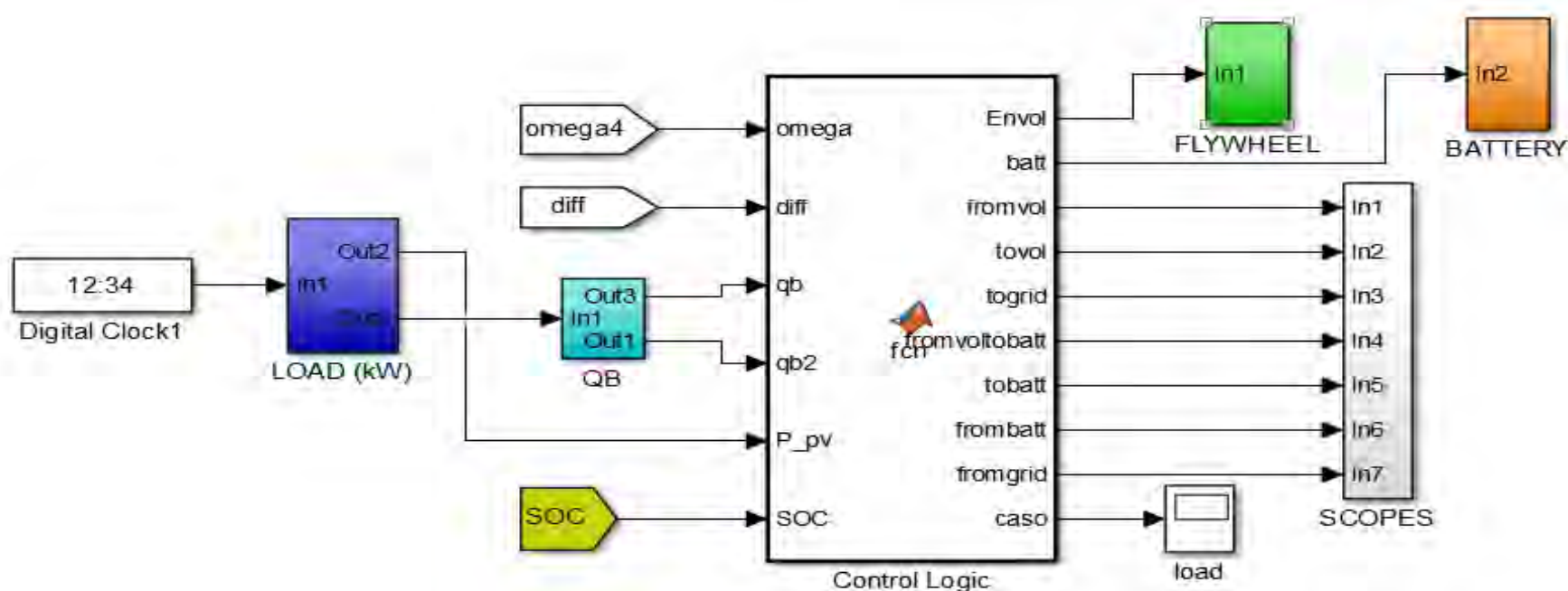
*Impianto FV rivolto a Sud,
tilt 30°, 11 kW di picco*



- Per tener conto delle condizioni meteo sono state considerate le seguenti 4 condizioni di mitigazione della produzione:
- 0%: no produzione, cielo totalmente coperto.
 - 30%: molto nuvoloso con temporanee schiarite.
 - 50%: nuvolosità variabile.
 - 100%: massima produzione, cielo privo di nubi.



Interazione modelli



I singoli modelli sono messi in relazione attraverso una logica di controllo dove sono elaborati i parametri:

- **“omega”**: velocità istantanea volano (output del blocco “Flywheel”)
- **“diff”**: differenza tra richiesta elettrica e produzione FV. Rappresenta la mancanza/surplus di potenza. (output blocco “Load”).
- **“P_pv”**: produzione FV istantanea. (calcolata nel blocco “Load”)
- **“SOC”**: stato di carica istantaneo (output del blocco “Battery”).
- **“qb”** e **“qb2”**: sono due parametri determinati nel blocco “QB”. Approssimano il trend di “diff” in eccesso/difetto con un profilo a step.

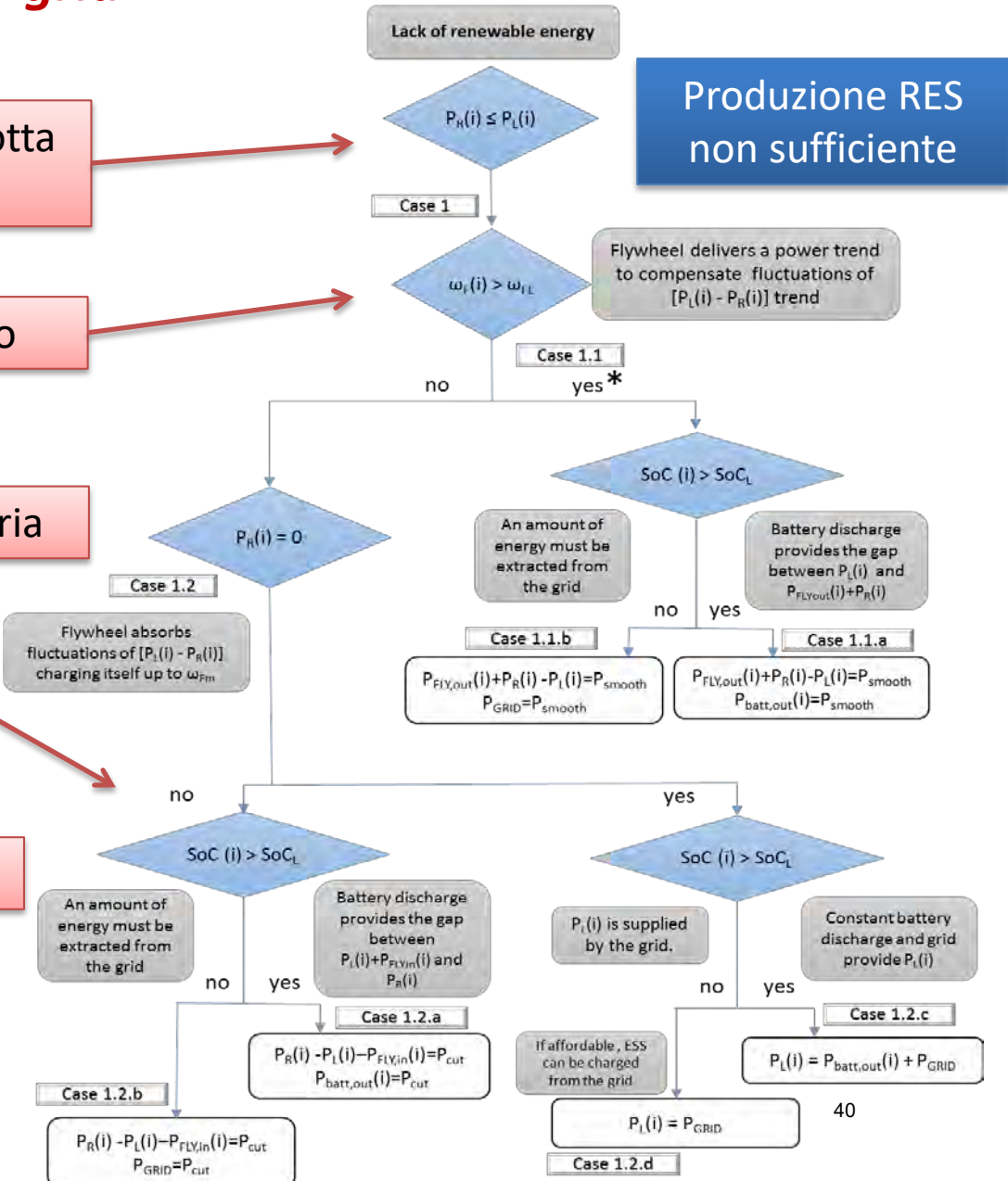
Logica di controllo della micro-grid

Confronto tra potenza richiesta e prodotta dal fotovoltaico

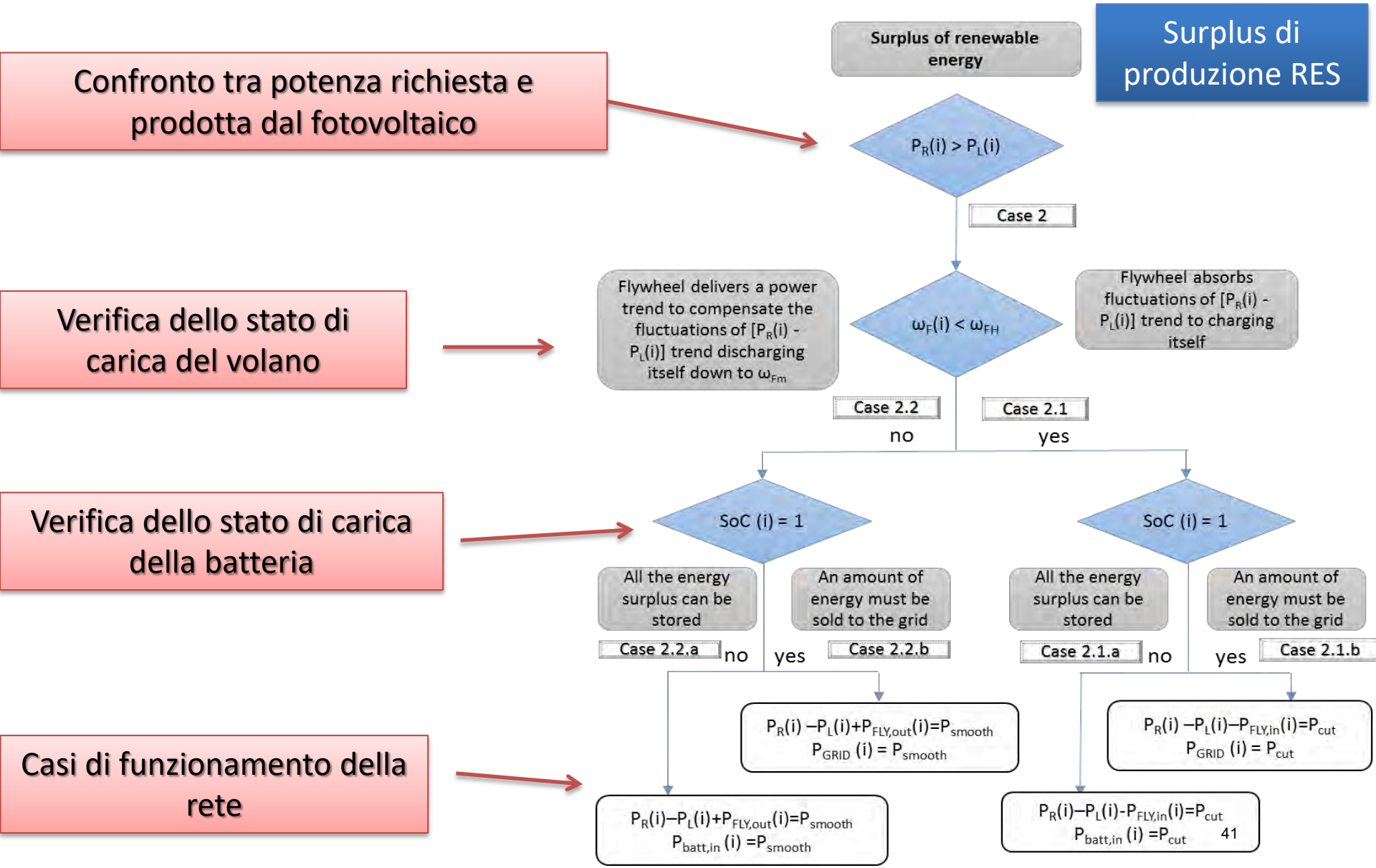
Verifica dello stato di carica del volano

Verifica dello stato di carica della batteria

Casi di funzionamento della rete



Logica di controllo della micro-grid



Risultati simulazioni

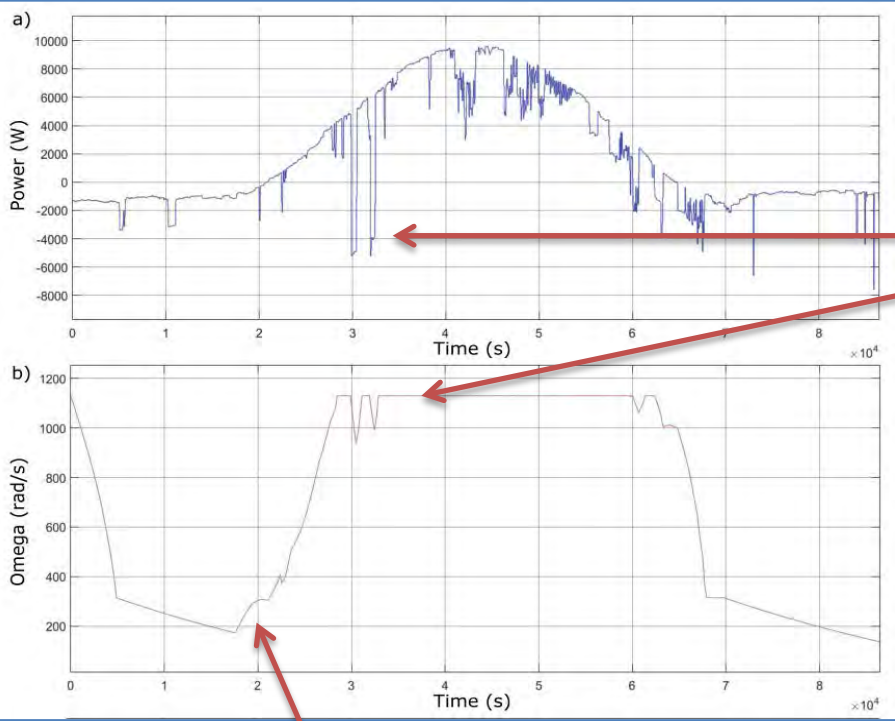
Le simulazioni effettuate sono state caratterizzate da:

- *Variazione stagionale del carico,*
- *Comportamento dinamico batteria,*
- *Comportamento dinamico volano,*
- *Condizioni meteo (100%, 50%, 30% della potenza nominale),*
- *Time step di 1 secondo e durata totale 86.400 s (24 h).*

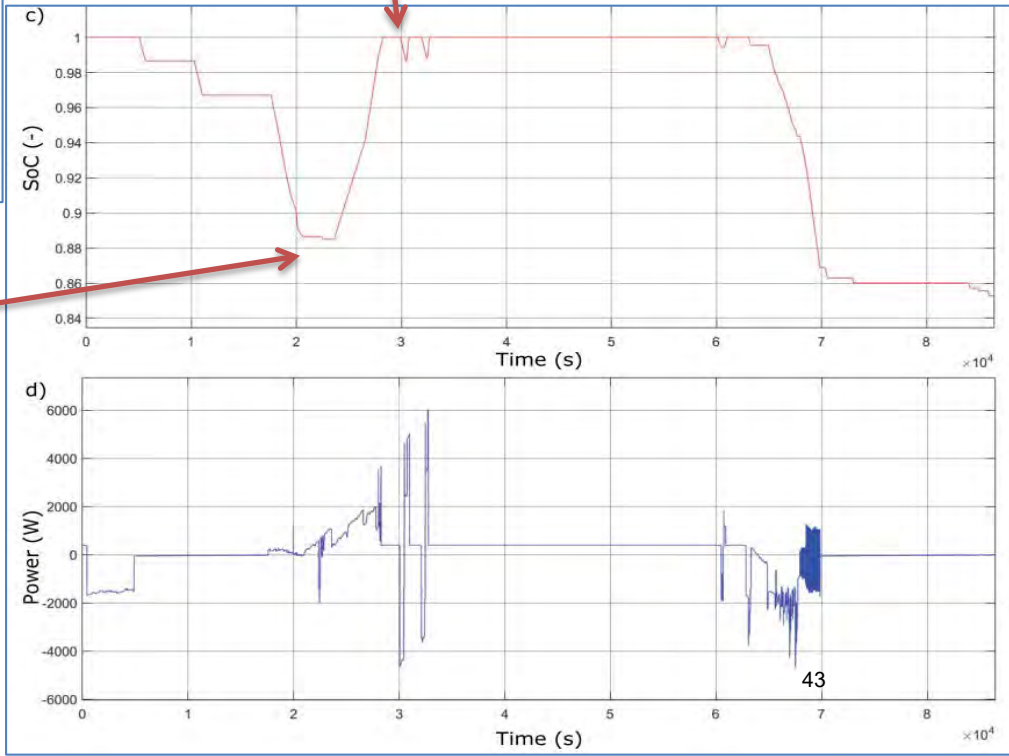
Organizzazione dei risultati grafici seguenti:

- a) Differenza tra produzione PV e carico*
- b) Velocità angolare volano*
- c) SOC batteria*
- d) Potenza scambiata istantaneamente dal volano*

Risultati simulazioni: carico estivo, 100% produzione FV

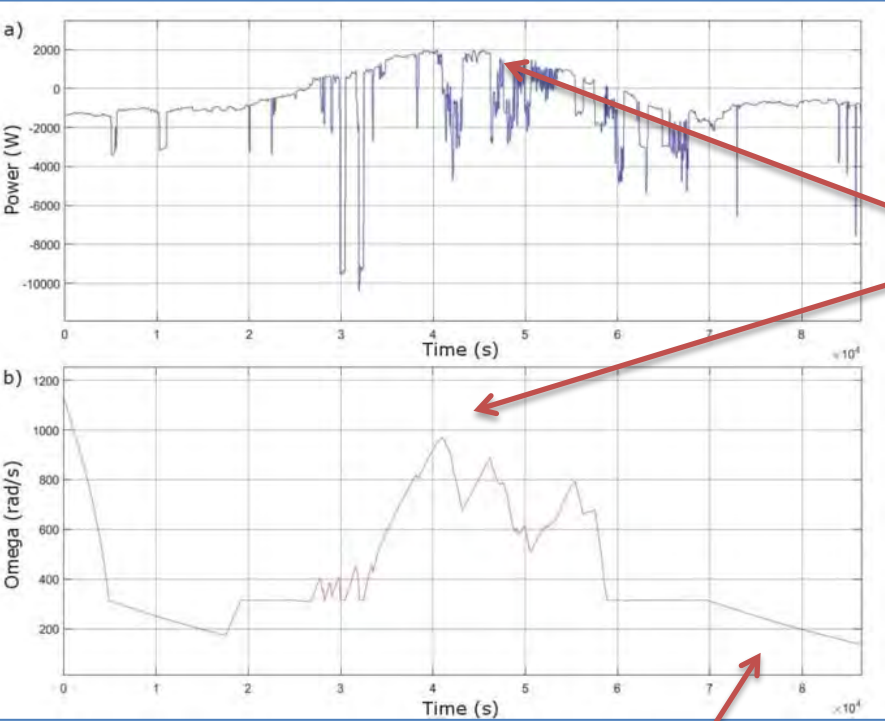


**Alta richiesta di potenza (30.000 s),
H-ESS rispondono coordinati
rispettando la logica di controllo**

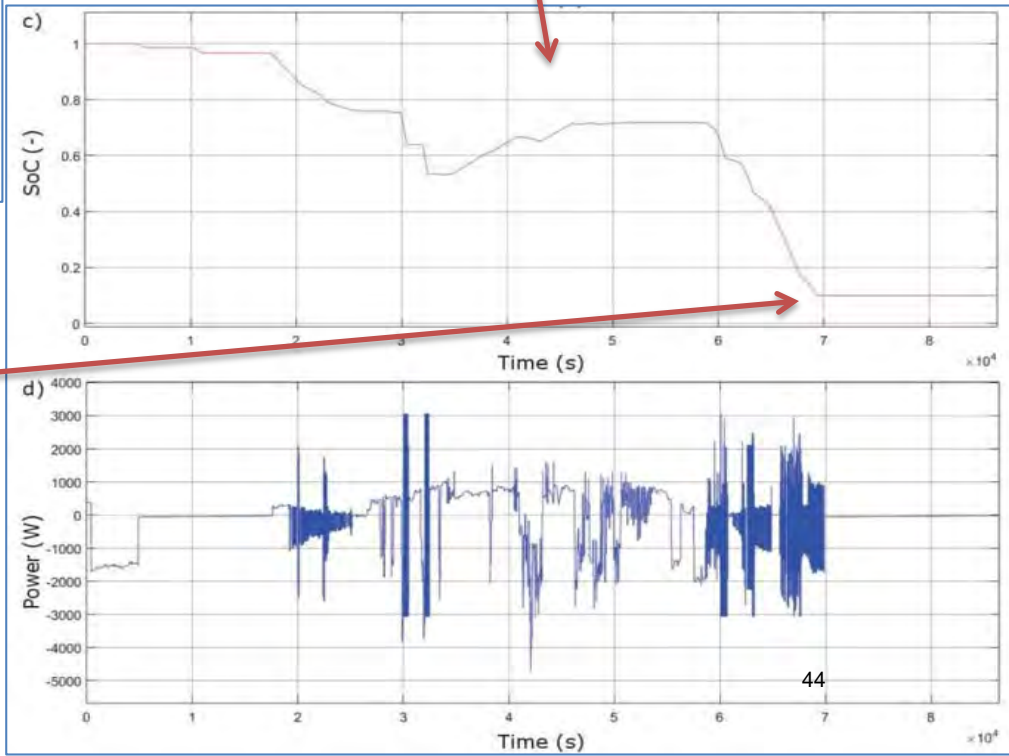


Inizio simulazione:
produzione nulla, volano si scarica
totalmente, batteria raggiunge SOC
minimo =85%.

Risultati simulazioni: carico estivo, 30% produzione FV



Massima produzione (40.000s) non sufficiente a ricaricare del tutto H-ESS.
Produzione FV destinata principalmente al carico, no alla ricarica.

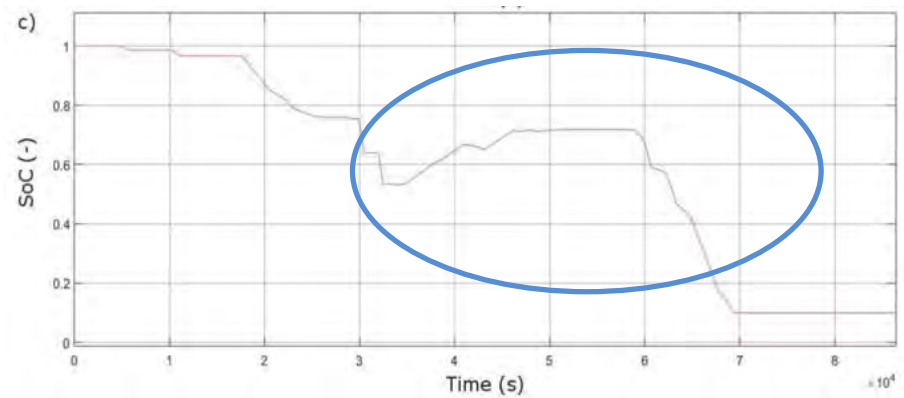


Dopo il tramonto:
Batteria raggiunge minimo (10%)
Volano scarico e libero di ruotare
senza scambiare potenza

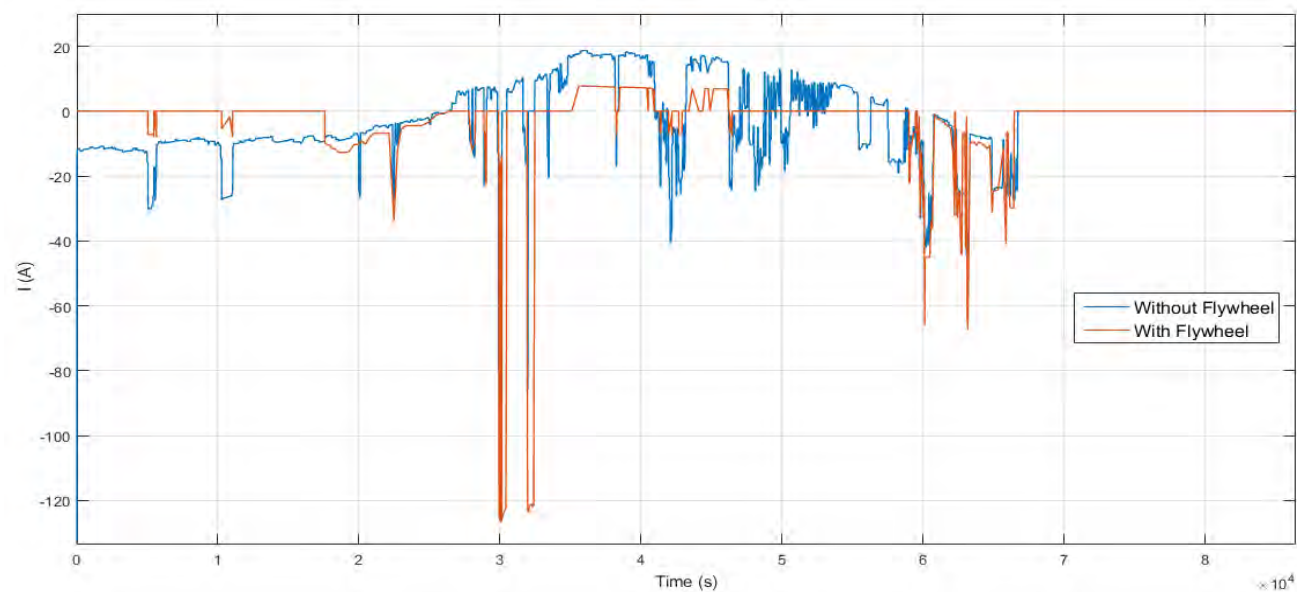
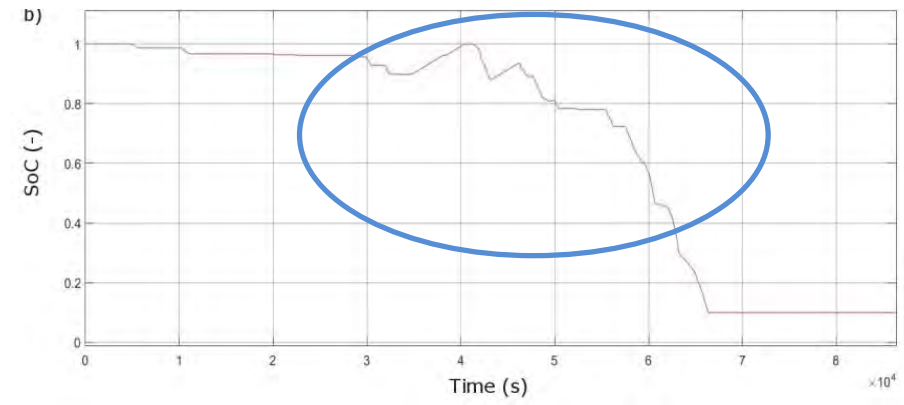
Risultati simulazioni: carico estivo, 30% produzione FV

Trend di Scarica batteria

H-ESS

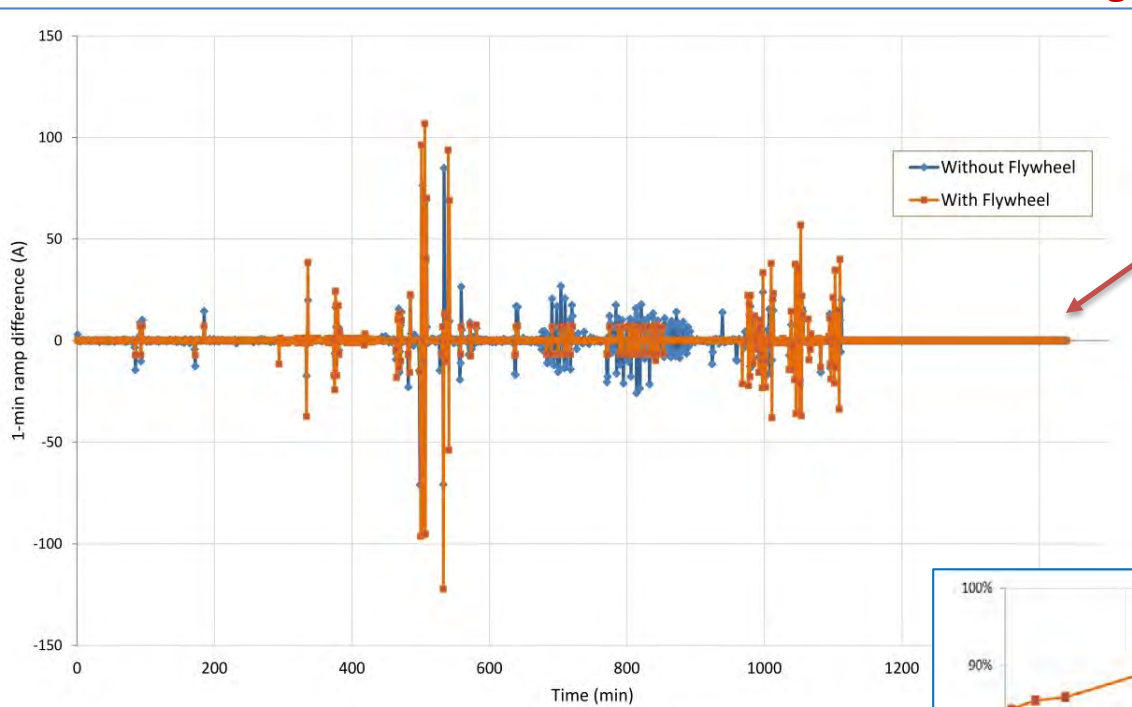


senza volano



Assenza del volano il profilo di corrente richiesto alla batteria risulta molto più frastagliato, risente negativamente della mancanza della funzione di peak shaving.

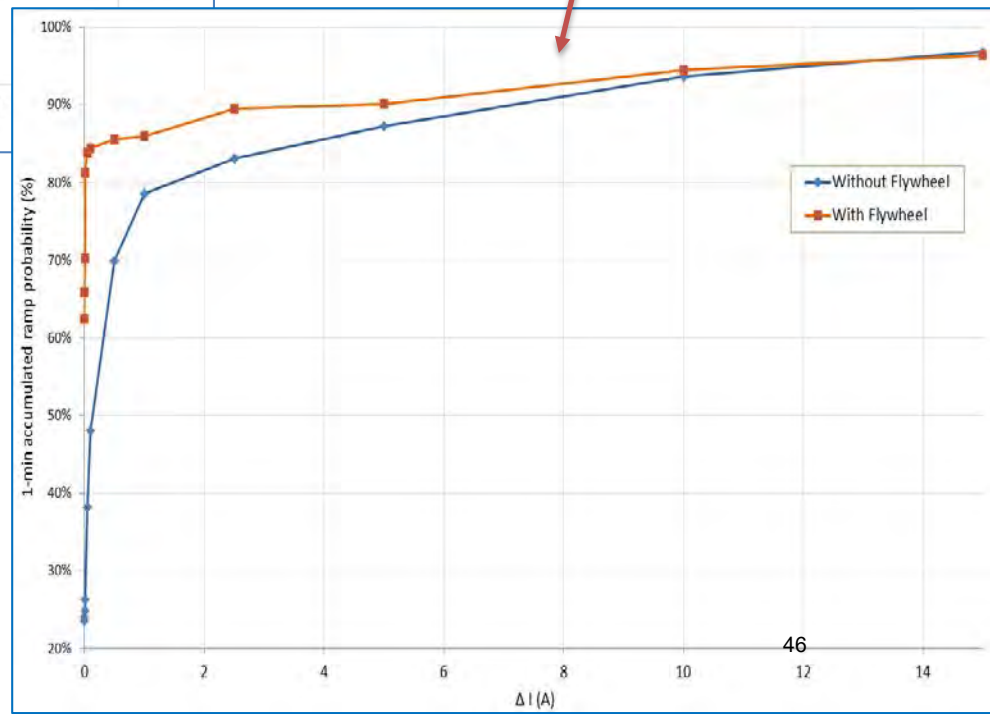
Oscillazione della corrente scambiata tra micro-grid e batteria con/senza volano



30% produzione

Fluttuazione della corrente nel time step di 1 minuto

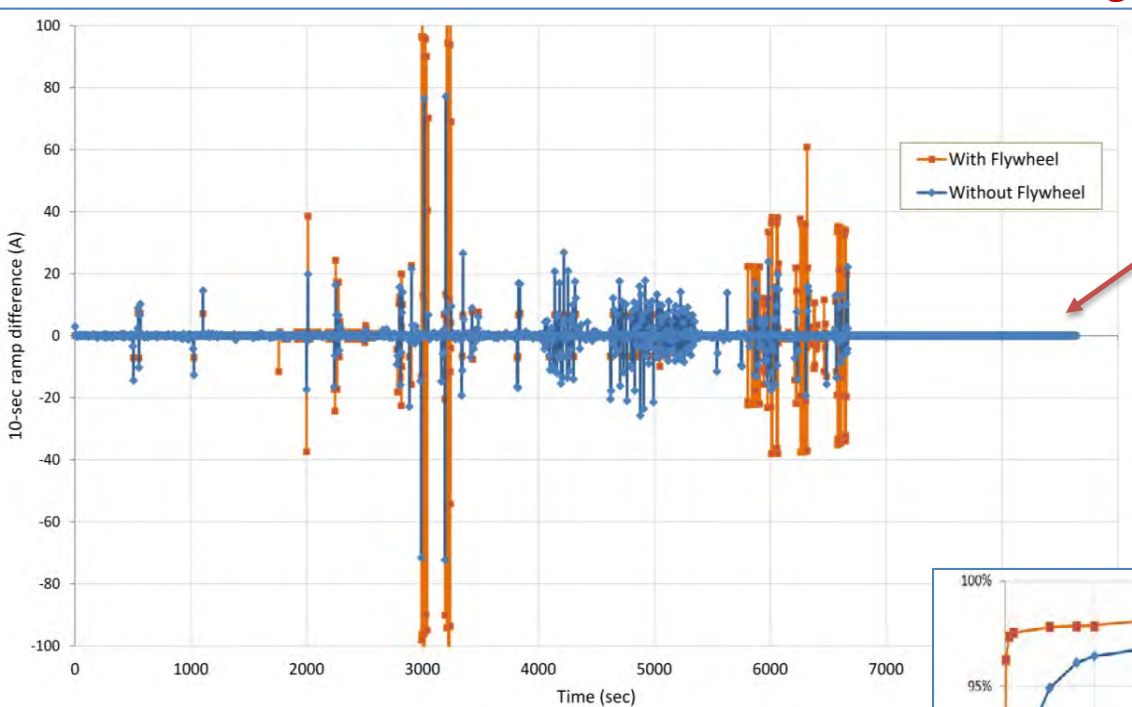
Cumulata di probabilità in 1 minuto



Considerando il 90% dei campioni giornalieri analizzati l'ampiezza di oscillazione:

- Con volano è inferiore a 3 A,
- Senza volano è intorno a 7A.

Oscillazione della corrente scambiata tra micro-grid e batteria con/senza volano



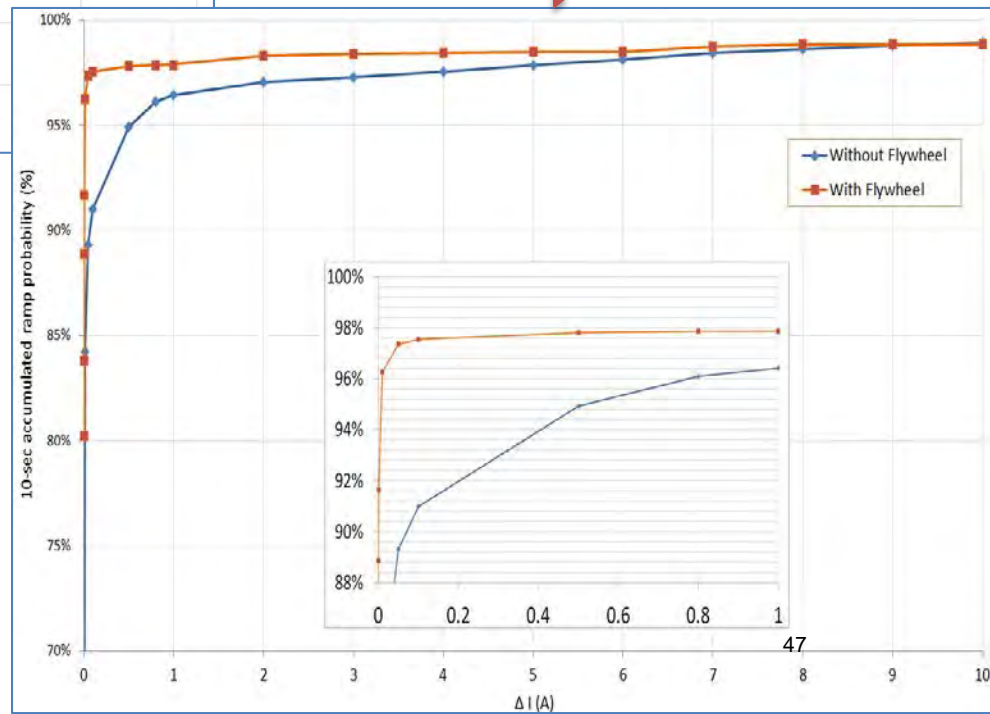
30% produzione

Fluttuazione della corrente nel time step di 10 sec

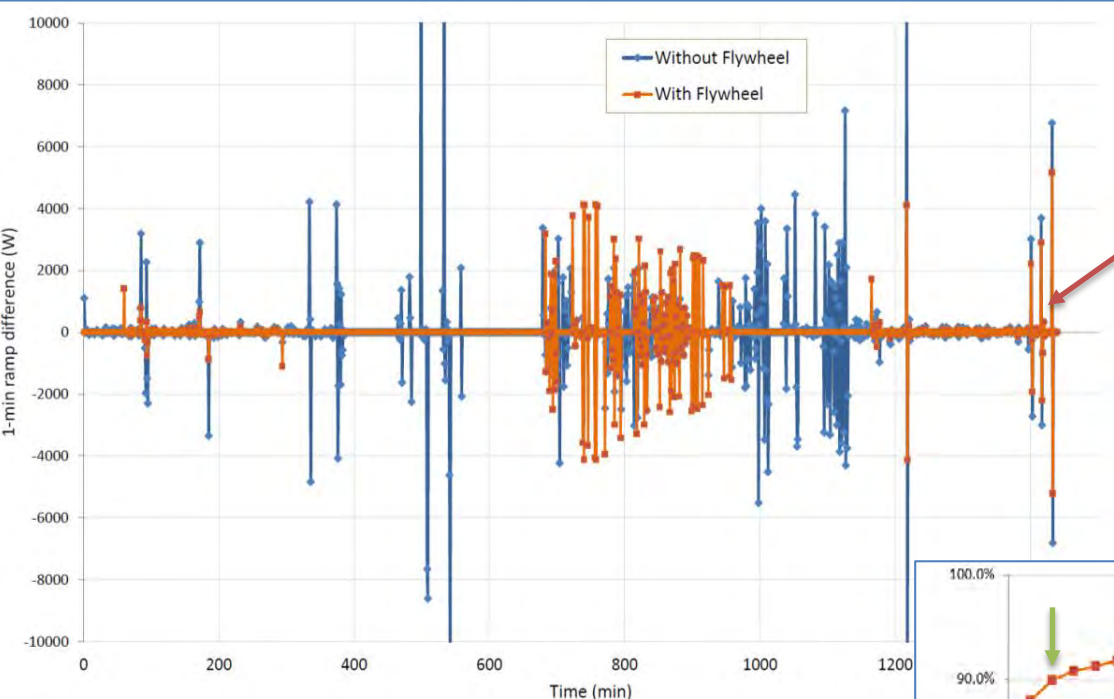
Cumulata di probabilità in 10 sec

Considerando il 96% dei campioni giornalieri analizzati l'ampiezza di oscillazione:

- Con volano è inferiore a 0.01 A,
- Senza volano è intorno a 0.8 A.



Oscillazione della potenza scambiata tra micro-grid e rete con/senza volano

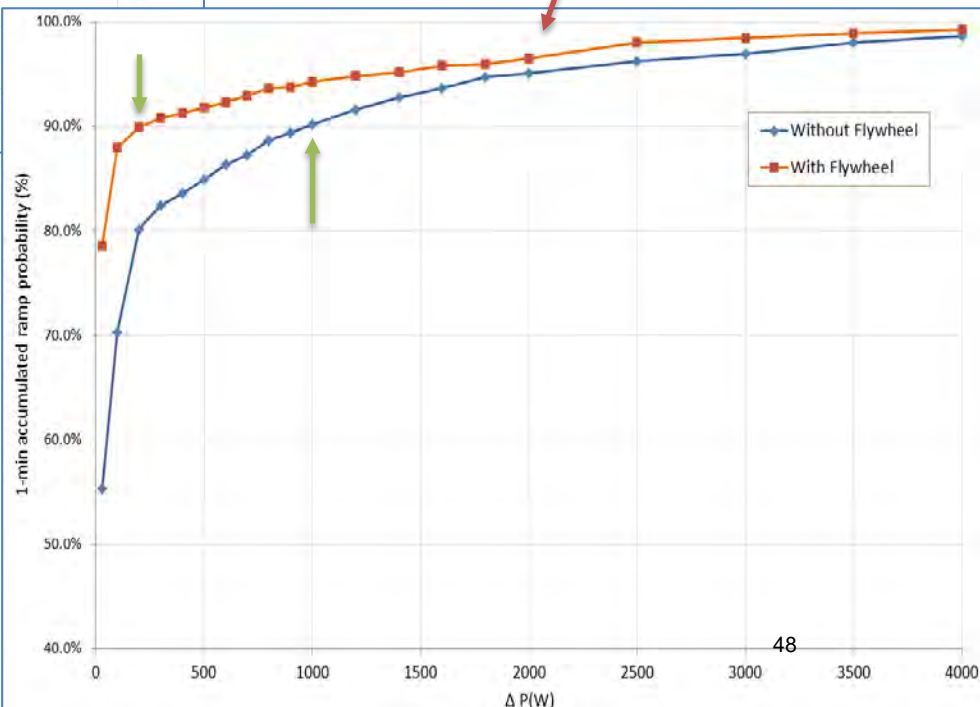


30% produzione

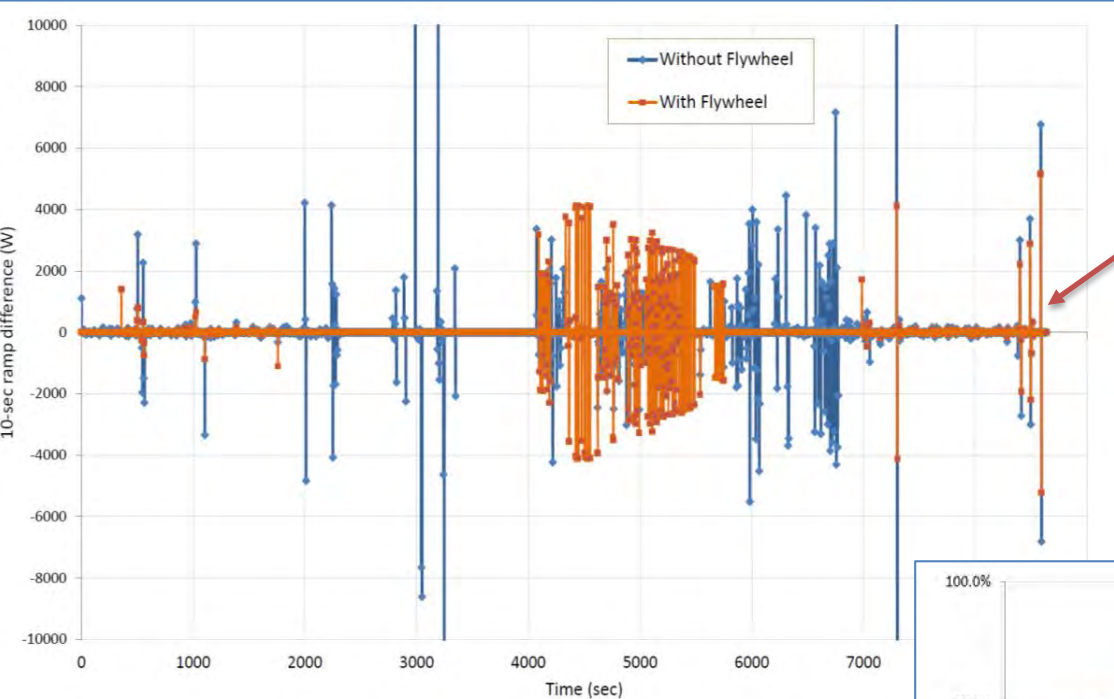
Fluttuazione della corrente nel time step di 1 minuto

Cumulata di probabilità in 1 minuto

Considerando la distribuzione cumulata al 90% dei campioni, l'ampiezza della potenza scambiata passa da 1000 a 200 W grazie all'adozione del volano.



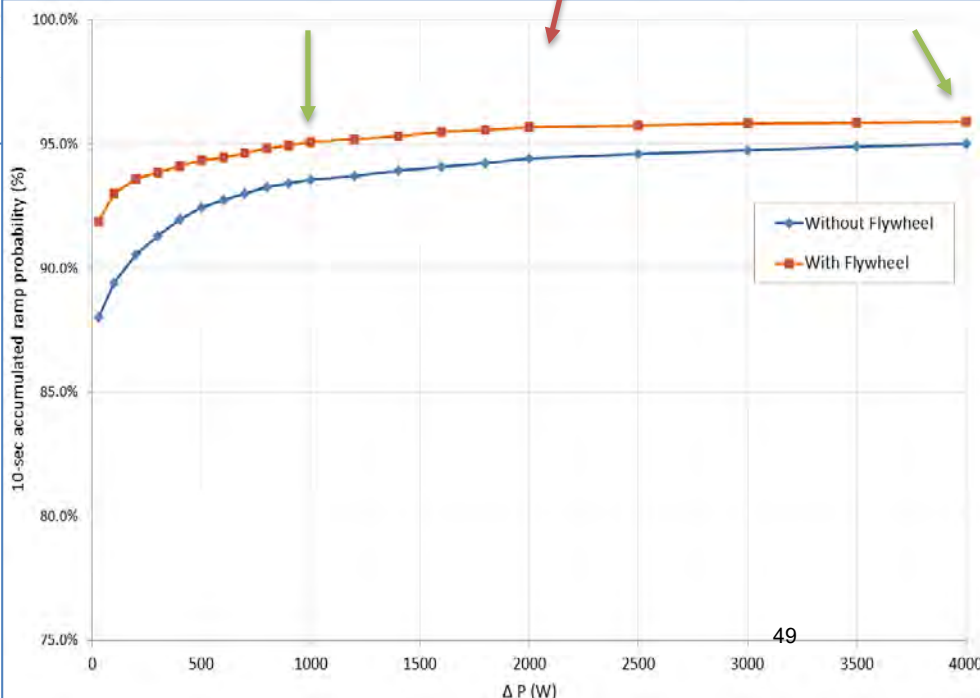
Oscillazione della potenza scambiata tra micro-grid e rete con/senza volano



30% produzione

Fluttuazione della corrente nel time step di 10 sec

Cumulata di probabilità in 10 sec



Il Sistema H-ESS, considerando il 95% dei campioni, permette di ridurre l'ampiezza della potenza scambiata da 4000 a 1000 W.

Conclusioni

E' stato sviluppato un modello per l'analisi dinamica di una micro-grid composta da utenze residenziali, sistema H-ESS e impianto RES (FV).

Verificata la funzionalità dell'ibridizzazione di differenti sistemi di accumulo (volano, batteria) tramite logica di controllo e analisi dei flussi energetici tra i vari componenti.

Vantaggi ottenuti dall'adozione di un sistema H-ESS:

- **Aumentare la durata delle batterie**, ridotto il problema del ciclaggio grazie alla funzione peak-shaving del volano.
 - Riduzione oscillazione del profilo di carico da/verso la batteria:
 - ΔT di 1 min: oscillazione per il 90% del giorno $<$ di 3 A, senza volano = 7 A.
 - ΔT di 10 s: oscillazione per il 96% del giorno < 0.01 A, senza volano = 1 A.
 - Risultato in linea con l'incremento della vita (4 volte) della batteria in configurazione ibrida ottenuto nello studio preliminare (analisi rainflow algorithm su profilo annuale di lavoro batteria).
- **Miglioramento della qualità della potenza scambiata con la rete in termini di fluttuazioni di potenza:**
 - ΔT di 1 min: fluttuazioni ridotte di cinque volte durante il 90% del giorno
 - ΔT di 10 s: fluttuazioni ridotte quattro volte per il 95% dei campioni giornalieri.

Attività in corso

Ottimizzazione di una micro grid in East Africa con impianto FV da 250 kW

Analisi del carico:

- Caratterizzazione dei carichi micro-grid.
- Confronto dei profili di carico con quelli tipici occidentali.
- Analisi nel dominio di frequenza
- Analisi di sensibilità sul profilo di carico: incremento di oscillazioni sovrapposte di domanda energetica

Analisi sistemi di storage. Valutazione di:

- performance della micro-grid.
- Vita attesa pacchi batteria Li-ion e lead-acid
- Analisi economica LCOE, inclusa stima investimenti e costi O&M,
in considerazione di differenti sistemi di storage e tecnologie implementate, in particolare:
 - Batteria Piombo-Gel e ibridizzazione con volano;
 - Batteria litio e ibridizzazione con volano;
 - Batteria a flusso redox vanadio (VRFB).

Target:

- Aumento durata e ciclaggio batterie convenzionali
- Minimizzazione Levelized Cost of Energy (LCOE)