



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Controllo del processo di ricarica rapida di veicoli elettrici plug-in con supporto di un sistema di accumulo di energia e turbina eolica con generatore a induzione a doppia alimentazione

Dipartimento di Ingegneria Informatica, Automatica E Gestionale "Antonio Ruberti"

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica e Automatica

Candidato

Camilla Bianchi

Matricola 1935974

Relatore

Prof.re Alessandro Di Giorgio

Correlatore

Dr. Emanuele De Santis

Anno Accademico 2022/2023

Tesi discussa il 11 Luglio 2023
di fronte a una commissione esaminatrice composta da:
Prof. Mattia Mattioni (presidente)
Prof. Paolo Di Giamberardino (presidente)

Controllo del processo di ricarica rapida di veicoli elettrici plug-in con supporto di un sistema di accumulo di energia e turbina eolica con generatore a induzione a doppia alimentazione

Tesi di Laurea. Sapienza – Università di Roma

© 2023 Camilla Bianchi. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con L^AT_EX e la classe Sapthesis.

Email dell'autore: bianchi.1935974@studenti.uniroma1.it

Sommario

L'obiettivo di questa tesi è quello di controllare in modo ottimo il processo di ricarica di veicoli elettrici plug-in con l'ausilio di un sistema di accumulo di energia e di una turbina eolica con un generatore a induzione doppiamente alimentato. La struttura in analisi è costituita da un bus, a cui sono connesse le colonnine di ricarica, la turbina eolica, il sistema di accumulo e la rete di distribuzione elettrica. Si può parlare, quindi, di microgrid perché è una sottorete con piccoli carichi, piccola generazione e potenzialmente può operare in modo disconnesso dalla rete.

Questo argomento si inserisce bene nel panorama odierno in cui la transizione verso alternative ecosostenibili è sempre più avanzata, la diffusione di veicoli elettrici è sempre maggiore e le attuali stazioni di servizio per benzina e gasolio vengono convertite in stazioni per la ricarica di veicoli elettrici.

Per quanto riguarda la turbina, è stato scelto un modello che sfrutta il generatore a induzione doppiamente alimentato: un'alimentazione viene dallo statore, collegato alla rete, e una dal rotore tramite un apposito convertitore. Questa soluzione permette di utilizzare il generatore a velocità di rotore variabile e quindi di adoperare la turbina come elemento di accumulo di energia cinetica.

Infine, la metodologìa di controllo utilizzata è quella del Model Predictive Control con l'aggiunta di vincoli per imporre dei limiti alle evoluzioni di certe grandezze. È una tecnica di controllo ottimo che lavora in tempo discreto e si presta a sfruttare i benefici della ricerca operativa, permettendo perciò di lavorare in presenza di vincoli. La strategia del MPC si basa sulla soluzione di un problema di ottimo e sulle informazioni che si hanno già a disposizione sul futuro: a partire dalla previsione delle richieste di ricarica dei veicoli, si ha un'idea su cosa accadrà allo stato del sistema.

Le simulazioni, realizzate con il framework Julia 1.6.7 e il solver Gurobi, mostrano come, variando i pesi della funzione obiettivo, sia possibile far intervenire diversamente le varie componenti (storage, turbina e rete) nel processo di ricarica mantenendo la velocità angolare del rotore vicina a quella di sincronismo e la carica dello storage vicina a un valore di riferimento. L'aspetto più interessante è che, utilizzando lo storage e la turbina, è possibile ottenere un profilo della potenza richiesta all'allaccio con la rete senza picchi, che porterebbero incrementi di prezzo per il gestore della colonnina: in questo modo si può garantire un costo ridotto all'utente finale e la soddisfazione della richiesta di ricarica in modo ottimale. Ovviamente le potenze erogate dallo storage e dalla turbina possono fare soltanto da supporto, soprattutto per richieste da parte dei veicoli elevate e prolungate nel tempo.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Riferimenti letteratura	1
1.2	Obiettivi di controllo	2
1.3	Struttura del documento	3
2	Infrastruttura e Metodologia di controllo	4
2.1	Colonnina di ricarica	5
2.2	Turbina con generatore a induzione doppiamente alimentato (DFIG)	8
2.3	Model Predictive Control	12
3	Formalizzazione e Modello	15
3.0.1	Storage $x_1(t)$	17
3.0.2	Velocità angolare $x_2(t)$	17
3.0.3	Potenza all'allaccio $p(t)$	18
3.0.4	Potenza data ai veicoli $u^{ev}(t)$	18
3.0.5	Potenza meccanica convertibile $w^{res}(t)$	18
4	Simulazioni	19
4.1	Case Study	19
4.2	Prima Simulazione	20
4.3	Seconda Simulazione	24
4.3.1	Simulazione 2.1	26
4.3.2	Simulazione 2.2	29
5	Conclusioni	33
	Bibliografia	34

Capitolo 1

Introduzione

In questi anni si parla sempre più delle energie rinnovabili e di alternative eco-sostenibili ove possibile. Un ottimo esempio di questa transizione è l'utilizzo progressivo delle macchine elettriche, o più in generale, dei veicoli elettrici: sono sempre più diffusi monopattini, biciclette, macchine e mezzi pubblici completamente elettrici o ibridi. Tuttavia, anche se questi sono alternative sicuramente migliori ai veicoli a combustibile, bisogna considerarne alcuni aspetti chiave che possono penalizzarne i vantaggi: il costo del veicolo e la mancanza di un'adeguata rete di stazioni di ricarica sia nelle installazioni private che nell'ambiente pubblico che possa distribuire l'aumento della potenza richiesta. Per questo secondo motivo è utile implementare un sistema di controllo che consenta la soddisfazione di tutte le richieste al meglio.

Inoltre, va anche considerato che, se da una parte questi veicoli risultano più ecologici, ad oggi i metodi di produzione di energia sono quasi tutti tramite utilizzo di combustibili fossili. Viene, quindi, naturale introdurre l'utilizzo di energie rinnovabili come ad esempio energia solare attraverso i pannelli solari o energia eolica attraverso le turbine. Queste fonti, però, sono fonti stocastiche perché non c'è nessuna garanzia di servizio continuo da parte di esse e fortemente dipendenti dal posizionamento della stazione e dal tempo considerato. Per questo motivo, le fonti rinnovabili possono essere implementate a sostegno di altre alimentazioni, ma non come unica fonte perché questo porterebbe a una perdita in termini di affidabilità del servizio.

Per questi motivi si è scelto di analizzare una singola stazione di ricarica collegata alla rete che impiega una turbina e una batteria come ulteriore sostegno, implementando varie grandezze di controllo per garantire un'offerta che possa bilanciare la domanda e sfruttare le fonti aggiuntive per diminuire il costo complessivo.

1.1 Riferimenti letteratura

Questo problema, essendo di estremo interesse, è stato ampiamente discusso sotto diversi aspetti. Per esempio, si possono trovare diversi articoli in cui si utilizza una struttura ibrida, che sfrutta sia energia solare che eolica, come in [1] in cui si utilizzano dei pannelli solari e viene proposto un modello predittivo della velocità del vento e due configurazioni che cambiano in base al gestore dell'impianto eolico, se lo stesso della stazione o se diverso. Dalle simulazioni si può constatare come, nell'arco di dieci anni, si ha un calo di costi maggiore nella prima struttura. Similmente, in [2] vengono studiati singolarmente il circuito per un sistema con pannelli solari, il circuito per un sistema con turbina eolica e il convertitore per caricare il veicolo. Si analizzano tre modalità di ricarica (lenta, rapida e ultrarapida) e, infine, si considera-

no tre casi simulativi: la potenza delle fonti rinnovabili è uguale, maggiore o minore della potenza richiesta dai veicoli. In [3] gli autori propongono l'utilizzo di una turbina eolica PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) e dei pannelli solari. In particolare, vengono utilizzate micro-grid DC per maggiore rendimento energetico, convertitori per poter dare l'energia in eccesso prodotta tramite le fonti di energia rinnovabile alla rete e quattro tecniche di controllo. In [4], si tratta lo stesso tipo di stazione di ricarica con pannello solare e turbina eolica PMSG, però si ha un modello molto dettagliato per il comportamento dei pannelli e della turbina. Per questo vengono mostrate a fine documento una serie di simulazioni molto esplicative, attraverso le quali si possono vedere i possibili vantaggi di queste tecnologie.

In [5] si analizza più nel dettaglio l'utilizzo dei pannelli solari, studiando il posizionamento della stazione in base alle radiazioni registrate, alla temperatura e alla serenità del meteo. Vengono, poi, mostrati i costi e la potenza prodotta in questi casi, a confronto con una struttura senza pannelli. Analogamente, gli autori dell'articolo [6] parlano dei pannelli solari e del loro attuale sviluppo nelle stazioni di ricarica. Vengono spiegati i motivi del perché si predilige l'energia solare rispetto all'energia eolica, meno stabile, e all'energia idrica, non utilizzabile in spazi relativamente ristretti. In conclusione, vengono illustrati i vantaggi che sono ottenibili con i pannelli solari, possibili migliorie e successivamente i limiti di questa implementazione.

Per quanto riguarda l'energia eolica, invece, è interessante il lavoro svolto nell'articolo [7], in cui gli autori propongono un'analisi della disponibilità delle risorse se si volesse usare il vento come unica fonte di energia, considerando due scenari, varie turbine e diversi intervalli temporali. A seguito dei vari risultati simulativi, si può notare che, avendo come unica fonte l'energia eolica, si è indipendenti dalla rete, ma che solo nove delle turbine considerate garantiscono un flusso continuo di potenza.

Si noti che parlando di fonti d'energia stocastiche, come detto in precedenza, non possono essere utilizzate da sole e infatti in [8] viene analizzato l'utilizzo di un sistema di storage per migliorare l'efficienza. Vengono evidenziate tre configurazioni, che sono di singolo storage, di storage ibrido e di storage sostituibile, e ne viene discussa la realizzazione a livello di costi, di eco-sostenibilità e di efficienza. Infine vengono messe a confronto le tre configurazioni basandosi sui criteri sopra citati. In [9] viene proposto l'implementazione di una turbina eolica con sostegno da parte dello storage per evitare che ci siano vuoti di potenza. Si introduce un modello per la potenza eolica con analisi dei costi e dei vincoli e si analizzano i risultati simulativi in base al tipo di storage e al modello per la potenza eolica utilizzato.

In conclusione, nell'articolo [10] viene analizzata una struttura simile rispetto a quella proposta in questa tesi: si ha una stazione con turbina e storage e viene utilizzata la tecnica del MPC per bilanciare al meglio i vari termini di potenza. La turbina, però, è una PMSG e i valori di riferimento per essa sono calcolati tramite l'algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking).

1.2 Obiettivi di controllo

Per questo elaborato sono stati individuati quattro obiettivi di controllo principali, che sono:

- Soddisfare in modo ottimale la richiesta di ricarica dei veicoli: questo primo obiettivo permette di ridurre il tempo di ricarica dei veicoli perché tanto più l'offerta si allontana la domanda, tanto più tempo ci vuole a caricare il veicolo.
- Avere un profilo della potenza all'allaccio con la rete più basso e smooth possibile, cioè senza picchi: questo obiettivo è necessario per evitare picchi di

potenza, che porterebbero a sovradimensionare l'allaccio con la rete e quindi a costi più alti per il gestore dell'area di servizio.

- Mantenere l'energia immagazzinata dallo storage vicino a un valore di riferimento: il valore di riferimento, di solito, è circa la metà dell'energia che può accumulare e lo stato di carica dovrebbe rimanere vicino a questo valore per essere sicuri che il sistema abbia margine di intervento in caso di necessità.
- Mantenere la velocità angolare del rotore della turbina vicino alla velocità di sincronismo: la velocità di sincronismo è la velocità caratteristica della rete elettrica e, mantenendo la velocità angolare del rotore vicino a essa, diminuisce lo sforzo del convertitore che in caso di scostamenti è soggetto a usura.

1.3 Struttura del documento

All'interno del **Capitolo 2** vengono descritti meglio gli elementi della stazione di ricarica in esame e viene trattata in breve la metodologia di controllo: la colonnina di ricarica e i suoi aspetti chiave, la turbina eolica con generatore a induzione doppiamente alimentato e il suo funzionamento e infine la tecnica del Model Predictive Control.

Nel **Capitolo 3** viene formalizzato e modellato il problema, quindi saranno presenti i vari vincoli e la funzione obiettivo da minimizzare.

Nel **Capitolo 4** si possono vedere i risultati delle simulazioni effettuate al variare dei disturbi, delle richieste dei veicoli e dei pesi presenti nella funzione obiettivo.

Infine, nel **Capitolo 5** si trovano le conclusioni della tesi.

Capitolo 2

Infrastruttura e Metodologia di controllo

La struttura dell'area di servizio in esame in questo elaborato ha un bus a cui sono collegati 10 punti di ricarica, lo storage, la turbina e, attraverso il punto di allaccio, anche la rete di distribuzione.

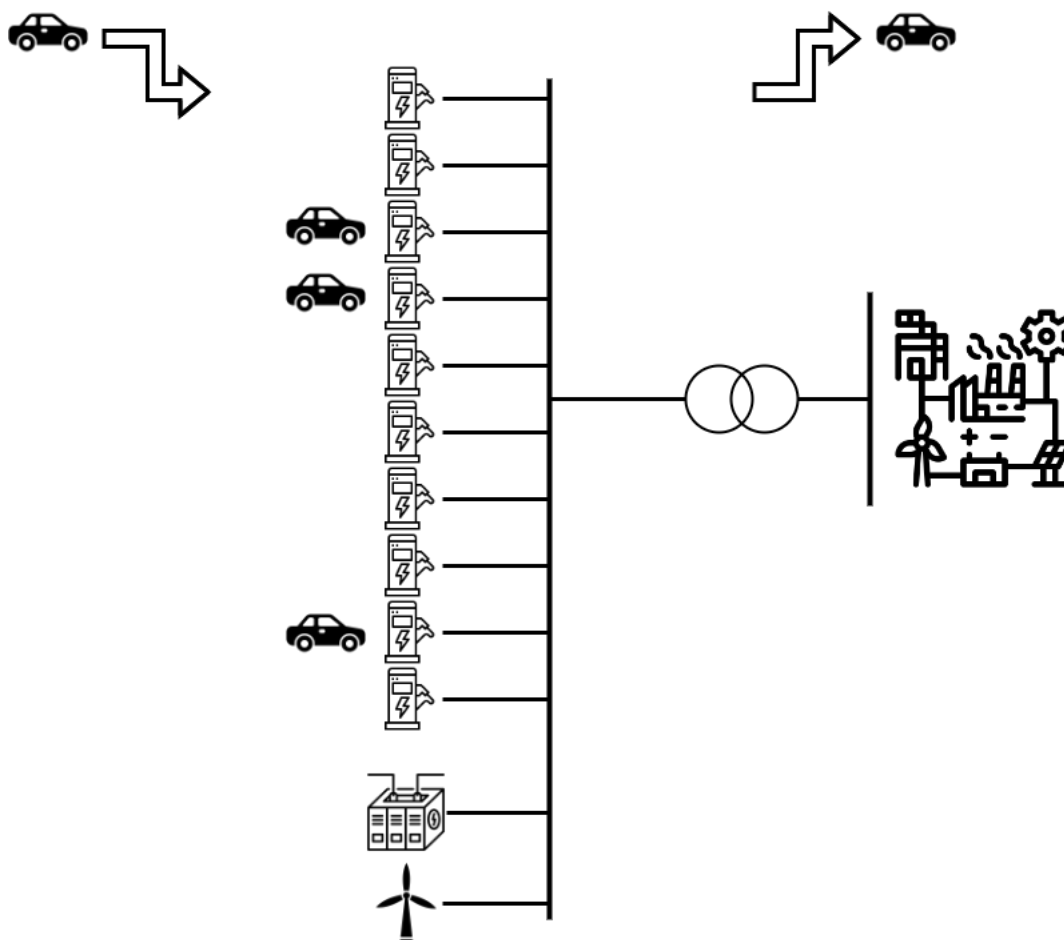


Figura 2.1. Struttura del modello.

All'interno di questo capitolo vengono studiati più nel dettaglio gli elementi costitutivi della struttura, quali colonnine e turbina, e successivamente la metodologia di controllo, il Model Predictive Control.

2.1 Colonnina di ricarica

Le colonnine di ricarica sono lo strumento principale per poter attuare una transizione ecologica nel campo della mobilità. Ricordando quanto detto in precedenza, è necessario un numero sempre crescente di stazioni di ricarica e ciò comporta un aumento e una maggiore distribuzione delle colonnine.

Basandosi sui dati raccolti da Motus-E [11], associazione italiana che cerca di favorire la transizione all'elettrico, si può vedere come al 31 dicembre 2022 si trovino 36.772 punti di ricarica in 19.334 infrastrutture e 14.048 siano accessibili al pubblico. L'88% sono in corrente alternata (AC), il restante 12% in corrente continua (DC). Infine, è interessante notare la distribuzione delle colonnine: il 99% del territorio italiano ha almeno un punto di ricarica nel raggio di 20 km e l'86% del territorio anche in un raggio di soli 10 km; a livello autostradale sono presenti 6,8 punti di ricarica ogni 100 km.

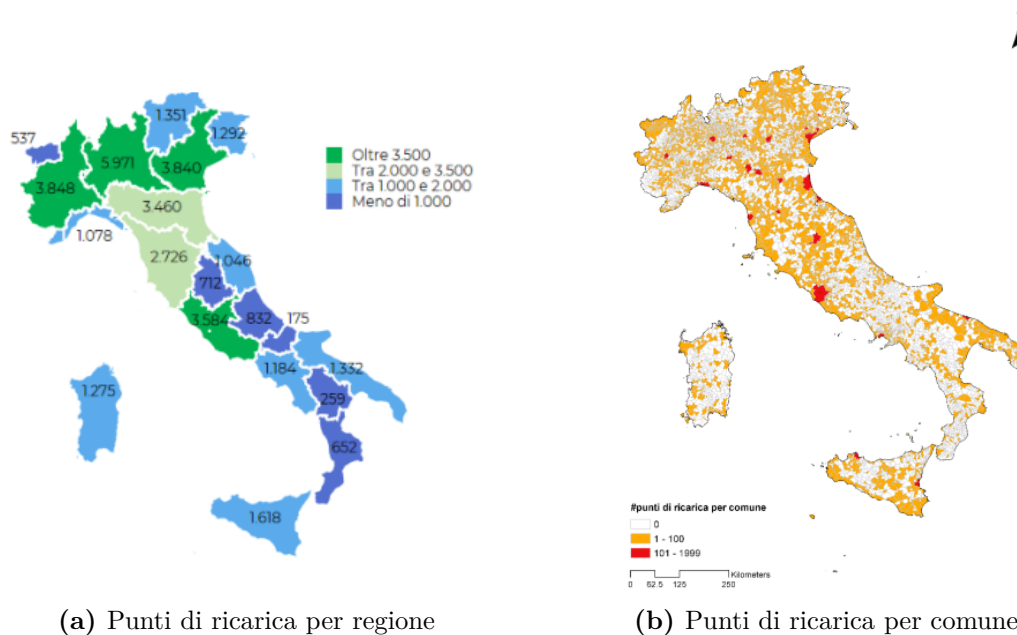


Figura 2.2. Distribuzione punti di ricarica in Italia.

Volendo parlare più nel dettaglio della tecnologia delle colonnine, si deve prima distinguere in:

- colonnine per il settore privato o semipubblico: sono situate solitamente nei garage dei palazzi, dei negozi o delle aziende. Vengono installate a descrizione del proprietario.
- colonnine per il settore pubblico: sono quelle presenti lungo le strade delle città e le autostrade. Sono installate da fornitori di energia e gestori di rete.

Per quanto riguarda il funzionamento delle colonnine, questo è regolamentato dall'IEC 61851, che è uno standard internazionale per i sistemi di ricarica conduttiva dei veicoli. Tale standard è suddiviso in varie parti, alcune ancora in sviluppo (qui vengono riportate solo quelle pubblicate): IEC 61851-1 parla di requisiti generali e presenta una suddivisione dei modi di ricarica, IEC 61851-21-1 e IEC 61851-21-2 entrano nel dettaglio delle connessioni nei casi di AC o DC, IEC 61851-23 tratta in particolare la ricarica in DC, IEC 61851-24 si occupa della comunicazione digitale tra stazione in DC e veicolo per il controllo del processo di ricarica e IEC 61851-25 delle apparecchiature di alimentazione in DC in cui il circuito secondario è protetto dal circuito primario mediante separazione elettrica.

Nell'IEC 61851-1 vengono definiti 4 modi di ricarica:

- Modo 1, che consiste in una ricarica lenta: prevede il collegamento diretto alla presa di corrente a 16A in corrente alternata e arriva a una potenza massima di 7kW. Ovviamente non è sufficiente per caricare una macchina o un bus, infatti si usa generalmente per quadricicli di poca potenza e motocicli. Di solito si usa la presa di corrente di tipo Schuko o una presa industriale di Tipo 1 da 32A.
- Modo 2, che consiste in una ricarica mediamente lenta: anche in questo caso la connessione può avvenire tramite presa Schuko a 16A o tramite presa industriale a 32A in AC, ma utilizza anche un'unità di controllo che si trova tra veicolo e presa. In questo caso la potenza può raggiungere valori fino a 22kW.
- Modo 3, che consiste in una ricarica lenta o rapida: si ha nelle colonnine fisse o wallbox con sistemi di controllo e sicurezza. Può caricare in AC lentamente a 16A o rapidamente a 63A. Anche in questo caso, la potenza massima è pari a 22kW.
- Modo 4, che consiste in una ricarica rapida o ultrarapida: è l'unica modalità che prevede l'alimentazione in DC. Si trova solo nelle colonnine per il settore pubblico e il caricabatterie è esterno alla macchina. Di solito la potenza massima arriva a 150 kW, però esistono soluzioni all'avanguardia per farla arrivare fino a 350 kW.

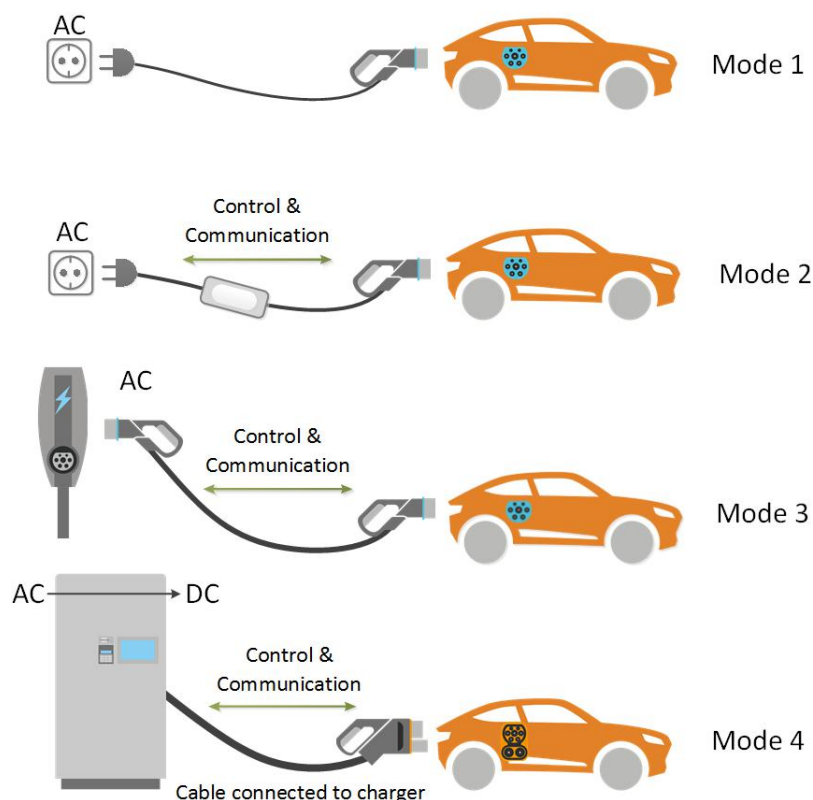


Figura 2.3. Rappresentazione delle quattro modalità di ricarica.

Al di fuori dello standard IEC 61851-1 si trova anche una quinta modalità di ricarica, cioè quella per e-bike e veicoli simili per i quali è sufficiente una spina a bassa tensione, come se si ricaricasse il proprio computer. Per quanto riguarda il collegamento alla colonnina, nelle prime tre modalità il caricabatterie è interno alla macchina, quindi il principio di funzionamento è simile al caricamento di un dispositivo in casa ed esistono diversi tipi di cavi descritti dallo standard IEC 62196-2, che si utilizzano in base alla quantità di corrente che possono far scorrere e al posizionamento:

- Tipo 1: si trova sul veicolo ed è un connettore monofase a 32A. Si usa generalmente in America e presenta cinque contatti, due per l'alimentazione elettrica, uno per la terra e due per il segnale di controllo.
- Tipo 2: può essere posizionato sia sul veicolo che nella colonnina e può essere monofase da 16A o trifase fino a 63A. È lo standard per i veicoli europei e asiatici e, rispetto al Tipo 1, aggiunge ulteriori punti di contatto per l'alimentazione.
- Tipo 3A e 3C: si trovano unicamente sulle colonnine, il primo viene usato soltanto per veicoli leggeri con corrente fino a 16A, mentre il secondo anche per macchine e può essere monofase o trifase a 32A. Il Tipo 3A ha quattro punti di contatto (due per l'alimentazione, uno per la terra e uno per il controllo), mentre il Tipo 3C ne ha sette come il Tipo 2. Il Tipo 3C è entrato in disuso da quando l'Unione Europea ha adottato come standard il Tipo 2 con interruttore.

Infine, in corrente continua non occorre avere dei cavi propri in quanto già presenti nella colonnina e si hanno due standard: quello giapponese CHAdeMO, considerato

standard anche secondo l'IEC 62196-3, che arriva fino a 100 kW, e quello europeo CCS Combo2, sviluppato a partire dal connettore Tipo 2, che consente la ricarica lenta in AC e rapida in DC fino a 350 kW.



Figura 2.4. Rappresentazione dei 6 connettori descritti sopra.

2.2 Turbina con generatore a induzione doppiamente alimentato (DFIG)

L'eolico in Italia rappresenta la terza fonte rinnovabile per produzione di potenza secondo l'analisi svolta dal GSE (Gestore Servizi Energetici) nel Rapporto Statistico 2021 [22]: al secondo posto troviamo l'idrico e al primo il solare. Si è scelto comunque di utilizzare in questo elaborato una turbina perché è più affidabile di un pannello solare, che nelle ore notturne non potrebbe mai produrre energia, ed è più comodo per essere collocato vicino a una strada rispetto a una centrale idroelettrica. Sempre riprendendo il Rapporto Statistico del GSE, alla fine del 2021 risultano installati in Italia 5.731 impianti eolici: sono più numerosi quelli di piccola dimensione, ma gli impianti di grande dimensione, anche se 6% del totale degli impianti, producono circa l'89% della potenza eolica totale. Nel corso del 2021, l'eolico ha prodotto energia elettrica pari a 20.927 GWh, corrispondente al 18% della produzione complessiva da fonti rinnovabili. In conclusione, come posizionamento, gli impianti eolici si trovano principalmente nel Sud Italia e la regione con la maggiore produzione di energia è la Puglia, con 5.388 GWh.

La struttura più diffusa per le turbine è quella ad asse di rotazione orizzontale con tre pale. Quelle con asse orizzontale, rispetto alle turbine con asse di rotazione verticale, sono più ingombranti, ma hanno un maggiore rendimento. In cima alla torre della turbina, che di solito è alta tra i 30 e i 120 metri, si trova la navicella, dentro la quale si trovano il rotore (di diametro tra i 20 e i 170 metri), lo statore, il moltiplicatore di giri e altri dispositivi che servono a convertire l'energia cinetica del vento in energia elettrica. Solitamente, il rotore comincia a ruotare quando il vento raggiunge una velocità superiore ai 3 m/s, mentre oltre i 25 m/s l'aerogeneratore

si arresta per motivi di sicurezza. Il vento che colpisce le pale mette in rotazione il rotore, la cui rotazione alimenta il generatore elettrico. Non tutta la potenza meccanica si può convertire in elettrica:

$$P_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (2.1)$$

rappresenta la potenza veramente convertibile da cinetica del vento a cinetica rotazionale del rotore e poi a elettrica, in cui ρ rappresenta la densità dell'aria, πR^2 l'area spazzata dalla turbina, v la velocità del vento e $C_p(\lambda, \beta)$ il coefficiente di potenza compreso tra 0 e 1. Questo dipende a sua volta da $\lambda = \frac{\Omega_r R}{v}$, che è il rapporto della velocità sulla punta delle pale (tip speed ratio), con Ω_r a simboleggiare la velocità angolare della turbina, e da β che è l'angolo che la pala offre al vento, anche detto pitch angle. Esistono dei sistemi di imbardata che permettono di modificare l'orientamento della navicella, cioè β , a seconda della direzione del vento e quindi consentono di modificare la quantità di potenza convertibile. Il massimo teorico per $C_p(\lambda, \beta)$ è 0,59, trovato sperimentalmente e noto come massimo di Betz, ma di solito si hanno valori vicini al 40%.

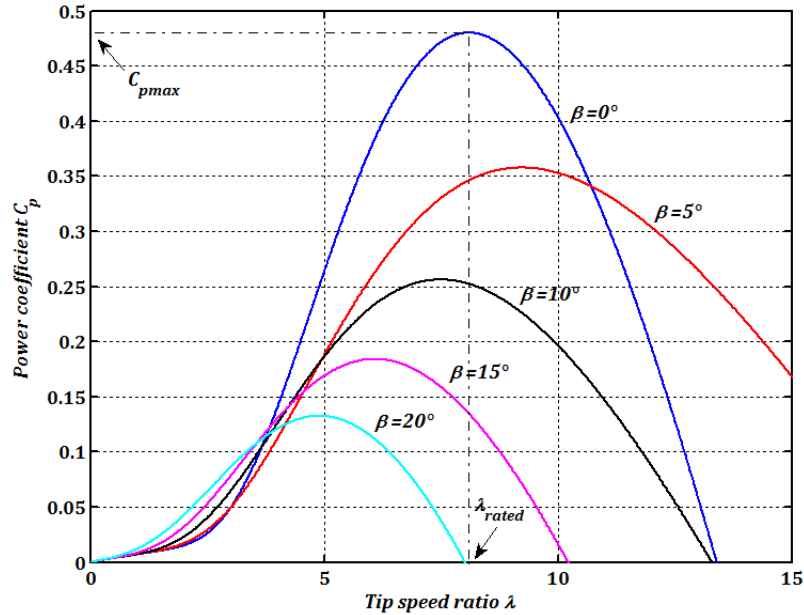


Figura 2.5. Coefficiente di potenza al variare del tip speed ratio per β fissati.

È possibile vedere come, a β fissato, esiste un Ω_r per cui si ottiene il massimo delle curve e quindi si riesce a convertire quanta più energia possibile.

La turbina di questa tesi utilizza un generatore a induzione doppiamente alimentato (DFIG). Una macchina DFIG risulta essere l'evoluzione di una Squirrel Cage Induction Machine (SCIM - Macchina a Induzione a Gabbia di Scoiattolo), il cui principio di funzionamento è abbastanza semplice. Nella SCIM il rotore presenta tre avvolgimenti, distanziati di 120° e cortocircuitati; ruota all'interno dello statore, avente anch'esso tre avvolgimenti. Su di essi, quando si connette lo statore alla rete in corrente alternata trifase, inizieranno a scorrere tre correnti che saranno una terna

simmetrica di andamento sinusoidale se la rete è bilanciata:

$$\begin{aligned} I_a &= I_0 \cos(\omega_s t) \\ I_b &= I_0 \cos(\omega_s t + \frac{2}{3}\pi) \\ I_c &= I_0 \cos(\omega_s t + \frac{4}{3}\pi) \end{aligned} \quad (2.2)$$

dove ω_s è la velocità di sincronismo pari a $2\pi f_s$ e f_s è la frequenza standard nella rete elettrica, che è di 50 Hz.

I tre avvolgimenti intorno allo statore possono essere considerati come spire: la corrente su una singola spira induce un campo magnetico, il cui verso cambia ogni semionda visto che dipende da una corrente sinusoidale. Se consideriamo anche le altre due spire, si ha sovrapposizione degli effetti e i tre campi magnetici formano un campo magnetico \vec{B} che ruota nello spazio con velocità ω_s . Nel sistema di riferimento del rotore, il campo magnetico \vec{B} ruota con velocità $\omega_{slip} = \omega_s - \omega_r$, con $\omega_r = g\Omega_r$ velocità angolare del rotore. Quando $\omega_s = \omega_r$, \vec{B} rimane costante, il flusso del campo magnetico non cambia e quindi la *fem* indotta, che è uguale a meno la derivata del flusso, è pari a zero, perciò non c'è corrente indotta. Se $\omega_s > \omega_r$, il campo ruota con ω_{slip} in senso antiorario e il flusso varia, quindi otteniamo una corrente indotta di andamento sinusoidale con pulsazione ω_{slip} : la macchina viene detta asincrona perché la pulsazione della corrente sul rotore è diversa dalla pulsazione della corrente sullo statore e ω_r non dipende dalla velocità di sincronismo, ma dal carico.

Mentre \vec{B} ruota, il flusso si riduce e la corrente, visto che dipende da una tensione di segno opposto rispetto al flusso, si oppone alla causa che l'ha generata e quindi si oppone alla riduzione. Si può rappresentare una singola spira del rotore in questo modo:

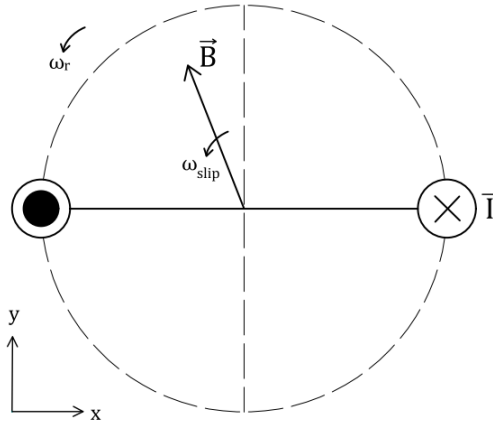


Figura 2.6. Rappresentazione del campo magnetico \vec{B} e della corrente indotta su una spira.

Considerando la forza di Laplace lungo la spira $d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$, la coppia generata da questa forza tende a far accelerare il rotore nello stesso verso in cui stava già ruotando: si definisce comportamento di subsincronismo e la rete sostiene il rotore, che preleva energia e si comporta come motore.

Se $\omega_s < \omega_r$, il campo ruota in verso opposto al caso precedente e, in questo caso, la forza di Laplace si oppone alla rotazione del rotore rallentandolo: questo comportamento si chiama sovrasincronismo e il rotore perde energia cinetica rallentando, perciò il rotore si comporta come generatore che immette energia nella rete.

In entrambi i casi, quando \vec{B} supera l'asse verticale, la corrente cambia verso lungo la spira.

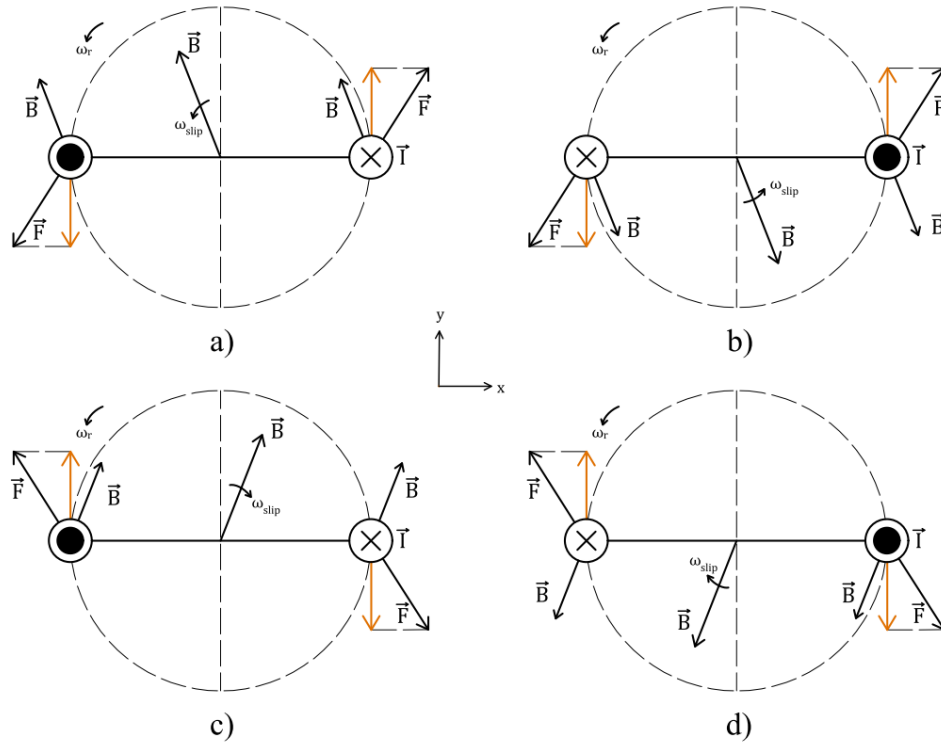


Figura 2.7. Nei casi **a** e **b** si è in subsincronismo, nei casi **c** e **d** in sovrasincronismo

Volendo usare la macchina come generatore anche in caso di subsincronismo, è sufficiente alimentare gli avvolgimenti rotorici tramite un generatore di controllo, introdotto tramite doppio convertitore o inverter (Rotor Side Inverter e Grid Side Inverter): oltre alla corrente indotta, si ha anche una corrente generata che si somma e se questa è tale da invertire il segno complessivo della corrente che si trova sull'avvolgimento, si inverte anche il segno della coppia. A questo punto si hanno due alimentazioni per il generatore, una per lo statore e una per il rotore e quindi si ha una Double Fed Induction Generator (DFIG).

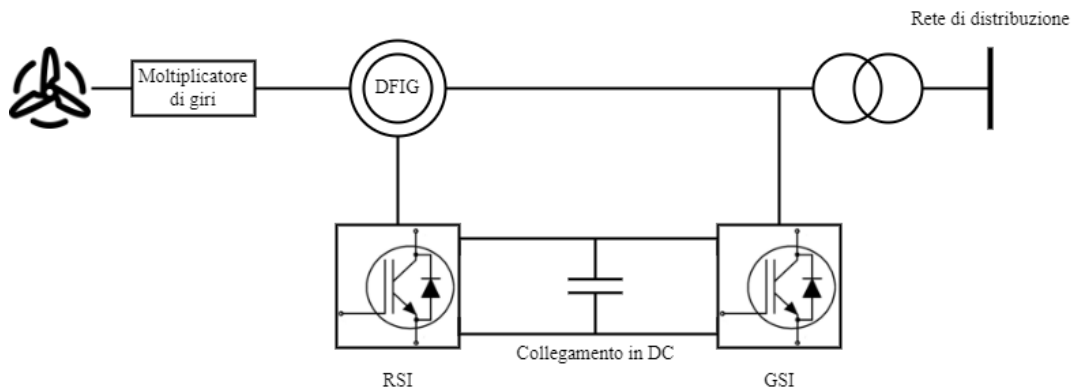


Figura 2.8. Schema della turbina con DFIG.

2.3 Model Predictive Control

La tecnica del Model Predictive Control in realtà racchiude in sé una serie di metodologie di controllo predittivo che fanno uso del modello del processo da controllare e di un valore di riferimento. La definizione del controllo si ottiene tramite la minimizzazione di una funzione obiettivo e di una previsione dell'evoluzione futura delle grandezze in gioco. Questa tecnica presenta una serie di vantaggi, tra cui la possibilità di attuare un controllo realtime, quella di applicarla a diversi processi, anche se hanno molte variabili, e può essere usata anche per processi e modelli non lineari. Ha, comunque, degli svantaggi che non la rendono la scelta ottimale in tutti i problemi di controllo. Infatti, necessita di un buon modello di processo per poter predire le grandezze di controllo e la complessità di calcolo è più alta di altri algoritmi.

Il controllo si basa sui seguenti passi:

- A partire dall'istante t , si predicono gli output futuri fino a $t + N$ con N definito come orizzonte di previsione. I valori dell'uscita $y(t+i)$ con $i = 1, \dots, N$ dipendono dall'uscita al tempo t e sui controlli futuri $u(t+k)$ con $k = 0, \dots, N-1$.
- I segnali di controllo futuri sono calcolati ottimizzando la funzione obiettivo in cui compare una traiettoria di riferimento $w(t+k)$. Di solito i termini della funzione obiettivo sono il quadrato degli errori tra il valore predetto e il riferimento.
- Il controllo $u(t)$ viene dato al processo, gli altri valori vengono scartati e all'istante $t+1$ viene rifatto tutto il procedimento di previsione.

Di solito, per l'istante finale $t + N$ si associa in funzione obiettivo un peso differente che prende il nome di "costo terminale". Questo peso, di solito diverso da quello utilizzato per gli altri istanti, permette di avere un comportamento che durante l'evoluzione si discosta dal valore di riferimento, ma che alla fine torna vicino a esso. In aggiunta, se volessimo migliorare la qualità della previsione, è possibile farlo aumentando il valore di N , ma più questo è grande, più numerosi saranno i calcoli da dover fare a ogni istante.

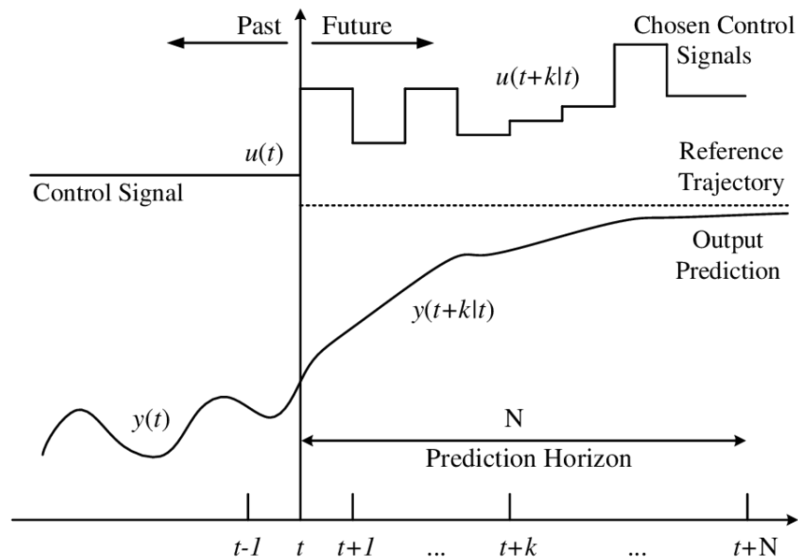


Figura 2.9. Strategia del MPC.

Il modello necessario per il MPC deve essere abbastanza completo da rappresentare la dinamica del processo, deve permettere di eseguire le predizioni e a volte è utile considerare anche un modello del disturbo. Per quanto riguarda la funzione obiettivo, sia il valore dell'orizzonte di previsione che i pesi dei vari termini, sono utilizzabili come parametri di tuning.

Il principio del receding horizon (cioè orizzonte che si allontana), che è alla base del MPC, è stato proposto nel 1963 da Propoi [30]. Il MPC divenne popolare principalmente nell'industria dei processi chimici e in generale in contesti in cui erano tecnicamente ed economicamente realizzabili modelli di processo accurati. A partire dal 2000 si è cominciato ad utilizzare nell'elettronica di potenza e nella gestione e nell'uso dell'energia all'interno degli edifici. Ad oggi ci sono diversi algoritmi usati con caratteristiche e funzionalità diverse. Tra i più usati a livello industriale si ricordano il DCM, il MAC, il PFC, l'EPSAC, l'EHAC e il GPC, che è l'algoritmo più famoso [31].

È possibile che nella realtà alcune grandezze non possano variare in un intervallo infinito, perciò si possono introdurre una serie di vincoli ai vari segnali: si parla di Constrained MPC. In questo modo, il controllo anticipa eventuali violazioni dei vincoli e corregge il segnale prima che esso infranga il limite imposto. Non soddisfare i vincoli sulle variabili da controllare può portare a dei danni ai dispositivi e una perdita di produzione, mentre i vincoli sull'input non sono molto utilizzati perché si protrebbe agganciare il controllo a un valore preciso. Attraverso i vincoli, che fanno aumentare il costo computazionale, si possono esprimere diversi comportamenti che vogliamo modellare:

- Vincolo di banda: si ha un vincolo della forma

$$\underline{y}(t) \leq y(t) \leq \bar{y}(t)$$

e si usa per rappresentare un'evoluzione che rimanga nell'intorno del valore di riferimento.

- Vincolo di sovraelongazione: si può scrivere come

$$y(t+j) \leq w(t)$$

con j tra N_1 e N_2 , che descrivono l'intervallo in cui può avvenire la sovraelongazione (se questo intervallo non è conosciuto, N_1 è pari a 1 e N_2 è pari a N).

- Vincolo per comportamento monotono: volendo evitare grandi variazioni tra un istante e l'altro, si usano vincoli di questo tipo

$$\begin{aligned} y(t+j) &\leq y(t+j+1) \quad \text{se } y(t) < w(t) \\ y(t+j) &\geq y(t+j+1) \quad \text{se } y(t) > w(t) \end{aligned}$$

- Vincolo per comportamento a fase non minima: se si vuole prevenire la presenza nella funzione di trasferimento di poli o zeri a parte reale positiva, si possono introdurre vincoli della forma

$$\begin{aligned} y(t+j) &\leq y(t) \quad \text{se } y(t) < w(t) \\ y(t+j) &\geq y(t) \quad \text{se } y(t) > w(t) \end{aligned}$$

Infine, è importante considerare che, ottenendo il controllo tramite un problema di ottimizzazione di funzione obiettivo, è molto semplice realizzare un controllo con vari obiettivi, anche se potrebbero essere contrastanti. Si inseriscono nella funzione obiettivo tutti i termini di cui si vuole ottenere un andamento preciso nella forma $\alpha(y(t+j) - y_{ref})^2$ e variando i pesi associati a ogni termine si dà priorità a un determinato obiettivo.

Capitolo 3

Formalizzazione e Modello

Come enunciato in 1.2, in questo elaborato ci sono quattro obiettivi di controllo: soddisfare in modo ottimale la richiesta di ricarica dei veicoli, evitare eccessivi scostamenti da zero e picchi nella potenza richiesta alla rete, mantenere la velocità angolare del rotore e l'energia immagazzinata nello storage vicine a un valore di riferimento. Ognuno di essi viene implementato da almeno un termine nella funzione obiettivo:

$$\begin{aligned} \min_u \Big\{ & s_1(x_1(t_i + N) - x_1^{ref})^2 + s_2(x_2(t_i + N) - x_2^{ref})^2 + \\ & + \sum_{t=t_i}^{t_i+N-1} \left[q_1(x_1(t) - x_1^{ref})^2 + q_2(x_2(t) - x_2^{ref})^2 + \right. \\ & \left. + rp(t)^2 + r_s(p(t) - p(t-1))^2 + c(u^{ev}(t) - \hat{u}^{ev}(t))^2 \right] \Big\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

in cui N è l'orizzonte di previsione, $x_1(t)$ rappresenta l'energia dello storage, $x_2(t)$ la velocità angolare del rotore, $p(t)$ la potenza al punto d'allaccio con la rete, $u^{ev}(t)$ la potenza data ai veicoli e $\hat{u}^{ev}(t)$ la potenza richiesta dai veicoli. Con le x viene indicato lo stato e con le u il controllo. Andando per ordine, i primi due termini rappresentano i costi terminali per lo stato, che poi compaiono nuovamente all'interno della sommatoria con pesi denominati in modo differente; per quanto riguarda la $p(t)$ abbiamo due termini in funzione obiettivo perché il primo garantisce che non ci sia un grande distacco da 0, mentre il secondo permette di avere un profilo smooth, mantenendo $p(t)$ vicino al valore precedente; infine l'ultimo termine della funzione obiettivo modella la soddisfazione al meglio della richiesta fatta dai veicoli alla stazione.

Per quanto riguarda la turbina, il controllo avviene tramite la velocità angolare del rotore. Per capirne il motivo, bisogna cominciare ad analizzare il modello dinamico della turbina, perciò si scrivono le equazioni alle maglie per ciascun avvolgimento.

$$\begin{aligned} V_{sk} &= R_s I_{sk} + \frac{d}{dt} \phi_{sk} \\ V_{rh} &= R_r I_{rh} + \frac{d}{dt} \phi_{rh} \end{aligned} \quad (3.2)$$

dove ϕ è il flusso che dipende da un'induttanza mutua, cioè un'induttanza che dipende dalla posizione reciproca delle terne e, quindi, il flusso dipende da funzioni trigonometriche. Il modello diventa perciò troppo complicato, inoltre le variabili

di Kirchhoff non sono buone variabili per rappresentare i gradi di libertà, cioè lo sfasamento tra le terne e il modulo dei vettori. Si usa la trasformata di Park per ottenere un modello più semplice:

$$\begin{aligned}\frac{dI_{dr}}{dt} &= -\frac{R_r}{L'_r}I_{dr} + \omega_{slip}I_{qr} + \frac{1}{L'_r}V_{dr} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} &= -\frac{R_r}{L'_r}I_{qr} - \omega_{slip}I_{dr} - \omega_{slip}\frac{NV_s}{L'_rL_s\omega_s} + \frac{1}{L'_r}V_{qr} \\ \frac{d\omega_{slip}}{dt} &= \frac{NV_s}{JL_s\omega_s}I_{qr} - \frac{\tau_m}{M} - \frac{F}{M}\omega_{slip}\end{aligned}\quad (3.3)$$

e le uscite sono pari a

$$\begin{aligned}P_s &= -\frac{NV_s}{L_s}I_{qr} \\ Q_s &= \frac{V_s^2}{L_s\omega_s} - \frac{NV_s}{L_s}I_{dr}\end{aligned}\quad (3.4)$$

Variabile	Significato
I_{dr}, I_{qr}	Corrente diretta e in quadratura del rotore.
V_{dr}, V_{qr}	Tensione diretta e in quadratura del .
V_s	Tensione dello statore.
R_r	Resistenza degli avvolgimenti di rotore.
L'_r	Induttanza transitoria del rotore.
L_s	Induttanza degli avvolgimenti di statore.
N	Induttanza magnetica.
M	Inerzia della macchina.
F	Coefficiente di attrito viscoso.
τ_m	Coppia magnetica del rotore.
P_s, Q_s	Potenza attiva e reattiva dello statore.

Tabella 3.1. Tabella dei simboli.

È sempre un modello non lineare, però molto più semplice visto che non ci sono non linearità trigonometriche. τ_m rappresenta un disturbo che voglio reiettare e per questo si usa l'ingresso, tramite il quale si possono anche disaccoppiare le correnti. Infatti, scegliendo una legge di controllo in funzione dello stato e di un nuovo ingresso \tilde{u} si ottiene:

$$\begin{aligned}V_{dr} &= -L'_r\omega_{slip}I_{qr} + \tilde{V}_{dr} \\ V_{qr} &= L'_r(\omega_{slip}I_{dr} + \omega_{slip}\frac{NV_s}{L'_rL_s\omega_s}) + \tilde{V}_{qr}\end{aligned}\quad (3.5)$$

Sostituendo in (3.3) le equazioni sopra riportate, si ottengono le seguenti equazioni di stato:

$$\begin{aligned}\frac{dI_{dr}}{dt} &= -\frac{R_r}{L'_r}I_{dr} + \frac{1}{L'_r}\tilde{V}_{dr} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} &= -\frac{R_r}{L'_r}I_{qr} + \frac{1}{L'_r}\tilde{V}_{qr} \\ \frac{d\omega_{slip}}{dt} &= \frac{NV_s}{JL_s\omega_s}I_{qr} - \frac{\tau_m}{M} - \frac{F}{M}\omega_{slip}\end{aligned}\quad (3.6)$$

A questo punto, le dinamiche delle prime due variabili di stato sono indipendenti e per attuare il controllo dell'uscita P_s , che è quella di interesse, basterà stabilizzare I_{qr} . Regolando questa corrente, anche ω_{slip} subisce l'effetto della regolazione visto che dipende da essa. Controllando la velocità angolare del rotore, si può regolare la potenza elettrica generata dalla turbina: facendo accelerare il rotore, la turbina immagazzina energia meccanica, che poi può essere rilasciata come elettrica diminuendo la velocità angolare. Per questo motivo compare il termine relativo alla velocità in (3.1).

Oltre alla funzione obiettivo, nel modello troviamo una serie di vincoli per limitare le varie grandezze ed evitare potenziali malfunzionamenti dei dispositivi. Dividendo i vari vincoli in base a quale termine della funzione obiettivo si riferiscono e analizzando il disturbo, si ottengono i seguenti elementi.

3.0.1 Storage $x_1(t)$

$$\begin{aligned} x_1(t+1) &= x_1(t) + Tu^{ess}(t) \\ x_1^{min}(t) &\leq x_1(t) \leq x_1^{max}(t) \\ -u^{ess,max}(t) &\leq u^{ess}(t) \leq u^{ess,max}(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

in cui T è il tempo di campionamento e $u_{ess}(t)$ è la potenza assorbita dalla rete, se maggiore di zero, o rilasciata dalla storage, se minore, e permette il controllo del processo di carica e scarica della batteria tramite un inverter. Il primo vincolo rappresenta l'evoluzione dello stato di carica della batteria: all'istante $t+1$ la carica è aumentata o diminuita rispetto a quella al tempo t di una quantità che dipende dalla potenza assorbita o rilasciata. Il secondo vincolo impone un limite alla quantità di carica che lo storage può immagazzinare, mentre l'ultimo limita con una banda simmetrica la potenza dello storage.

3.0.2 Velocità angolare $x_2(t)$

$$\begin{aligned} x_2(t+1) &= x_2(t) + \frac{T}{M}(w^{res}(t) - u^{res}(t)) \\ x_2^{min}(t) &\leq x_2(t) \leq x_2^{max}(t) \\ 0 &\leq u^{res}(t) \leq u^{res,max} \end{aligned} \quad (3.8)$$

in cui $w^{res}(t)$ rappresenta la potenza meccanica prodotta dalla turbina convertibile, cioè (2.1), e $u^{res}(t)$ rappresenta la potenza elettrica immessa dalla turbina in rete, cioè la potenza attiva P_s in (3.4).

La prima equazione modella l'evoluzione della velocità angolare ed è la discretizzazione della (3.6). $w^{res}(t)$ è un disturbo non noto e, regolando $u^{res}(t)$, si può accelerare o rallentare la turbina: se $u^{res}(t) < w^{res}(t)$, $x_2(t)$ aumenta; se $u^{res}(t) > w^{res}(t)$, diminuisce. In questo modo è possibile far lavorare la turbina come storage di energia cinetica: grazie all'orizzonte di previsione, il rotore è cosciente del profilo della richiesta dei veicoli e per questo può accelerare per accumulare energia che può rilasciare quando necessario. Poi si ha il vincolo che limita la velocità angolare non permettendo uno scostamento elevato dal valore di riferimento ω_s (al massimo si può scostare del 30%) perché, superato il valore di soglia, la velocità diverge e i convertitori non riescono a riportare la velocità vicino al riferimento. Infine, l'ultimo vincolo impone alla potenza elettrica un limite superiore e uno inferiore, che è pari a zero visto che la turbina non prende potenza dalla rete.

3.0.3 Potenza all'allaccio $p(t)$

$$\begin{aligned} p(t) &= u^{ess}(t) + u^{ev}(t) - u^{res}(t) \\ 0 &\leq p(t) \leq p^{max}(t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

In questo caso, il primo vincolo è un'equazione di bilanciamento: la potenza data o prodotta dallo storage più la potenza data ai veicoli meno la potenza data dalla turbina è uguale alla potenza che viene chiesta alla rete per soddisfare la richiesta nel caso in cui $u^{ess}(t)$ e $u^{res}(t)$ non dovessero bastare. Inoltre, come si vede da questo vincolo, l'obiettivo di non avere un'alta potenza all'allaccio e l'obiettivo di soddisfare la richiesta dei veicoli entrano in conflitto perché, mettendo una bassa $u^{ev}(t)$, $p(t)$ è piccola, ma non viene soddisfatta la richiesta e viceversa. Infatti, per evitare che entrino troppo in conflitto si usa lo storage con $u^{ess}(t)$ e la turbina con $u^{res}(t)$, per quanto anch'esse abbiano dei limiti che possono portare a conflitti. La seconda equazione vincola il valore della potenza $p(t)$, con limite inferiore zero visto che la rete non assorbe potenza dalla stazione di ricarica.

3.0.4 Potenza data ai veicoli $u^{ev}(t)$

$$0 \leq u^{ev}(t) \leq \hat{u}^{ev}(t) \quad (3.10)$$

Questa grandezza è vincolata inferiormente con zero perché non è implementato il Vehicle to Grid (V2G) e superiormente con $\hat{u}^{ev}(t)$ perché sarebbe inutile superare la richiesta dei veicoli.

3.0.5 Potenza meccanica convertibile $w^{res}(t)$

Per modellare il disturbo $w^{res}(t)$ attraverso il vero input esogeno v_{wind} si usano queste tre equazioni:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\Omega_r R}{v} \\ C_p(\lambda) &= 0.73 \left(\frac{151}{\lambda} - 13.2 \right) e^{\frac{-18.4}{\lambda}} \\ P_r &= \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \end{aligned} \quad (3.11)$$

i cui simboli sono gli stessi spiegati e utilizzati in (2.1) con $\beta = 0$. Come detto in precedenza, $w^{res}(t)$ è uguale a P_r , perciò avendo un modello dell'andamento del vento, si può ottenere un profilo della potenza meccanica generata. Poiché la differenza possibile tra la velocità angolare del rotore e quella di sincronismo è piccola (la prima può scostarsi al massimo del 30%) si può fare un'approssimazione per calcolare λ sostituendo Ω_r con $\frac{\omega_s}{g}$, dove g rappresenta il moltiplicatore di giri (già visto in 2.2) e permette di convertire la velocità angolare della turbina in quella del rotore, che con questa semplificazione assumiamo essere la velocità di sincronismo, e viceversa.

Capitolo 4

Simulazioni

In questo capitolo verranno analizzate due simulazioni che cambiano in base al profilo scelto per la \hat{u}_{ev} e per la velocità del vento v_{wind} , quindi w_{res} . In 4.1 si trovano i valori dei pesi e dei vincoli utilizzati, mentre nelle sezioni successive è presente la trattazione delle due simulazioni.

4.1 Case Study

Come illustrato nella Figura 2.1, è stata considerata una stazione con 10 punti di ricarica, ognuno da massimo 50kW, collocata vicino a un'autostrada o una grande strada non urbana, visto il servizio di ricarica rapida e considerata la presenza della turbina eolica. Quest'ultima ha raggio 6m, un momento angolare pari a $3.000 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}}$ e il valore di g , cioè il moltiplicatore di giri, è 106,32, mentre la velocità angolare del rotore è inizializzata con il valore della velocità di sincronismo e può scostarsi da esso al massimo del 30%. Infine, la densità dell'aria vale $1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Per quanto riguarda lo storage, questo ha la possibilità di immagazzinare fino a 300kWh e inizialmente ha carica pari a 170kWh. I pesi della funzione obiettivo sono stati scelti per dare maggiore importanza alla soddisfazione della richiesta con c che è uguale a 25, il secondo obiettivo a livello di importanza è quello relativo alla potenza all'allaccio con r pari a 15 e r_s a 8. Infine, i pesi dati all'evoluzione dello storage e della velocità del rotore sono simili: con 5 e 1,5 come q_1 e q_2 e con 6 e 5,5 per s_1 e s_2 .

Variabile	Valore	Variabile	Valore
q_1	5	s_1	6
q_2	1,5	s_2	5,5
r	15	r_s	8
c	25	β	0
$u^{ess,max}$	200kW	$u^{res,max}$	200kW
x_1^{min}	0kWh	x_1^{max}	300kWh
$x_{1,0}$	170kWh	x_1^{ref}	170kWh
x_2^{min}	$219,8 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	x_2^{max}	$408,2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
$x_{2,0}$	$314 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	x_2^{ref}	$314 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
M	$3.000 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}}$	ρ	$1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
R	6m	g	106,32

Tabella 4.1. Tabella dei valori per le simulazione.

In entrambe le simulazioni sono stati utilizzati questi valori ed eventuali variazioni verranno specificate in seguito. Il tempo di campionamento T è di 5 minuti, l'orizzonte di previsione N è 36 passi, cioè tre ore, e la durata della simulazione è di 288 passi, cioè ventiquattro ore.

Nelle considerazioni fatte sui grafici, per non appesantire la lettura, è stata omessa la dipendenza del tempo delle potenze e degli stati.

4.2 Prima Simulazione

In questa simulazione è stato utilizzato un profilo del vento costante a $11 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ e una \hat{u}^{ev} che ha la forma di una campana gaussiana.

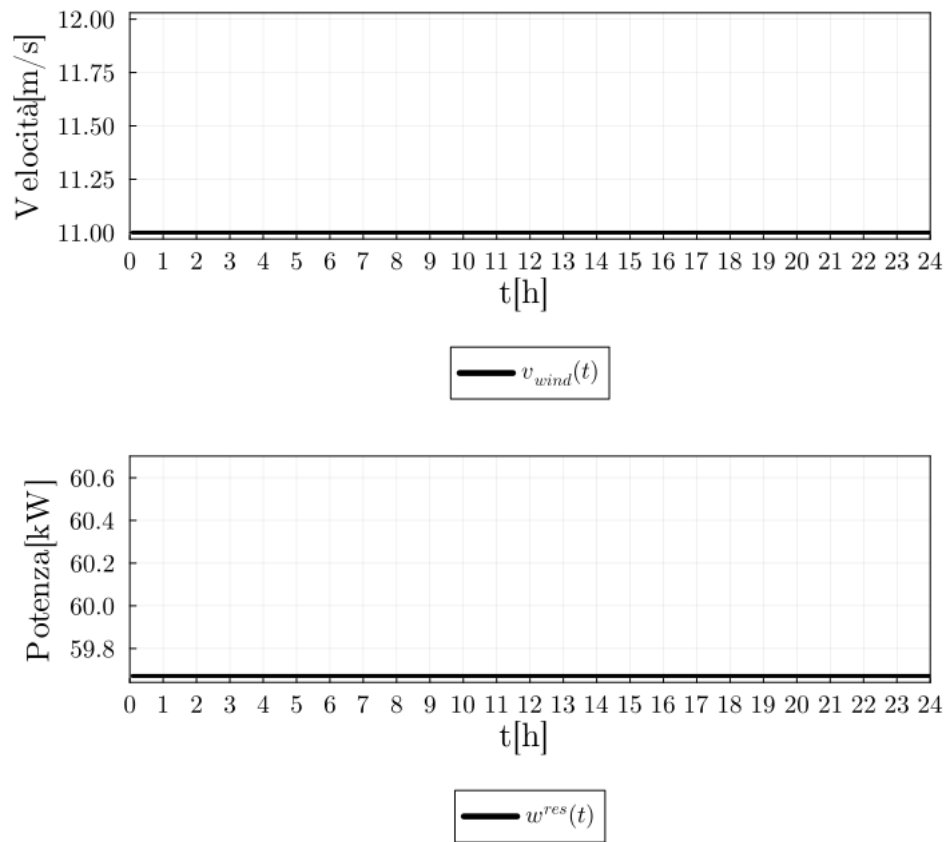


Figura 4.1. Profilo del vento e conseguente $w^{res}(t)$.

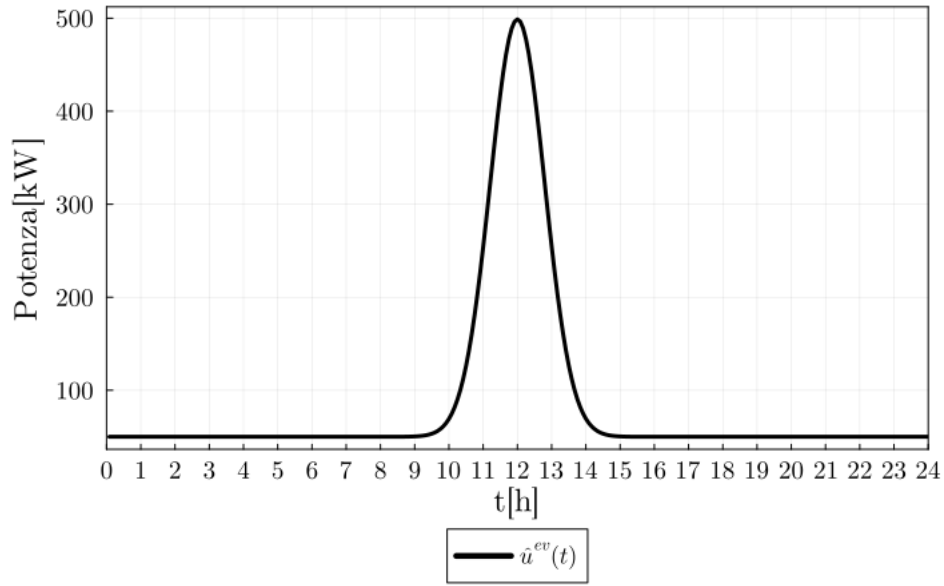
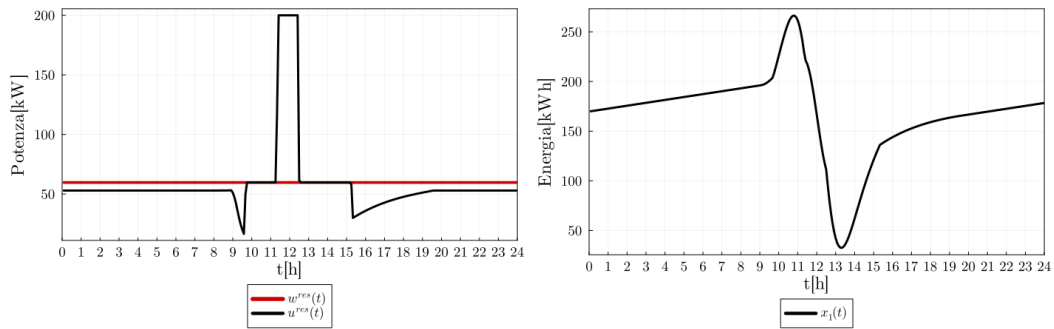


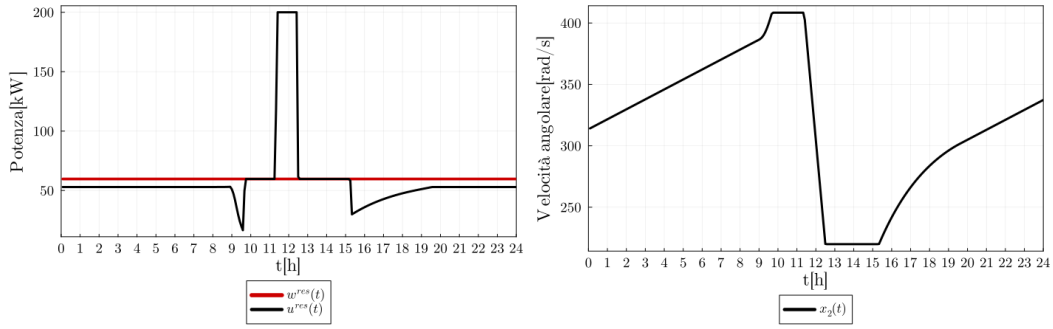
Figura 4.2. Richiesta dei veicoli $\hat{u}^{ev}(t)$.

È una simulazione abbastanza semplice, ma utile per la validazione del modello dato che si possono fare delle supposizioni sui risultati del controllo: lo storage dovrebbe caricarsi prima della salita e poi scaricarsi, mentre la turbina dovrebbe prima accelerare e poi rallentare. Infatti, attraverso l'orizzonte di previsione, alle ore 10, lo storage e la turbina "vedono" il picco massimo e perciò si preparano a rilasciare potenza.



(a) Potenza relativa allo storage $u^{ess}(t)$. (b) Stato di carica dello storage $x_1(t)$.

Figura 4.3. Evoluzione dello storage.



(a) Potenze della turbina $u^{res}(t)$ e $w^{res}(t)$. (b) Velocità angolare del rotore $x_2(t)$.

Figura 4.4. Evoluzione della turbina.

Come si evince dai grafici, lo storage si carica visto che u^{ess} è di poco maggiore di zero e quindi assorbe potenza dalla stazione, invece quando "vede" il picco di richiesta si carica più velocemente, poi rilascia molta energia intorno alle 12 e infine si ricarica per riavvicinarsi al riferimento.

La velocità del rotore della turbina ha un comportamento simile: inizialmente la potenza erogata dalla turbina è più bassa della w^{res} , in modo che il rotore possa accelerare, poi poco prima delle 10 "vede" il picco grazie all'orizzonte di previsione e u^{res} diminuisce finché x_2 non raggiunge $408,2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ e poi la u^{res} sale fino a 200kW per far rallentare fino al minimo la velocità del rotore; dopo la campana ha un andamento quasi simmetrico rispetto al centro per far riaccelerare il rotore. In questo modo, la turbina si comporta come storage, raggiungendo sia il limite massimo di velocità intorno alle 10 che il limite minimo intorno alle 13 a seguito del culmine della domanda: in questi momenti la u^{res} è uguale alla w^{res} in modo che la differenza tra la potenza meccanica e quella elettrica sia zero e la velocità angolare non vari. Infine, tenendo dei conto dei diversi pesi dei due stati in funzione obiettivo, si nota la diversa partecipazione dello storage e della turbina, che come detto prima, raggiunge i limiti sia di potenza erogabile che di velocità del rotore.

Inoltre, osservando il grafico relativo alla potenza all'allaccio, si può notare che questa segue un profilo più morbido rispetto a quello delle altre potenze in gioco.

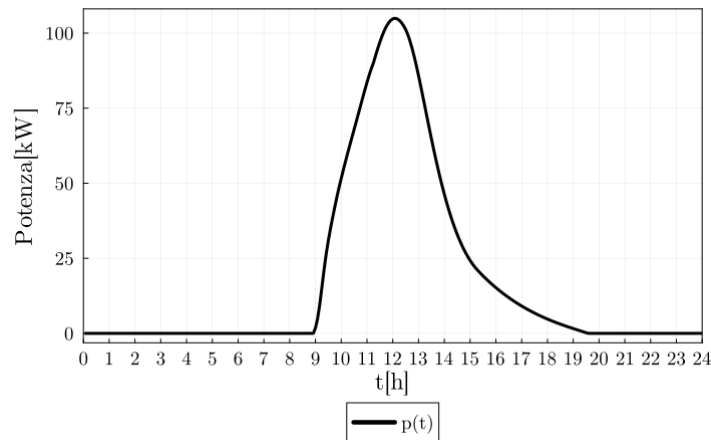


Figura 4.5. Potenza all'allaccio $p(t)$.

I valori lungo tutta la curva sono circa un quinto della richiesta, perché la turbina e lo storage riescono a soddisfarla facilmente, e la p interviene solo nel momento di alta domanda: all'inizio è identicamente nulla, ma con il proseguire del tempo deve necessariamente aumentare per soddisfare l'alta richiesta, perché storage e turbina hanno evoluzioni vincolate.

Dai grafici successivi si osserva come i contributi delle potenze p , u^{ess} e u^{res} siano effettivamente diversi.

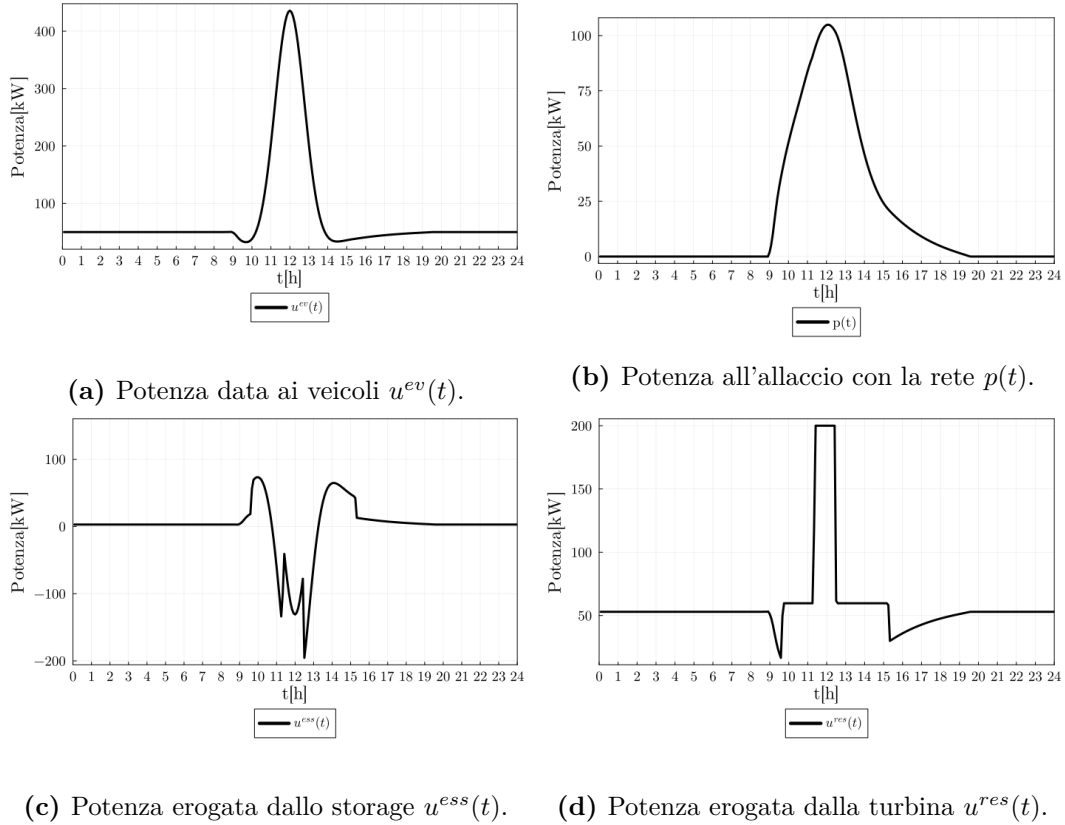


Figura 4.6. Contributi delle varie potenze.

La p dà il contributo minore delle tre potenze che alimentano la stazione perché storage e turbina si preparano proprio per compensare il momento di culmine della richiesta e, visto che la campana è di breve durata, riescono a sostenere la rete senza che la potenza all'allaccio sia troppo elevata. Infine, la u^{ev} soddisfa la richiesta in modo ottimale.

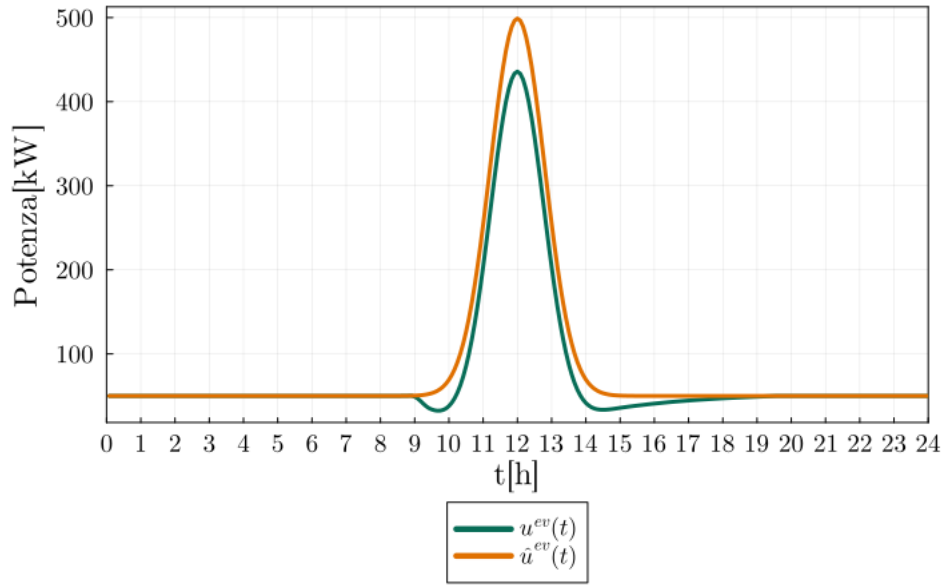


Figura 4.7. Differenza tra $u^{ev}(t)$ e $\hat{u}^{ev}(t)$.

La differenza tra domanda e offerta è di circa 50kW nel punto di picco, però aumentando il peso c si predilige avere una u^{ev} più vicina alla \hat{u}^{ev} a discapito della p e della u^{ess} : sicuramente u^{res} non può fare da ulteriore sostegno perché dai precedenti grafici (in particolare [Figura 4.4b](#)) si vede che, a seguito del punto di picco della campana, la turbina rallenta fino al limite inferiore e quindi non può erogare potenze maggiori.

4.3 Seconda Simulazione

Per quanto riguarda la seconda simulazione, è stato modificato il profilo della potenza meccanica w^{res} a partire dal modello del vento secondo le equazioni (3.11) e l'assunzione fatta a fine [Capitolo 3](#).

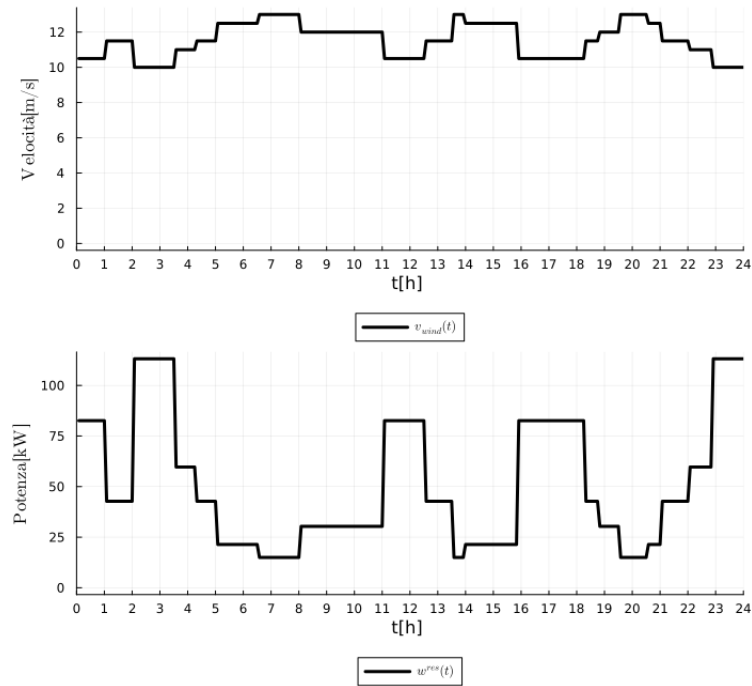


Figura 4.8. Profilo del vento e conseguente $w^{res}(t)$.

Non è un modello del vento perfetto, perché si dovrebbe sovrapporre all'andamento della velocità un segnale di rumore. In questo caso, anche la richiesta dei veicoli è diversa, con picchi e momenti di vuoto, seguendo un profilo coerente con quelle che potrebbero essere le abitudini dei guidatori che passano da questa stazione di ricarica lungo l'autostrada.

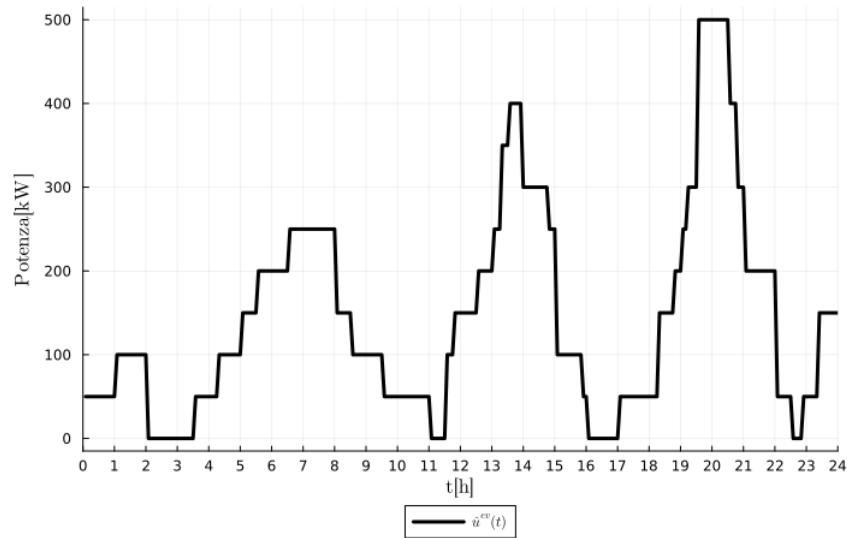


Figura 4.9. Richiesta dei veicoli $\hat{u}^{ev}(t)$.

Piuttosto che considerare un andamento continuo, si è scelto un segnale discreto: ogni 5 minuti, che è il tempo di campionamento, la stazione registra l'arrivo di nuovi veicoli, rappresentati con l'incremento della richiesta di 50kW, o l'uscita di veicoli che hanno completato la ricarica, rappresentati da un decremento di 50kW. In seguito, vengono proposti due risultati simulativi differenti a seconda dei pesi utilizzati in funzione obiettivo.

4.3.1 Simulazione 2.1

In questa sottosezione i pesi utilizzati sono gli stessi presenti nella [Tabella 4.1](#). Il secondo obiettivo, cioè quello di avere una bassa potenza all'allaccio, viene abbastanza soddisfatto.

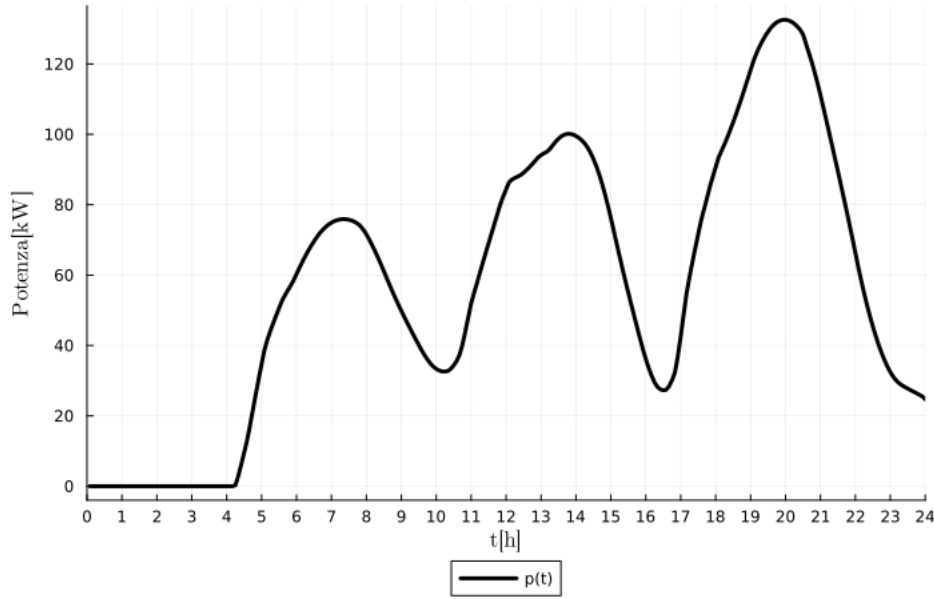


Figura 4.10. Potenza all'allaccio $p(t)$.

La p , infatti, partecipa in modo significativo solo nei momenti di picco della richiesta e, similmente alla prima simulazione, i valori massimi che raggiunge sono circa un quarto di quelli della \hat{u}^{ev} : avere una potenza assorbita dalla rete identicamente nulla risulta impossibile se si vuole soddisfare la domanda di potenza dei clienti. Inoltre il profilo della p è molto meno spigoloso rispetto a quello della richiesta, grazie al termine in funzione obiettivo accompagnato dal peso r_s . Confrontando u^{ev} e \hat{u}^{ev} , si può notare come la differenza tra le due potenze non è molto grande e quindi si può considerare soddisfatto anche il primo obiettivo.

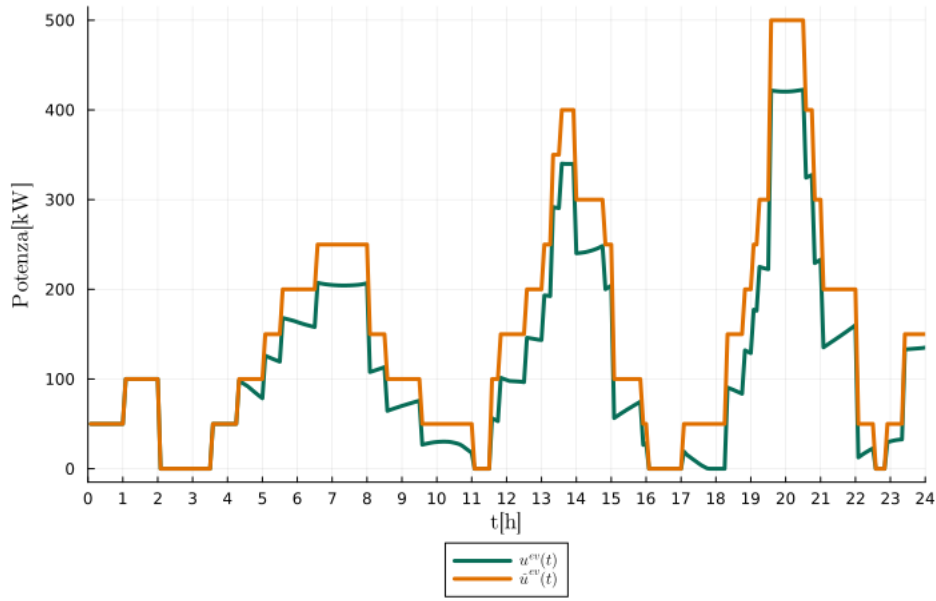


Figura 4.11. Potenza data e richiesta dai veicoli.

La potenza data ai veicoli coincide con la domanda fino alle 4:30; successivamente, l'offerta rimane vicina ma non riesce a eguagliare l'assorbimento previsto fino agli istanti finali.

La u^{ev} si ottiene tramite la somma di p , u^{ess} e u^{res} secondo la formula:

$$u^{ev}(t) = p(t) + u^{res}(t) - u^{ess}(t) \quad (4.1)$$

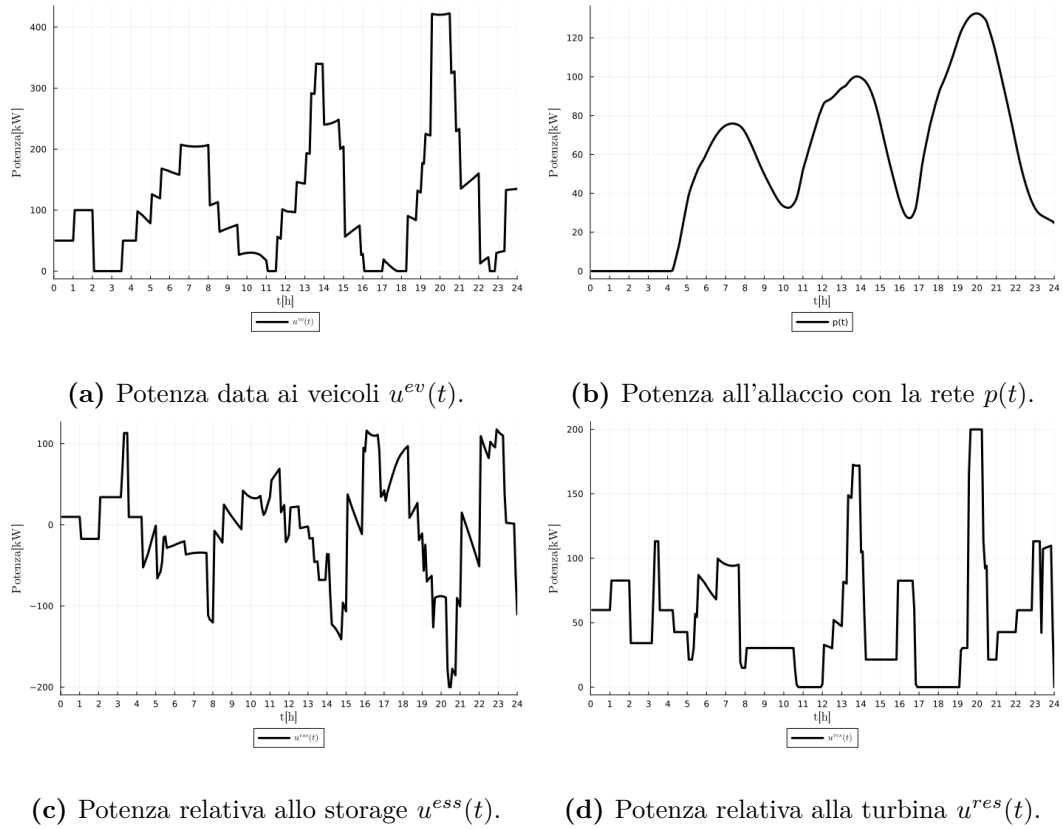
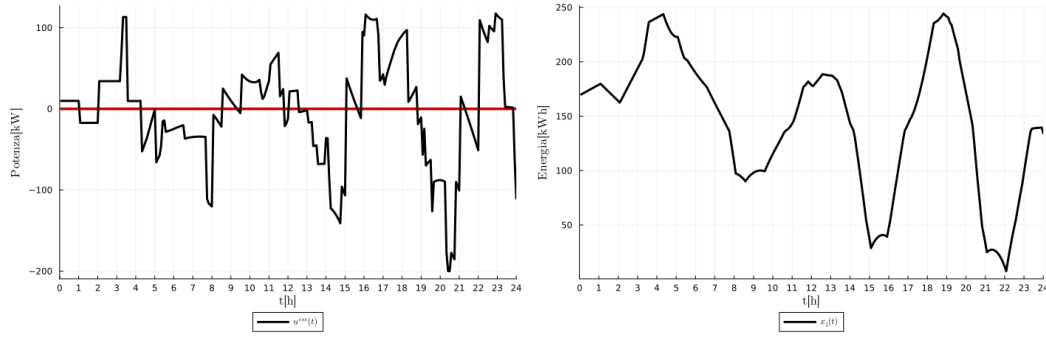


Figura 4.12. Contributi delle varie potenze.

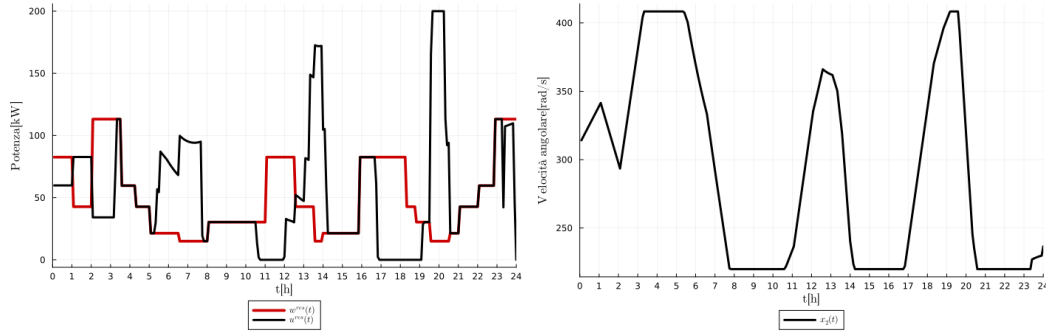
La p , come descritto in precedenza, interviene quando c'è un picco di richiesta, mentre le altre fonti fanno da supporto nei limiti imposti dai vincoli sulle potenze e da quelli sull'evoluzione della velocità angolare del rotore e sull'evoluzione dello storage. Nei momenti iniziali, storage e turbina bastano per soddisfare la domanda. Osservando i vari grafici, viene sottolineato il conflitto tra p bassa e u^{ev} vicina a \hat{u}^{ev} : nei momenti in cui intervengono solo le potenze della turbina e dello storage, l'offerta coincide con la domanda, mentre, quando si hanno culmini di richiesta, la potenza assorbita dalla rete è diversa da zero e il bisogno per la ricarica non viene soddisfatto completamente.

Basandosi sui pesi differenti in (3.1), si può studiare l'evoluzione dei due stati.



(a) Potenza relativa allo storage $u_{ess}(t)$. (b) Stato di carica dello storage $x_1(t)$.

Figura 4.13. Evoluzione dello storage.



(a) Potenze della turbina $u_{res}(t)$ e w_{res} . (b) Velocità angolare del rotore $x_2(t)$.

Figura 4.14. Evoluzione della turbina.

Nei momenti in cui la potenza richiesta è minore, lo storage si carica, con una u^{ess} maggiore di zero, e la turbina accumula velocità, con u^{res} minore di w^{res} , in modo che possano rilasciare più potenza nel momento del bisogno, in cui x_2 è uguale a x_2^{min} perché le potenze della turbina sono uguali. Lo storage ha un'evoluzione simile, ma, visto che ha un peso maggiore in (3.1) si mantiene più vicino a 170 kWh e la turbina compie un maggiore sforzo durante il processo di ricarica. Quando rilasciano potenza, lo storage si scarica e u^{ess} diminuisce, come si può notare nella **Figura 4.13** negli istanti vicini alle 20:30; il rotore rallenta con u^{res} che è uguale a w^{res} nei momenti in cui la velocità è pari al minimo $219,8 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, come per esempio tra le 8 e le 10:30, tra le 14:15 e le 17 e tra le 20:45 e le 23:15. Come detto per la **Figura 4.7**, se si aumenta il valore di c per soddisfare in modo ancor più ottimale la richiesta, si può aumentare soltanto il contributo della potenza rilasciata dallo storage e della potenza assorbita dalla rete.

4.3.2 Simulazione 2.2

In questo caso, per evidenziare quanto detto sopra, il peso c relativo al soddisfacimento della richiesta dei veicoli è stato quadruplicato e posto uguale a 100. Visto il forte aumento di c , la richiesta viene soddisfatta quasi completamente.

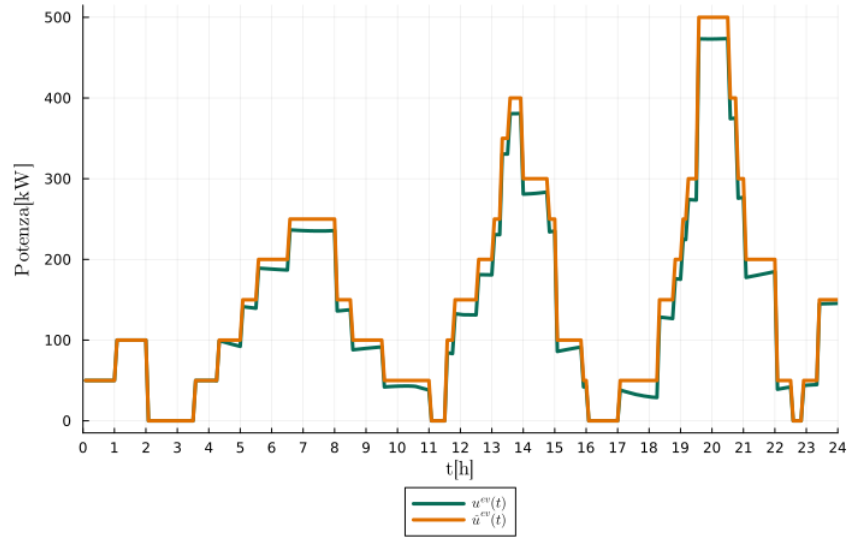
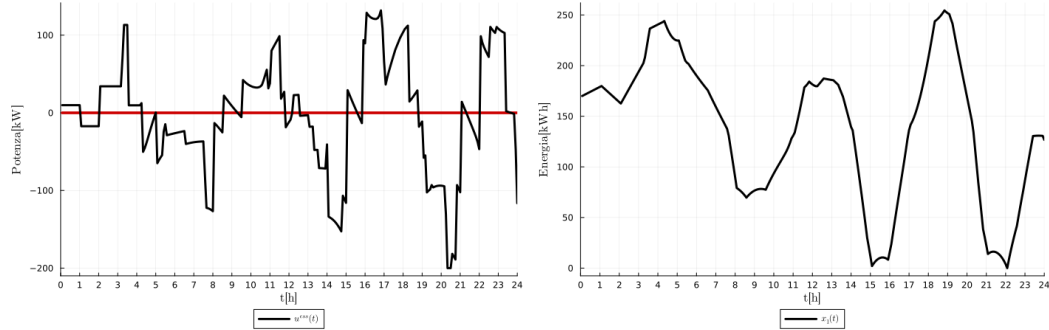


Figura 4.15. Potenza data e richiesta dai veicoli.

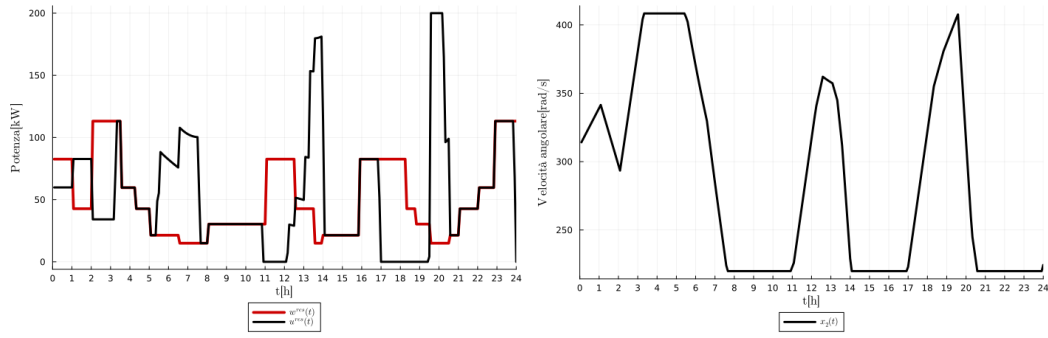
Come in 4.3.1, la richiesta fino alle 4:30 è pienamente soddisfatta; oltre quel punto, lo scostamento è di circa una decina di kiloWatt, al massimo di alcune decine intorno alle 20.

Studiando l'evoluzione degli stati, si nota quanto supposto a fine 4.3.1.



(a) Potenza relativa allo storage $u^{ess}(t)$. (b) Stato di carica dello storage $x_1(t)$.

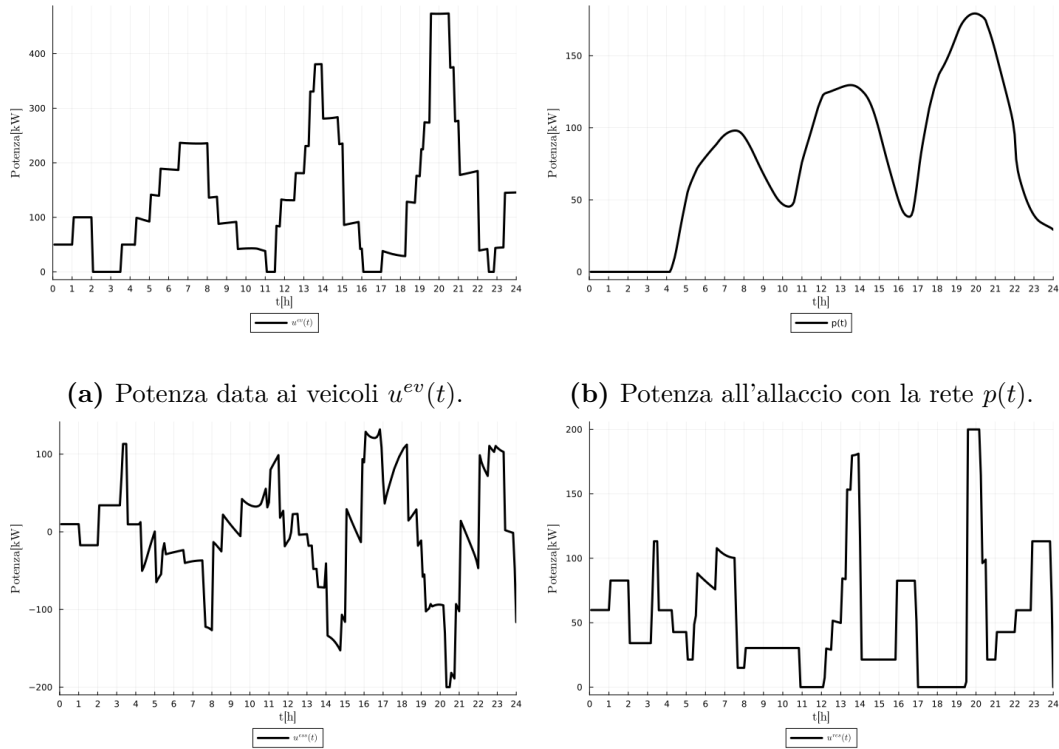
Figura 4.16. Evoluzione dello storage.



(a) Potenze della turbina $u^{res}(t)$ e w^{res} . (b) Velocità angolare del rotore $x_2(t)$.

Figura 4.17. Evoluzione della turbina.

La turbina raggiunge comunque i limiti x_2^{min} e x_2^{max} e la potenza u^{res} non è cambiata. Lo storage, invece, subisce delle variazioni maggiori rispetto al caso precedente, arrivando, poco dopo le 22 (momento in cui la turbina ha già raggiunto x_2^{min}), al valore minimo. In quel punto la potenza u^{ess} da sopra lo zero diventa negativa per poi risalire dopo: lo storage assorbe potenza dalla stazione ricaricandosi. Oltre alla potenza erogata dallo storage, aumenta anche quella assorbita dalla rete rispetto al caso precedente.



(a) Potenza data ai veicoli $u^{ev}(t)$. (b) Potenza all'allaccio con la rete $p(t)$.
(c) Potenza relativa allo storage $u^{ess}(t)$. (d) Potenza relativa alla turbina $u^{res}(t)$.

Figura 4.18. Contributi delle varie potenze.

La p , anche se aumentata, risulta comunque essere molto inferiore della u^{ev} per continuare a soddisfare il secondo obiettivo. La u^{res} è rimasta la stessa, mentre la u^{ess} arriva anche al limite inferiore di -200kW intorno alle 20:30. In generale, si è scelto di dare minore importanza agli obiettivi imposti alla turbina e allo storage perché, dal punto di vista del gestore dell'area di servizio, si è immaginato che gli scopi principali fossero quelli di soddisfare il cliente che vuole ricaricare il proprio veicolo e avere un basso costo per la potenza assorbita dalla rete.

Capitolo 5

Conclusioni

Dai risultati del [Capitolo 4](#) si può notare che lo storage rimane un elemento di supporto, così come la turbina visto che è una fonte stocastica e non sempre affidabile. Inoltre, si nota che la potenza all'allaccio con la rete è fondamentale per soddisfare la richiesta, ma l'obiettivo che punta a minimizzare questa potenza entra in conflitto con la soddisfazione della domanda. Formalizzato lo strumento di controllo, starà poi al proprietario della stazione scegliere quale obiettivo prediligere tra i quattro individuati in questo elaborato.

Per quanto riguarda possibili sviluppi futuri, un primo passo sarebbe quello di applicare questo controllo tramite MPC al modello del processo reale, senza l'assunzione fatta alla fine del [Capitolo 3](#): si dovrebbe calcolare la w_{res} a partire dalla velocità angolare del rotore, cioè da x_2 , portando ad avere un problema di ottimizzazione quadratico con vincoli non lineari.

Inoltre, si potrebbero introdurre, come studiato in alcuni articoli citati nell'introduzione (es. [\[3\]](#) e [\[4\]](#)), dei pannelli solari a supporto per avere maggiore stabilità durante il giorno.

Infine, progetti successivi potrebbero prevedere un aggiuntivo supporto alla rete tramite i veicoli: la tecnologia V2G (Vehicle to Grid) permetterebbe di immagazzinare l'energia elettrica ricavata da fonti rinnovabili in eccesso in momenti di grande produzione o poca domanda e di aiutare la rete fornendo energia quando la produzione diminuisce e la domanda supera l'offerta assorbendo potenza dai veicoli. Questa tecnologia è attualmente in fase di ricerca: Terna, nel 2020 insieme a FCA e Engie Eps, ha lanciato un progetto all'interno del comprensorio di Mirafiori di FCA a Torino per la sperimentazione di una struttura V2G [\[33\]](#).

Bibliografia

- [1] M. Shafiei and A. Ghasemi-Marzbali. Electric vehicle fast charging station design by considering probabilistic model of renewable energy source and demand response. *Energy*, 267:126545, March 2023.
- [2] R. Kannan, S. Karthikkumar, P. Suseendhar, S. Pragaspathy, B. N. Ch.V. Chakravarthi, and B. Swamy. Hybrid Renewable Energy Fed Battery Electric Vehicle Charging Station. In *2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*. IEEE, August 2021.
- [3] J. Gowardhan, S. Ghotekar, and S. Thomas. Hybrid Solar-Wind Charging Station for Electric Vehicles and Its Simulation. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(8):1728–1734, August 2022.
- [4] C. Chellaswamy, V. Nagaraju, and R. Muthammal. Solar and Wind Energy Based Charging Station for Electric Vehicles. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (IJAREEIE)*, 7(1), 2018.
- [5] A. Shafiq, S. Iqbal, A. U. Rehman, Z. M. S. Elbarbary, H. Kotb, A. Selim, and S. Kamel. Integration of solar based charging station in power distribution network and charging scheduling of EVs. *Frontiers in Energy Research*, 11, January 2023.
- [6] K. Y. Yap, H. H. Chin, and J. J. Klemeš. Solar Energy-Powered Battery Electric Vehicle charging stations: Current development and future prospect review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169:112862, November 2022.
- [7] F. Noman, A. A. Alkahtani, V. Agelidis, K. S. Tiong, G. Alkawsi, and J. Ekanayake. Wind-Energy-Powered Electric Vehicle Charging Stations: Resource Availability Data Analysis. *Applied Sciences*, 10(16):5654, August 2020.
- [8] A. Ali, R. Shakoor, A. Raheem, H. A. Muqeet, Q. Awais, A. A. Khan, and M. Jamil. Latest Energy Storage Trends in Multi-Energy Standalone Electric Vehicle Charging Stations: A Comprehensive Study. *Energies*, 15(13):4727, June 2022.
- [9] X. Liu and T. Feng. Energy-storage configuration for EV fast charging stations considering characteristics of charging load and wind-power fluctuation. *Global Energy Interconnection*, 4(1):48–57, February 2021.
- [10] S. Batiyah, R. Sharma, S. Abdelwahed, and N. Zohrabi. An MPC-based power management of standalone DC microgrid with energy storage. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 120:105949, September 2020.

- [11] MOTUS-E. Le infrastrutture di ricarica a uso pubblico in Italia. Technical report, MOTUS-E, 2023.
- [12] International Electrotechnical Commission. Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements. Standard internazionale, 2017. Numero identificativo: IEC 61851-1.
- [13] International Electrotechnical Commission. Electric vehicle conductive charging system - Part 21-1: Electric vehicle on-board charger EMC requirements for conductive connection to AC/DC supply. Standard internazionale, 2017. Numero identificativo: IEC 61851-21-1.
- [14] International Electrotechnical Commission. Electric vehicle conductive charging system - Part 21-2: Electric vehicle requirements for conductive connection to an AC/DC supply - EMC requirements for off board electric vehicle charging systems. Standard internazionale, 2018. Numero identificativo: IEC 61851-21-2.
- [15] International Electrotechnical Commission. Electric vehicle conductive charging system - Part 23: DC electric vehicle charging station. Standard internazionale, 2014. Numero identificativo: IEC 61851-23.
- [16] International Electrotechnical Commission. Electric vehicle conductive charging system - Part 24: Digital communication between a DC EV charging station and an electric vehicle for control of DC charging. Standard internazionale, 2014. Numero identificativo: IEC 61851-24.
- [17] International Electrotechnical Commission. Electric vehicle conductive charging system - Part 25: DC EV supply equipment where protection relies on electrical separation. Standard internazionale, 2020. Numero identificativo: IEC 61851-25.
- [18] Sorgenia. Come funzionano le colonnine di ricarica delle auto elettriche. <https://www.sorgenia.it/guida-energia/funzionamento-colonnine-ricarica-auto-elettriche>, 2023. [Online; ultimo accesso il 19-06-2023].
- [19] Elettricomagazine. Ricarica dei veicoli elettrici: i 4 modi secondo la norma IEC 61851-1. <https://elettricomagazine.it/emobility/ricarica-veicoli-elettrici-4-modi-norma-iec-61851-1/>, 2021. [Online; ultimo accesso il 19-06-2023].
- [20] Silla Martha Calderon. Connettori di Ricarica per auto elettriche. <https://silla.industries/connettori-di-ricarica-per-auto-elettriche/>, 2021. [Online; ultimo accesso il 19-06-2023].
- [21] E-Station. Veicoli elettrici: la verità su connettori e modalità di ricarica. <https://www.e-station.it/colonnine-di-ricarica/veicoli-elettrici-la-verita-su-connettori-e-modalita-di-ricarica>, 2013. [Online; ultimo accesso il 19-06-2023].
- [22] Martino dal Verme, Duilio Lipari, Gabriele Lucido, Vincenzo Maio, Vincenzo Surace, and Paolo Liberatore. Energia da fonti rinnovabili in Italia - Rapporto Statistico 2021. Technical report, GSE, 2021.
- [23] Enel. Pala eolica. <https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/energia-eolica/pala-eolica>, 2020. [Online; ultimo accesso il 19-06-2023].

- [24] Wekiwi. Pale eoliche: come funzionano e quali sono i suoi vantaggi. <https://www.wekiwi.it/main/pale-eoliche/>, 2021. [Online; ultimo accesso il 19-06-2023].
- [25] A. Di Giorgio. Control of communications and Energy Networks: Power Systems Stability and Control - Wind Turbines Control Systems. Slide del corso, 2020.
- [26] Electrical4U. Squirrel Cage Induction Motor: Working Principle & Applications. <https://www.electrical4u.com/squirrel-cage-induction-motor/>, 2020. [Online; ultimo accesso il 20-06-2023].
- [27] E. F. Camacho and C. Bordons. *Model Predictive Control*. Springer London, second edition, 2004.
- [28] S. Joe Qin and Thomas A. Badgwell. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7):733–764, July 2003.
- [29] M. Schwenzer, M. Ay, T. Bergs, and D. Abel. Review on model predictive control: an engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(5):1327–1349, 2021.
- [30] A. I. Propoi. Use of linear programming methods for synthesizing sampled-data automatic systems. *Automation and Remote Control*, 24(7):837–844, 1963.
- [31] K. Holkar, K. Wagh, and L. Waghmare. An Overview of Model Predictive Control. *International Journal of Control and Automation*, 3(4):47–63, 2010.
- [32] A. Di Giorgio, L. Pimpinella, and A. Mercurio. A feedback linearization based Wind turbine control system for ancillary services and standard steady state operation. In *18th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'10*. IEEE, June 2010.
- [33] Terna. Inaugurato a Mirafiori il progetto pilota Vehicle-to-Grid. <https://www.terna.it/it/media/comunicati-stampa/dettaglio/Inaugurato-a-Mirafiori-il-progetto-pilota-Vehicle-to-Grid>, 2020. [Online; ultimo accesso il 25-06-2023].