

Modellazione multi-dimensionale e analisi di flessibilità di sistemi multi-energia

Candidato: Cristian Piran
Relatore: prof. Gianfranco Chicco

Abstract—I sistemi multi-energia (MES) permettono l'integrazione tra differenti vettori energetici (gas, elettricità, calore, idrogeno, ecc.), al fine di garantire una maggiore flessibilità al sistema complessivo, essenziale per un'ottimale integrazione delle fonti rinnovabili e per incrementare l'efficienza energetica del sistema. La presenza di flessibilità favorisce la possibilità di ricercare il punto di lavoro ottimale al fine di soddisfare determinati obiettivi, come ad esempio la ricerca del minimo costo per gli utenti finali.

I. INTRODUZIONE

La flessibilità per i sistemi multi-energia viene definita attraverso il concetto dell'*electricity shifting potential*, ovvero la massima riduzione di elettricità in ingresso, proveniente dalla rete, ottenibile a partire da uno stato iniziale noto e soggetto a vincoli. I MES vengono rappresentati attraverso hub energetici, nei quali ogni singolo vettore energetico viene accumulato o convertito dai componenti costituenti il sistema. La flessibilità nei MES si ottiene attraverso la realizzazione di mappe di fattibilità, ottenute mediante la somma di Minkowski.

Si considera un sistema composto da un cogeneratore, un boiler ausiliario, una pompa di calore, un P2G e un chiller termico. In questo esempio sono presenti 4 vettori energetici interagenti (gas, elettricità, calore e raffrescamento). Noti i limiti di funzionamento di ogni singolo componente, si determinano le mappe di fattibilità multi-dimensionali, attraverso la somma di Minkowski, considerando i vettori energetici come assi cartesiani. In Figura 1, ad esempio, è presente la modellazione tridimensionale della mappa di fattibilità considerando i vettori calore, elettricità e raffrescamento.

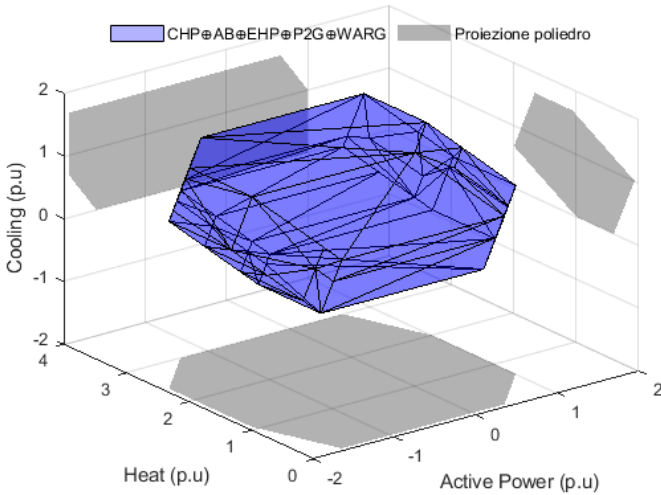


Fig. 1. Modellazione 3D della mappa di fattibilità sul piano Potenza elettrica, Potenza termica e Potenza refrigerante

II. ANALISI DINAMICA E RICERCA DEL PUNTO DI LAVORO OTTIMALE

L'analisi dinamica nei sistemi multi-energia consiste nello studio dell'evoluzione del punto di lavoro nel tempo soddisfacendo determinati obiettivi, attraverso la risoluzione di un sistema di ottimizzazione. In questo elaborato, si è scelto di ottimizzare il punto di lavoro al fine di minimizzare il costo per gli utenti finali. I vincoli

TABLE I
DOMANDA ENERGETICA COSTANTE

Vettore	Punto di lavoro
F_0	30 kW _f
W_0	400 kW _e
Q_0	1000 kW _t
R_0	50 kW _c

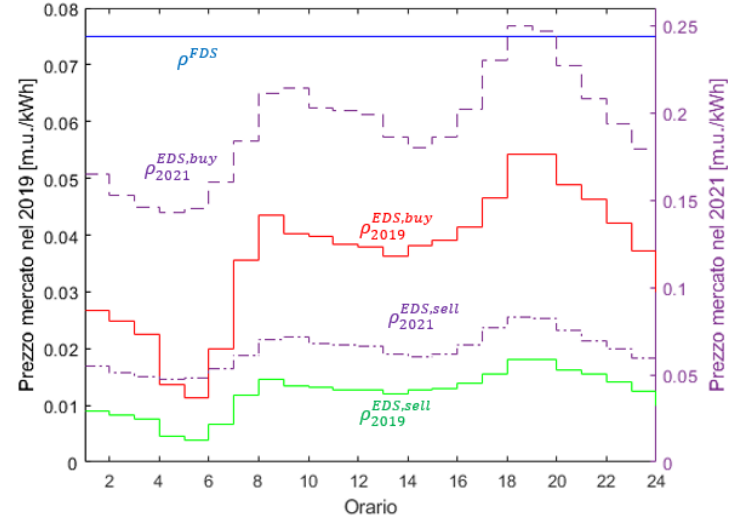


Fig. 2. Evoluzione dei prezzi dell'energia in una giornata invernale nel 2019 e nel 2021

di uguaglianza sono dati dalle equazioni di bilancio energetico di ogni vettore, mentre i vincoli di disequaglianza rappresentano i limiti massimi e minimi di funzionamento dei vari componenti. La funzione obiettivo, dunque, si presenta come segue:

$$\text{Costo} = \rho^{\text{FDS}} \cdot F_i^{\text{FDS}} + \rho^{\text{EDS, buy}} \cdot \max\{W_i^{\text{EDS}}, 0\} + \rho^{\text{EDS, sell}} \cdot \min\{W_i^{\text{EDS}}, 0\} \quad (1)$$

dove W_i^{EDS} rappresenta l'energia elettrica prelevata-immessa in rete, rispettivamente al prezzo $\rho^{\text{EDS, buy}}$ e $\rho^{\text{EDS, sell}}$, mentre F_i^{FDS} rappresenta l'energia prelevata dalla rete del combustibile, al prezzo ρ^{FDS} .

III. OTTIMIZZAZIONE A CARICO COSTANTE DEL PUNTO DI LAVORO

Il problema di ottimizzazione viene applicato al sistema descritto in precedenza, allo scopo di ricavare l'evoluzione giornaliera del costo ottimizzato considerando il carico costante presente in Tabella I. In questo esempio si considera l'evoluzione dei prezzi dell'energia in una giornata invernale nel 2019 (Figura 2) e, al fine di soddisfare l'elevata domanda termica tipica del periodo, si considera la sola produzione di calore da parte dell'EHP. In Figura 3 è mostrato il risultato del processo di ottimizzazione. Dato l'elevato prezzo del gas rispetto all'energia elettrica, conviene prelevare quantità maggiori di energia elettrica e sfruttare maggiormente i componenti alimentati dal medesimo vettore energetico. In particolare in Figura 4 è presente l'analisi dei vettori energetici alle ore 12. Il cogeneratore non contribuisce a soddisfare la domanda elettrica mentre si preleva

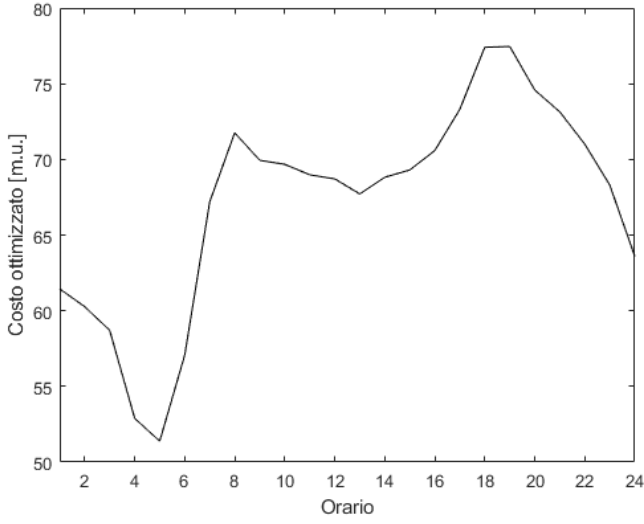


Fig. 3. Evoluzione del costo ottimizzato

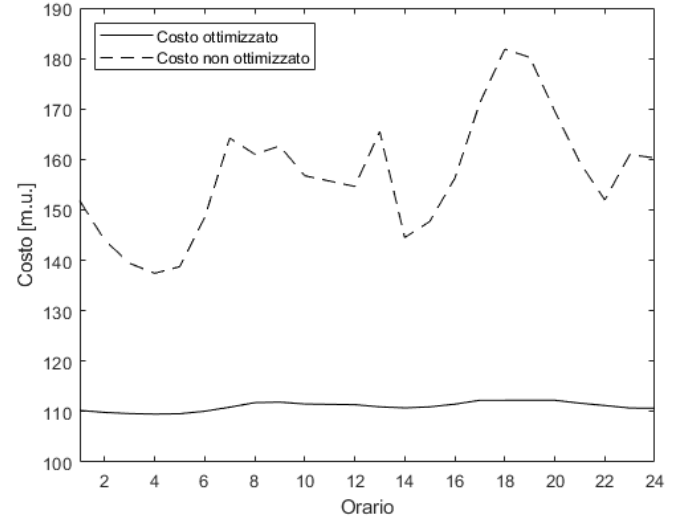


Fig. 5. Confronto tra andamento del costo non ottimizzato e costo ottimizzato

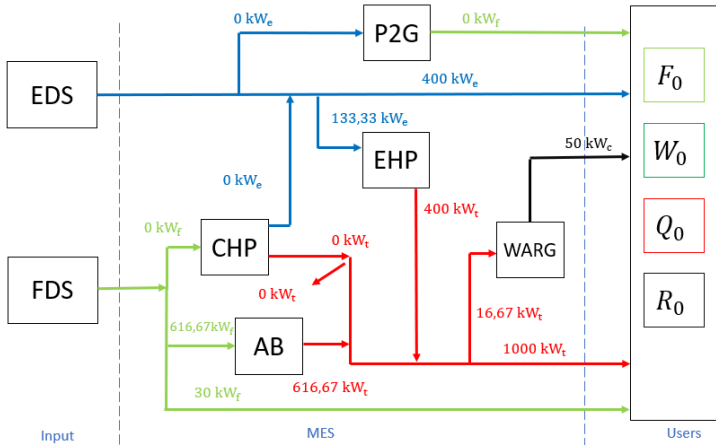


Fig. 4. Flussi energetici alle ore 12 in una giornata invernale

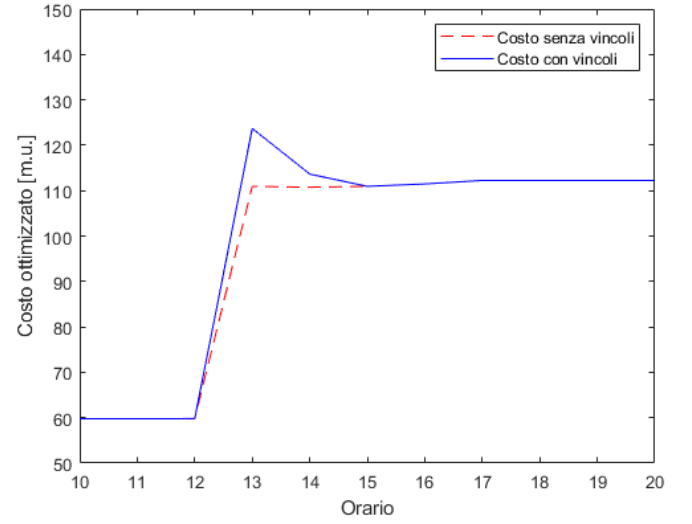


Fig. 6. Confronto tra l'evoluzione del costo ottimizzato in presenza e in assenza di limiti temporali

la massima energia termica disponibile dalla pompa di calore al fine di ridurre l'energia prelevata dalla rete del gas.

IV. ADEGUAMENTO DEL SISTEMA ALLE VARIAZIONI ANOMALI DEI PREZZI DELL'ENERGIA

Nell'esempio precedente sono stati considerati gli andamenti giornalieri dei prezzi dell'energia relativi all'anno 2019 in quanto dal 2020, a causa dell'emergenza sanitaria e della conseguente crisi economica, i prezzi dell'energia hanno subito ampie variazioni. Dal confronto dei prezzi della stessa giornata invernale (Figura 2), presa a distanza di due anni, emerge come il prezzo dell'energia elettrica sia aumentato di quasi un ordine di grandezza mentre rimane quasi invariato il prezzo del combustibile. Analizzando i flussi energetici alle ore 12 si nota l'incremento di energia prelevata dalla FDS. In questo caso il cogeneratore lavora a regime, producendo sia energia elettrica che termica. Se si considera il comportamento del sistema nella giornata invernale del 2019 con i prezzi anomali del 2021 si ottiene una curva di costo nettamente maggiore. Confrontando tale andamento con il costo derivato da un comportamento ottimizzato, presente in Figura 5, si nota il notevole risparmio economico per gli utenti.

V. OTTIMIZZAZIONE PUNTO DI LAVORO IN PRESENZA DI LIMITI TEMPORALI

Nelle applicazioni pratiche, ogni componente raggiunge determinati punti di funzionamento in tempi non infinitesimi. Tale vincolo tecnologico determina la presenza di limiti temporali. Rispetto alle

simulazioni precedenti, si limita la variazione del combustibile assorbito dal cogeneratore (F_{CHP}) tra iterazioni consecutive ad un valore massimo $rr_{CHP} = 0.4\%/ora$. Per evidenziare gli effetti sull'evoluzione giornaliera del costo, si valuta il comportamento ottimizzato del MES a seguito di una brusca variazione del carico termo-elettrico. In presenza di vincoli, il cogeneratore raggiunge il nuovo punto di lavoro in un tempo maggiore. Durante questo periodo di tempo, il resto del sistema deve adeguarsi a soddisfare la richiesta di variazione di carico da parte degli utenti. Questo comporta un aumento del costo rispetto all'analoga situazione in assenza di limiti temporali (Figura 6).

Quanto dimostrato fino ad ora può valere per ogni componente e per ogni vettore energetico, complicando l'analisi di ottimizzazione dell'Energy Hub. I limiti temporali, dunque, ostacolano il raggiungimento del nuovo punto di lavoro e riducono notevolmente la regione di flessibilità del sistema.