

Ricerca di Sistema elettrico



Modellazione di un ciclo di potenza integrato con un sistema di accumulo a bassa temperatura. (LA4.3)

G. Messina, G. Cevolani, A. Giovannelli, Di Nardo

MODELLAZIONE DI UN CICLO DI POTENZA INTEGRATO CON UN SISTEMA DI ACCUMULO A BASSA TEMPERATURA

Giuseppe Messina, Antonio Di Nardo (ENEA), Gianluca Cevolani, Ambra Giovannelli (Università degli Studi Roma Tre)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.2 – Progetto integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico.

Linea di attività: LA4.3

Responsabile del Progetto: Margherita Moreno, ENEA.

Responsabile Linea di Attività: Giuseppe Messina, ENEA

Mese inizio previsto: 1 (gennaio 2022)

Mese inizio effettivo: 1 (gennaio 2022)

Mese fine previsto: 36 (dicembre 2024)

Mese fine effettivo: 36 (dicembre 2024)

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	4
3	Prodotti attesi	4
4	Prodotti sviluppati	5
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	5
6	Sintesi delle attività svolte	5
7	Dettaglio delle attività svolte.....	5
7.1	Specifica di progetto delle turbomacchine.....	6
7.2	Calcolo della performance del sistema di conversione.....	7
7.3	Analisi dei risultati ottenuti.....	9
8	Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale.....	10
9	Eventi di disseminazione	10
10	Bibliografia.....	10

Indice delle figure

Figura 1. Condizioni termodinamiche della sezione subcritica (SBC) del treno di compressione principale.....	6
Figura 2. Condizioni termodinamiche della sezione transcritica (I stadio TRC) del treno di compressione principale.....	6
Figura 3. Condizioni termodinamiche della sezione transcritica (II stadio TRC) del treno di compressione principale.....	7
Figura 4. Condizioni termodinamiche della sezione supercritica (SPC) del treno di compressione principale.....	7
Figura 5. Condizioni termodinamiche del primo stadio (REC1) del treno di ricompressione.	7
Figura 6. Condizioni termodinamiche del secondo stadio (REC2) del treno di ricompressione. ...	7
Figura 7. Condizioni termodinamiche della turbina.	7
Figura 8. Distribuzione della potenza meccanica assorbita (positiva) ed erogata (negativa) dalle turbomacchine del sistema di conversione (asse delle ascisse) al variare della potenza meccanica netta all'albero del sistema di conversione (asse delle ordinate).	8
Figura 9. Sintesi della performance del sistema di conversione al variare della potenza meccanica netta all'albero del sistema di conversione espressa in % del valore nominale (asse delle ascisse superiore). Si evidenziano: in azzurro, l'andamento della potenza della turbina in % del valore nominale; in giallo, la Round Trip Efficiency; in verde chiaro, l'efficienza meccanica interna; in verde (barre) la potenza meccanica netta all'albero del sistema di conversione espressa in MW; in rosa (barre) la potenza termica fredda caricata/scaricata espressa in MW. ...	9

1 Risultati attesi

Al termine della Linea di Attività (LA) 4.3 erano attesi i seguenti risultati:

- specifica per lo sviluppo del progetto delle turbomacchine in carico al Dipartimento di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica (DIEM-UniRM3) dell'Università degli Studi di Roma Tre (WP4-LA9);
- calcolo della performance operativa del sistema di conversione;
- definizione dei criteri di scalatura del sistema di accumulo freddo.

2 Risultati ottenuti

I risultati attesi sono stati pienamente raggiunti. Nello specifico: è stata emessa la specifica delle turbomacchine, risultato preliminare all'attività di progettazione delle stesse eseguita dal DIEM-UniRM3, iniziando un processo iterativo di validazione delle configurazioni di progetto prodotte rispetto ai requisiti di flessibilità operativa richiesti dal sistema di conversione nel suo complesso. All'emissione della specifica è seguita la realizzazione di un modello di accoppiamento delle turbomacchine che, sulla base delle curve caratteristiche prodotte dal DIEM-UniRM3, ha consentito la definizione dell'involucro operativo del sistema di conversione e la performance dello stesso in termini di flessibilità operativa. Al raggiungimento dei requisiti di flessibilità operativa, il modello di accoppiamento ha fornito i parametri di scalatura del sistema di accumulo freddo.

Con riferimento ai potenziali benefici per il sistema elettrico nazionale ed i suoi utenti, il lavoro svolto amplia la platea delle potenziali soluzioni impiantistiche utili per: (I) l'incremento della sicurezza dell'approvvigionamento di energia elettrica, (II) per il migliore sfruttamento del potenziale in termini di energia rinnovabile non programmabile e (III) per la riduzione dei costi dell'energia elettrica per l'utente finale. Le tre condizioni sopra citate si allineano con la performance del sistema di conversione proposto in termini di: (I) sostanziale incremento della potenza di picco rispetto alla potenza nominale; (II) capacità di accumulare energia elettrica nelle finestre di over generation delle rinnovabili non programmabili; (III) recupero e restituzione al sistema elettrico di energia elettrica rinnovabile, comunque incentivata, ma attualmente non ricevibile durante le finestre di over generation. Ai potenziali benefici sopra citati, si aggiunge una forte mitigazione nel fabbisogno di materie prime critiche necessarie per la realizzazione della transizione energetica.

3 Prodotti attesi

Deliverable contenente le specifiche di progetto delle turbomacchine, il calcolo della performance operativa del sistema di conversione e i criteri di scalatura del sistema di accumulo freddo.

4 Prodotti sviluppati

- Trasmissione delle specifiche delle turbomacchine al gruppo di ricerca DIIEM-UniRM3 per la successiva attività di progettazione;
- definizione dell'inviluppo operativo e calcolo delle performance del sistema di conversione;
- definizione dei criteri di scalatura del sistema di accumulo freddo.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si evidenziano scostamenti rispetto alle attività e ai risultati previsti.

6 Sintesi delle attività svolte

In questa linea di attività sono state prodotte e trasmesse al gruppo di ricerca DIIEM-UniRM3, per la successiva attività di progettazione, le specifiche delle turbomacchine di un sistema di conversione a CO₂ transcritica integrato con un sistema di accumulo termico a bassa temperatura, per applicazioni power-to-cold-to-power. È stato definito l'inviluppo operativo del sistema di conversione e ne è stata calcolata la performance con l'obiettivo di valutarne la flessibilità operativa. Sono stati definiti i criteri di scalatura per il sistema di accumulo. L'analisi della performance ha dimostrato il raggiungimento di tutte le caratteristiche previste: margine di regolazione continuo pari al 136% e Round Trip Efficiency compresa tra il 50% e il 60%. Con riferimento ai criteri di scalatura del sistema di accumulo, si evidenzia un rapporto tra le potenze termiche di carica e scarica pari a 1.3 e un rapporto tra potenza termica "fredda" e potenza meccanica erogata pari a 1.25.

7 Dettaglio delle attività svolte

L'attività svolta è stata condotta in stretta collaborazione con il DIIEM-UniRM3, mediante un processo iterativo che, iniziato con l'emissione da parte di ENEA delle specifiche per la progettazione delle turbomacchine, è proseguito con l'emissione di numerose soluzioni progettuali da parte del DIIEM-UniRM3 e la validazione delle stesse in termini di impatto sull'inviluppo operativo e sulla performance del sistema di conversione. L'attività ha beneficiato della collaborazione consolidata con il DIIEM-UniRM3, con scambi continui di informazioni resi efficaci dalla condivisione di formati di scambio dei dati già sviluppati nelle scorse annualità, con particolare riferimento alle mappe delle turbomacchine elaborate dal DIIEM-UniRM3 in seguito alla progettazione delle stesse. Le mappe prodotte sono state integrate nel modello di accoppiamento delle turbomacchine sviluppato dall'ENEA, mediante il quale sono state ottenute indicazioni sulle scelte progettuali coerenti con la tendenza rispetto ai risultati attesi. Queste iterazioni, agevolate dalla produzione di mappe in formato dimensionale, quasi-dimensionale e non-dimensionale hanno condotto all'integrazione delle turbomacchine nel modello di accoppiamento del sistema di conversione, validando la performance ai carichi parziali, fino alle condizioni operative estremali. La validazione ha

condotto alla modifica delle condizioni operative inizialmente previste, con un leggero incremento della temperatura di ingresso turbina.

7.1 Specifica di progetto delle turbomacchine

La specifica di progetto delle turbomacchine è stata prodotta in seguito ad un calcolo preliminare della performance termodinamica del sistema di conversione in tre condizioni di funzionamento notevoli, come inizialmente previste. Le tre condizioni di funzionamento sono state denominate rispettivamente: *Nominal Performance* (NP), che riassume le condizioni termodinamiche delle turbomacchine al punto nominale del sistema di conversione; *Peak Performance* (PP), che riassume le condizioni termodinamiche delle turbomacchine al punto di funzionamento (estremale) di generazione elettrica del sistema di conversione; *Heat Performance* (HP) che riassume le condizioni termodinamiche delle turbomacchine al punto di funzionamento (estremale) di accumulo termico del sistema di conversione. La specifica iniziale prevedeva una turbina di potenza e due treni di compressione, composti rispettivamente da quattro sezioni di compressione per il primo treno e due sezioni di compressione per il secondo. La progettazione delle turbomacchine eseguita dal DIEM-UniRM3 ha condotto ad una diversa configurazione per entrambi i treni di compressione, che sono stati riorganizzati in tre sezioni di compressione monostadio per il treno di compressione principale e in una sezione di compressione a tre stadi per il treno di ricompressione. La deviazione rispetto alla specifica iniziale ha comportato una migliore interpretazione dei requisiti di flessibilità operativa del sistema di conversione, grazie ad una migliore distribuzione del carico di lavoro tra le sezioni di compressione. Il calcolo delle condizioni operative contenute nella specifica di progetto è stato eseguito con l'ausilio dei codici NIST REFPROP® e ChemCAD.

SUBCRITICAL COMPRESSOR (SBC)																			
operating point	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m ³	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg.K	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m ³	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg.K	efficiency	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m ³	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg.K	work - kJ/kg	massflow - kg/s	power - kW
T ₁	p ₁	rho ₁	h ₁	s ₁	T _{2s}	p _{2s}	rho _{2s}	h _{2s}	s _{2s}	eta	T ₂	p ₂	rho ₂	h ₂	s ₂	h ₂₋₁	m	P	
NP	35,0	28,8	57,6	487,2	2,1	69,0	44,7	81,5	510,2	2,1	0,8	74,1	44,7	79,4	516,1	2,1	28,9	167,6	4846,4
PP	35,0	28,8	57,6	487,2	2,1	69,0	44,7	81,5	510,2	2,1	0,8	74,1	44,7	79,4	516,1	2,1	28,9	148,6	4294,7
HP	31,5	28,8	58,8	483,3	2,1	59,9	41,7	78,7	502,2	2,1	0,7	67,3	41,7	75,8	510,8	2,1	27,5	445,1	12223,2

Figura 1. Condizioni termodinamiche della sezione subcritica (SBC) del treno di compressione principale.

TRANSCRITICAL 1 COMPRESSOR (TRC1)																			
operating point	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m ³	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg.K	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m ³	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg.K	efficiency	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m ³	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg.K	work - kJ/kg	massflow - kg/s	power - kW
T ₁	p ₁	rho ₁	h ₁	s ₁	T _{2s}	p _{2s}	rho _{2s}	h _{2s}	s _{2s}	eta	T ₂	p ₂	rho ₂	h ₂	s ₂	h ₂₋₁	m	P	
NP	35.0000	43.7881	97.7210	468.6700	1.9440	66.0230	64.6840	132.5300	486.8800	1.9439	0.7777	70.9110	64.6840	128.1500	493.7500	1.9640	25.0800	167.6375	4204.3485
PP																			
ML	35.0000	40.9000	89.1690	472.5600	1.9667	60.6220	56.6300	115.0700	488.0300	1.9667	0.6942	66.6620	56.6300	110.6700	496.0800	1.9906	23.5200	445.1274	10469.3964

Figura 2. Condizioni termodinamiche della sezione transcritica (1 stadio TRC) del treno di compressione principale.

TRANSCRITICAL 2 COMPRESSOR (TRC2)

operating point	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	efficiency	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	work - kJ/kg	massflow - kg/s	power - kW
	T ₁	p ₁	rho ₁	h ₁	s ₁	T _{2s}	p _{2s}	rho _{2s}	h _{2s}	s _{2s}	eta	T ₂	p ₂	rho ₂	h ₂	s ₂	h ₂₋₁	m	P
NP	35.0000	63.3905	176.1600	434.7900	1.7849	65.4340	93.6480	234.5500	449.5600	1.7849	0.8156	68.3680	93.6480	226.1100	455.8500	1.8034	21.0600	167.6375	3530.4458
PP																			
ML	35.0000	55.5000	138.9200	450.4600	1.8522	60.5550	76.6260	177.7000	463.8500	1.8522	0.7449	64.4070	76.6260	171.1800	470.5700	1.8722	20.1100	445.1274	8951.5120

Figura 3. Condizioni termodinamiche della sezione transcritica (II stadio TRC) del treno di compressione principale.

SUPERCRITICAL COMPRESSOR (SPC)

operating point	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	efficiency	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	work - kJ/kg	massflow - kg/s	power - kW
	T ₁	p ₁	rho ₁	h ₁	s ₁	T _{2s}	p _{2s}	rho _{2s}	h _{2s}	s _{2s}	eta	T ₂	p ₂	rho ₂	h ₂	s ₂	h ₂₋₁	m	P
NP	35,00	91,78	673,90	296,79	1,31	53,44	190,20	750,13	310,53	1,31	0,81	59,77	190,20	708,58	326,70	1,36	29,91	167,64	5014,04
PP																			
HP	35,00	75,09	274,30	397,19	1,65	87,24	161,69	429,09	421,61	1,65	0,82	90,87	161,69	409,54	430,96	1,67	33,77	133,48	4507,78

Figura 4. Condizioni termodinamiche della sezione supercritica (SPC) del treno di compressione principale.

RECOMPRESSOR 1

operating point	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	efficiency	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	work - kJ/kg	massflow - kg/s	power - kW
	T ₁	p ₁	rho ₁	h ₁	s ₁	T _{2s}	p _{2s}	rho _{2s}	h _{2s}	s _{2s}	eta	T ₂	p ₂	rho ₂	h ₂	s ₂	h ₂₋₁	m	P
NP	69.7560	29.4000	50.2040	523.8600	2.1783	166.3400	89.0990	120.1500	597.0000	2.1783	0.8073	182.3600	89.0990	113.8800	615.8600	2.2205	92.0000	95.2626	8764.2
PP	58.4020	29.4000	52.6850	511.9200	2.1429	157.7400	93.1440	130.2500	584.8300	2.1429	0.8351	171.0700	93.1440	124.1500	600.8400	2.1795	88.9200	107.5200	9560.6784
HP	139.2500	29.4000	39.6160	595.3100	2.3680	231.0300	78.0640	86.2270	675.4100	2.3680	0.7433	256.6800	78.0640	81.0630	704.3100	2.4238	109.0000	89.1086	9712.8385

Figura 5. Condizioni termodinamiche del primo stadio (REC1) del treno di ricompressione.

RECOMPRESSOR 2

operating point	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	efficiency	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	work - kJ/kg	massflow - kg/s	power - kW
	T ₁	p ₁	rho ₁	h ₁	s ₁	T _{2s}	p _{2s}	rho _{2s}	h _{2s}	s _{2s}	eta	T ₂	p ₂	rho ₂	h ₂	s ₂	h ₂₋₁	m	P
NP	182.3620	89.0988	113.8800	615.8600	2.2205	259.0000	186.4000	198.5400	679.0200	2.2205	0.8141	270.6900	186.4000	192.3700	693.7000	2.2478	77.8400	95.2626	7415.2
PP	171.0700	93.1440	124.1500	600.8500	2.1795	249.1600	198.9800	218.3400	663.4500	2.1795	0.8206	260.0200	198.9800	211.6600	677.3500	2.2058	76.5000	107.5200	8225.2800
HP	256.6830	78.0642	81.0630	704.3100	2.4239	335.0700	158.4600	140.6800	777.9800	2.4239	0.7883	351.9100	158.4600	136.0100	798.2100	2.4567	93.9000	89.1086	8367.2975

Figura 6. Condizioni termodinamiche del secondo stadio (REC2) del treno di ricompressione.

EXPANDER

operating point	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	efficiency	temperature - °C	pressure - bar	density - kg/m3	enthalpy kJ/kg	entropy - kJ/kg K	work - kJ/kg	massflow - kg/s	power - kW
	T ₁	p ₁	rho ₁	h ₁	s ₁	T _{2s}	p _{2s}	rho _{2s}	h _{2s}	s _{2s}	eta	T ₂	p ₂	rho ₂	h ₂	s ₂	h ₂₋₁	m	P
NP	500,00	182,67	122,14	974,80	2,68	286,04	30,00	28,74	749,20	2,68	0,92	301,88	30,00	27,89	766,38	2,71	-208,42	262,90	-54793,62
PP	500,00	182,67	122,14	974,80	2,68	286,04	30,00	28,74	749,20	2,68	0,92	301,88	30,00	27,89	766,38	2,71	-208,42	256,00	-53355,52
HP	500,00	155,29	104,34	977,30	2,72	304,11	30,00	27,78	768,81	2,72	0,92	318,49	30,00	27,06	784,51	2,74	-192,79	222,77	-42948,12

Figura 7. Condizioni termodinamiche della turbina.

7.2 Calcolo della performance del sistema di conversione

La definizione dell'involuppo operativo del sistema di conversione è il risultato dell'intersezione dei domini operativi di ciascuna turbomacchina con tutte le altre. Questa intersezione è a sua volta limitata dai vincoli operativi derivanti dalle specifiche del ciclo termodinamico, e dai

domini operativi degli altri componenti di impianto, con particolare riferimento agli scambiatori di calore e alle potenze termiche da essi veicolate. L'algoritmo di accoppiamento delle turbomacchine è stato realizzato adattando al caso in questione il modello descritto in [1], prodotto nello scorso piano triennale dagli stessi autori del presente report.

L'output fondamentale del modello di accoppiamento è rappresentato dal bilancio massa-energia del sistema di conversione, definito a livello di algoritmo in due step eseguiti iterativamente: il *flow matching* che valuta l'accoppiamento fluidodinamico delle turbomacchine in termini di portate in massa e pressioni del fluido di lavoro per ciascun componente e per ciascun punto di lavoro del sistema di conversione; il *work matching* che valuta l'accoppiamento delle turbomacchine in termini di potenza erogata/assorbita.

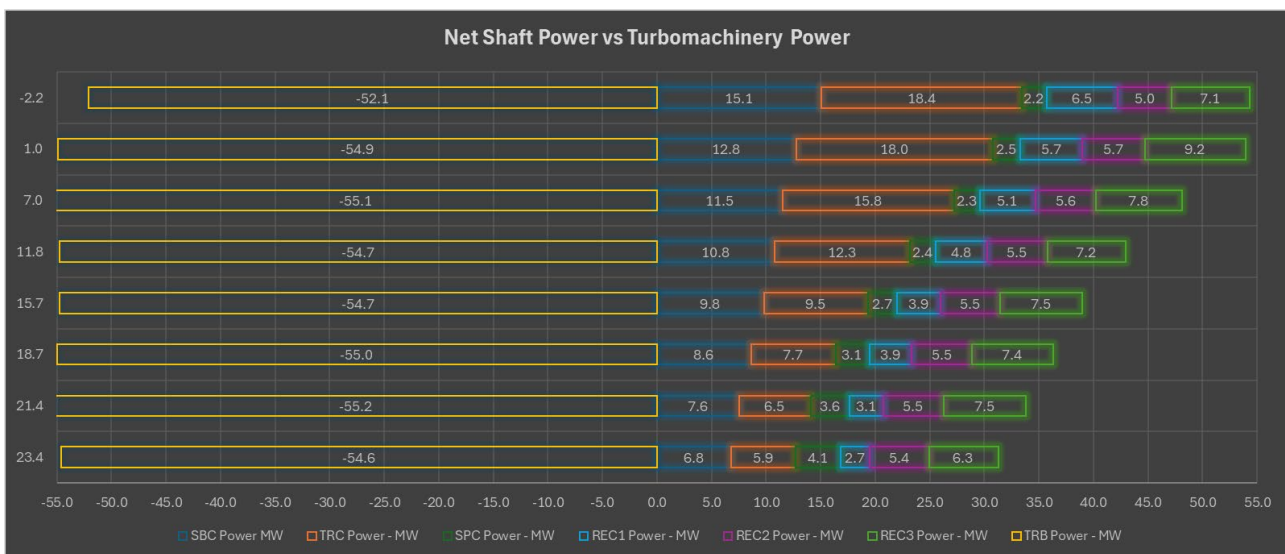


Figura 8. Distribuzione della potenza meccanica assorbita (positiva) ed erogata (negativa) dalle turbomacchine del sistema di conversione (asse delle ascisse) al variare della potenza meccanica netta all'albero del sistema di conversione (asse delle ordinate).

Il calcolo iterativo viene eseguito a partire dalle mappe caratteristiche delle turbomacchine dalle quali si valuta una soluzione di primo tentativo per il *flow matching*, il cui risultato viene utilizzato per il calcolo termodinamico da cui risulta il *work matching*. Il risultato di ciascuna iterazione è la distribuzione della potenza meccanica erogata/assorbita da ciascuna turbomacchina, dal cui bilancio si ottiene la potenza meccanica netta all'albero del sistema di conversione al variare del regime operativo. Il calcolo della performance ha come obiettivo la valutazione dei parametri di base che definiscono la flessibilità operativa del sistema di conversione, definita come la capacità di modulare con continuità la potenza elettrica erogata, dal minimo tecnico (MSP), alla potenza di picco (PSP). La differenza tra PSP e MSP, entrambi espresse come valore percentuale della potenza nominale (NSP), rappresenta il margine di regolazione del sistema di conversione. Si definiscono, inoltre: (I) l'efficienza interna, valutata come il rapporto con al numeratore la somma della potenza meccanica netta disponibile all'albero (SP) e della potenza meccanica utilizzata l'accumulo di energia termica fredda e, al denominatore, la potenza della sorgente termica calda; (II) il surplus di SP ottenuta sfruttando l'energia termica fredda accumulata, valutata come la differenza tra la PSP in condizioni di picco di picco a la NSP; (III) la *Round Trip Efficiency* (RTE), valutata come l'energia meccanica utilizzata per l'accumulo e il surplus di SP ottenuta sfruttando l'energia termica accumulata.

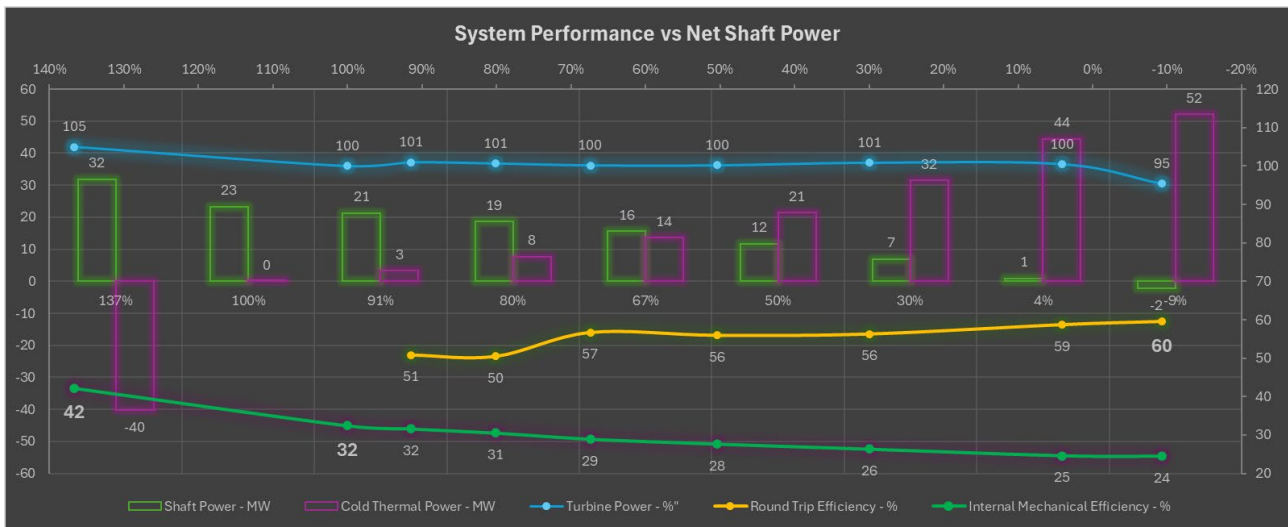


Figura 9. Sintesi della performance del sistema di conversione al variare della potenza meccanica netta all'albero del sistema di conversione espressa in % del valore nominale (asse delle ascisse superiore). Si evidenziano: in azzurro, l'andamento della potenza della turbina in % del valore nominale; in giallo, la Round Trip Efficiency; in verde chiaro, l'efficienza meccanica interna; in verde (barre) la potenza meccanica netta all'albero del sistema di conversione espressa in MW; in rosa (barre) la potenza termica fredda caricata/scaricata espressa in MW.

7.3 Analisi dei risultati ottenuti

L'analisi della performance del sistema di conversione proposto, ha dimostrato il raggiungimento di tutte le caratteristiche previste. La potenza di picco (PSP) è risultata pari al **137%** della potenza nominale (NSP), mentre il minimo tecnico (MSP) è risultato pari a **-9%** della NSP, con un conseguente **margin di regolazione continuo pari al 146%**. Il valore negativo del minimo tecnico implica la notevole capacità del sistema di assorbire energia elettrica, passando con continuità dalla produzione netta di energia elettrica, all'assorbimento di energia elettrica dalla rete, con minime variazioni della potenza all'albero della turbina ($\pm 5\%$). (Figura 9). **La Round Trip Efficiency (RTE) è risultata compresa nell'intervallo 50% - 60%, con il valore superiore ottenuto in corrispondenza del valore massimo della potenza termica accumulata.** Con riferimento ai **criteri di scalatura del sistema di accumulo freddo**, dall'analisi della performance del sistema di conversione emergono le seguenti indicazioni: (I) la potenza termica "fredda" del sistema di accumulo in fase di scarica espressa come rapporto tra la potenza termica utilizzata e la PSP del sistema di conversione è pari a **1.25 MWt/MWm**; il rapporto tra la potenza termica in fase di carica e la potenza termica in fase di scarica è pari a **1.3 MWt-charge/MWt-discharge**.

8 Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale

L'accumulo termico è potenzialmente una tecnologia chiave per rendere le centrali termoelettriche più flessibili. Studi dimostrano che l'aggiunta di accumulo termico (TES) ad un ciclo combinato (CCGT) migliora la flessibilità operativa e l'efficienza complessiva, specie a carichi parziali [2]. Il Dipartimento dell'Energia statunitense (DOE) ha investito in studi di fattibilità su TES accoppiati a centrali fossili e sostenuto il design di un dimostratore rock-bed e di un sistema SandTES (sabbia calda) [3]. Il DOE punta a ridurre il Levelized Cost of Storage TES a 5¢/kWh entro il 2030 e valuta soluzioni bidirezionali (carica/scarica) come sabbia in movimento, accumuli a letto di roccia o reattori ad ossidi solidi [4]. In Italia, la centrale termoelettrica di Santa Barbara (Toscana) ospita il primo sistema industriale al mondo "bGen" di Brenmiller Energy, in cui un letto di rocce frantumate, riscaldato da resistenze elettriche alimentate da fonti rinnovabili, accumula energia termica fino a 750 °C. In scarica il calore viene ceduto a una caldaia per produrre vapore destinato alla generazione di potenza elettrica [5]. In tutti i casi citati, si tratta di stoccaggio di calore a temperatura medio-alta, simili nello scopo, ma concettualmente e tecnologicamente diversi rispetto alla soluzione qui proposta.

9 Eventi di disseminazione

- Workshop "RdS Prog 1.2 PTR 22-24", "LA4.9 - Progettazione delle turbomacchine di un ciclo di potenza integrato con un sistema di accumulo freddo", A. Giovannelli e G. Messina, 18 Aprile 2024.
- NanoInnovation Conference & Exhibition 2024, "Preliminary turbomachinery design of a power cycle integrated with a cold storage system", A. Giovannelli e G. Messina, 12 Settembre 2024, Roma.

10 Bibliografia

[1] G. Messina et al., "Analisi ai carichi parziali e strategie di controllo di un ciclo trans-critico ibridizzato con una pompa di calore", Report RdS/PTR2021/294, 2021.

[2] L. Cao, J. Yu, L. Wang, and X. Xu, "Combined cycle gas turbine system with molten salt energy storage: Peak regulation and flexibility," Processes, vol. 13, no. 3, p. 604, 2025 - <https://doi.org/10.3390/pr13030604>.

[3] <https://www.energy.gov/fecm/articles/areas-interest-doe-invests-nearly-76m-develop-energy-storage-projects#:~:text=Modular%2C%20Crushed,The%20bGenTM%20technology%20is%20a>

[4] Balliet, W. Hill, et al. Technology Strategy Assessment - Thermal Energy Storage. U.S. Department of Energy, July 2023. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/Technology%20Strategy%20Assessment%20-%20Thermal%20Energy%20Storage.pdf>.

[5] <https://www.rinnovabili.it/energia/accumulo/accumulo-termico-rocce-tes-toscana/#:~:text=L%E2%80%99innovativa%20%E2%80%9Cbatteria%E2%80%9D%20rappresenta%20la%20prima,scalabile%20in%20maniera%20sostenibile%20ovunque%E2%80%9D>