

Tecnologie e sistemi per l'accumulo termico

La transizione energetica in atto prevede una sempre più accentuata penetrazione dei sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabili non programmabili, come ad esempio quella fotovoltaica ed eolica. Per gestire al meglio questa evoluzione, è di importanza cruciale poter accumulare l'energia prodotta da tali sistemi, in modo da disaccoppiare la produzione di energia, non programmabile appunto, dal suo utilizzo finale. Tra le varie tipologie di sistemi, quelli di accumulo termico rappresentano una via matura ed affidabile, dal costo contenuto, ed impiegabile su tutte le scale.

DOI 10.12910/EAI2020-049

di **Raffaele Liberatore**, Laboratorio Sviluppo Componenti e Impianti Solari, ENEA - **Luigi Mongibello**, Laboratorio Smart Grid e Reti Energetiche, ENEA

Negli ultimi decenni, i sistemi di accumulo termico hanno suscitato un interesse via via crescente perché consentono sia di disaccoppiare produzione e domanda di energia nei sistemi alimentati da fonte solare, sia di migliorare l'affidabilità e la flessibilità delle reti elettriche. Infatti, attualmente queste sono caratterizzate da forte presenza di impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, non programmabili, come fotovoltaici ed eolici. L'impiego di sistemi di accumulo termico rende possibile immagazzinare indirettamente energia elettrica adoperando pompe di calore, la cui produzione può essere accumulata e poi utilizzata per produrre energia elettrica tramite motori termici. Questa tecnologia è conosciuta come PTES (Pumped Thermal Energy Storage). L'accumulo termico si avvale di tecnologie con diversa maturità: dal commerciale alla ricerca di base per sfruttare calore sensibile, latente o energia termochimica, a temperature che vanno da -40 °C a più di 1000 °C.

Sistemi di accumulo termico a bassa temperatura

A temperature inferiori ai 150 °C, l'acqua accumulata in serbatoi coibentati è il materiale di accumulo più performante, essenzialmente per la sua elevata capacità termica e per il suo costo praticamente nullo. Recentemente, si stanno affermando i cosiddetti PCM (Phase Change Materials), che sfruttano il calore latente di fusione/solidificazione e lavorano a temperatura pressoché costante. Il limite di questi materiali è la loro bassa conducibilità termica, che limita la velocità negli scambi di calore, e che si sta cercando di incrementare con additivi ad alta conducibilità, anche su scale nanometriche, oppure con schiume metalliche immerse nel PCM [1]. Esistono svariati tipi di PCM in commercio, sia organici che inorganici, con differenti valori della temperatura di transizione solido-liquido. Alle basse temperature, i PCM organici più utilizzati sono a base di paraffine, di acidi grassi o di sali idrati.

Per quanto riguarda le applicazioni

dei sistemi di accumulo termico a bassa temperatura, con la crescente elettrificazione dei sistemi di condizionamento dell'aria, questi sistemi sono sempre più utilizzati nello sviluppo di programmi di gestione del carico elettrico, poiché consentono la gestione del carico di picco mediante lo spostamento del carico elettrico per il condizionamento ambientale, oltreché per migliorare la flessibilità della rete in caso di elevata percentuale di elettricità da rinnovabili. In letteratura vi sono innumerevoli applicazioni di questo tipo per livellare o shiftare il carico elettrico di sistemi di condizionamento ambientale, che coinvolgono anche pompe di calore elettriche reversibili, in cui l'accumulo di energia termica consente lo spostamento totale o parziale della domanda elettrica dalle ore di picco a quelle cosiddette *off-peak*, come le ore notturne, con riduzione dei costi operativi e delle apparecchiature per effetto del maggior funzionamento a pieno carico. Di contro, questi sistemi presentano costi di manutenzione più alti, gestione e controllo delle apparecchiature più

complessi, e maggiore ingombro. Un'altra applicazione riguarda la produzione di acqua calda sanitaria con i cosiddetti Night Storage Heaters (NSH), utilizzati per ottenere benefici economici nel caso in cui è incentivato il consumo di energia elettrica durante le ore notturne. Altre applicazioni riguardano lo sfruttamento di sistemi poli-generativi (CHP, CCHP) per il condizionamento ambientale [2]. Tali sistemi permettono di incrementare l'efficienza di conversione dei carburanti tradizionali, riducendo i consumi e l'impatto delle emissioni inquinanti. In questo caso, oltre al consumo, vi sono anche la produzione e l'immissione in rete di energia elettrica, nonché l'integrazione di sistemi di accumulo termico che consentono di disaccoppiare la produzione elettrica dal consumo di energia termica, permettendo di adattare il funzionamento di tali sistemi alle necessità della rete. **Molte applicazioni riguardano i sistemi di accumulo del freddo (CTES-Cold Thermal Energy Storage) accoppiati a sistemi elettrici per il condizionamento ambientale estivo [3].** Sono molti gli autori che hanno analizzato il *peak shaving* dei carichi elettrici grazie all'ausilio dei CTES, soprattutto mediante l'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM). Di particolare interesse è anche il *load shifting* realizzato con sistemi CTES

per il *solar cooling* [4]. Presso il Centro Ricerche ENEA di Portici, è presente il Laboratorio Prove Sistemi di Accumulo Termico (LPSAT), in cui vengono svolte attività riguardanti la sperimentazione, la modellazione termo-fluidodinamica e la simulazione numerica di sistemi innovativi per l'accumulo termico a temperature medio-basse, e di sistemi per l'accumulo del "freddo". Il laboratorio è anche impiegato per la caratterizzazione termo-fisica di materiali a cambiamento di fase (PCM) e per l'implementazione sperimentale di strategie innovative per la gestione e il controllo di impianti poli-generativi con accumulo termico per applicazioni residenziali. Il laboratorio è dotato di due impianti, uno per l'analisi sperimentale di sistemi di accumulo di energia termica a temperature medio-basse, e l'altro per l'accumulo del "freddo", entrambi visibili in Figura 1. È dotato, inoltre, di apparecchiature per la caratterizzazione termo-fisica di materiali per l'accumulo termico, e di una sala calcolo per la gestione, il controllo e l'ottimizzazione real-time del funzionamento degli impianti, nonché per la simulazione numerica.

Sistemi di accumulo termico a medio-alta temperatura

Si tratta di sistemi che lavorano so-

pra i 150 °C utili per molti processi industriali, per la produzione di energia elettrica o per alimentare reazioni chimiche. L'utilizzo del calore sensibile è la tecnologia più matura e diffusa. Miscele di sali fusi sono spesso utilizzate in accoppiamento ad impianti che utilizzano l'energia solare a concentrazione (CSP) per la produzione di energia elettrica, avvalendosi dei classici cicli termodinamici di trasformazione, **potendo raggiungere temperature fino a 550 °C.** La miscela più utilizzata è il cosiddetto "sale solare", costituito per il 60% da nitrato di sodio e per il 40% da nitrato di potassio. L'alta temperatura di solidificazione, tuttavia, impone l'utilizzo di particolari accorgimenti per minimizzare le perdite di calore e per evitare che la temperatura non scenda sotto i 290 °C. Commercialmente si utilizza in sistemi a doppio serbatoio, uno a 550 °C e l'altro a 290 °C. Si stanno tuttavia sviluppando miscele di sali ternarie o quaternarie, con l'aggiunta di nitriti o nitrati di calcio o di litio, che permettono di arrivare a temperature di solidificazione anche di 120 °C. Per impianti solari di taglie inferiori ai 10 MW_e, ove il costo di due serbatoi incide notevolmente sui costi fissi, l'ENEA ha sviluppato e sta ottimizzando, anche in virtù della partecipazione a progetti nazionali ed europei, accumuli di tipo termocline nei quali in



Fig. 1 (a) impianto prove accumulo termico a temperature medio-basse; (b) impianto prove accumulo del freddo



Fig. 2 Immagine dell'impianto sperimentale Solteca3 nel Centro Ricerche ENEA Casaccia

un singolo serbatoio viene sfruttata la diversa densità del sale con la temperatura, per cui si forma una zona liquida che divide la zona calda dalla fredda. Questa tecnologia è stata applicata con successo ad un sistema da 14 MWh nel progetto europeo MATS [5], a Borg el Arab (Egitto) in cui è stato anche inserito un generatore di vapore, e nel progetto Horizon 2020 ORC-PLUS [6] in un prototipo sviluppato nel Centro Ricerche ENEA Casaccia, entrambi coordinati da ENEA. Per quest'ultimo è stato anche realizzato a Ben Guerir (Marocco) un sistema termocline da 20 MWh che utilizza, come mezzo di accumulo, olio e magnetite. L'utilizzo dei solidi, quando possibile, rende il sistema più economico, soprattutto se vengono utilizzati materiali di scarto: è questo il caso del progetto Horizon 2020 RESLAG che utilizza sale fuso e scorie di materiale di altoforno, il cui prototipo si trova nel Centro Ricerche ENEA Casaccia.

Per temperature fino a 400 °C, nell'ottica di utilizzare materiali a basso costo, l'uso di moduli in calcestruzzo è di particolare interesse [7]. In questi sistemi ENEA sta studiando le dinamiche di scambio del calore in modo da poter ottimizzare la forma e la dimensione delle superfici di scambio termico, importante voce di costo. Questi sistemi, pur presentando buone velocità di scambio hanno problemi nella bassa capacità termica, che impattano sulle dimensioni dei moduli. Al contrario, sistemi che utilizzano i già citati PCM, che qui vengono selezionati tra quelli con temperature al di sopra dei 150-200 °C, presentano alte densità di accumulo, ma risentono di più bassa diffusività. Lo studio delle dinamiche di scambio di calore e di tipi e forme di superfici che possano favorirli è quindi al centro dell'interesse scientifico [8]. **Un'interessante linea di ricerca coinvolge l'uso di PCM in moduli cementizi e nei termoclini**

sopra menzionati. I PCM usati singolarmente offrono il massimo delle loro potenzialità per utenze che richiedono temperature costanti, dunque l'uso in cascata di diversi tipi di essi con differenti temperature di liquefazione, offre scenari promettenti perché permette di ottimizzare lo sfruttamento del calore latente dei PCM anche per utenze differenti. La Figura 2 riporta l'impianto sperimentale Solteca3 utilizzato per lo studio di accumulo termico con materiali cementizi e PCM fino a 300 °C. L'accumulo di tipo termochimico si basa su materiali soggetti ciclicamente a reazioni reversibili che consentono di immagazzinare l'energia termica sotto forma di energia chimica: oltre a presentare un'elevata densità di accumulo, sono idonei per applicazioni di lunga durata. L'attenzione dell'ENEA è focalizzata sui sistemi gas-solido operanti a temperature tra i 500 e i 1000 °C, caratterizzati da alta densità di accumulo, elevata ciclabilità e stabili-

tà, facile reperibilità e basso costo. In particolare, si sta studiando: l'ossido di calcio supportato su matrice inerte (Mayenite) e un materiale a base di ossido di manganese.

Linee di ricerca nazionali ed internazionali

L'International Energy Agency (IEA) ritiene questo settore strategico e se ne occupa con il Technological Collaboration Programme (TCP) dell'iniziativa ECES (Energy Conservation through Energy Storage). Tra le sue linee vanno rimarcate attività sulla modellizzazione e l'ottimizzazione; sui

PCM e su materiali di tipo termochimico; sull'accumulo termico con pompe di calore; sulle "Carnot Batteries", per trasformare l'eccesso di energia elettrica in calore da accumulare e ritrasformare all'occorrenza; e sui cosiddetti "District Heating and Storage", per grandi accumuli termici utilizzando fino a 50.000 m³ di acqua. A livello di programmi europei per le alte temperature vanno sicuramente citati Sfera3 e Stage-STE, conclusosi di recente, che affrontano queste tematiche a livello di grande collaborazione tra i principali istituti di ricerca internazionali. **A livello nazionale, si segnalano i progetti NEMESI, ComESto, Living Grid, e**

la Ricerca di Sistema Elettrico (PTR 2019-21), con un work package dedicato all'accumulo termico nonché diverse linee di attività rivolte all'accoppiamento con i CSP, all'accumulo del freddo mediante PCM e all'ottimizzazione di reti termiche mediante sistemi di accumulo termico.

L'ENEA, dunque, partecipando in questo ambito a progetti nazionali ed europei anche come coordinatore ed essendo presente ai tavoli delle agenzie internazionali di ricerca riesce ad avere un ruolo di rilievo sia per proporre idee innovative che per sviluppare ricerche di interesse strategico.

BIBLIOGRAFIA

1. Caliano M, Bianco N, Graditi G, Mongibello L, Analysis of a phase change material-based unit and of an aluminum foam/ phase change material composite-based unit for cold thermal energy storage, Applied Energy 256 (2019) 113921
2. Mongibello L, Bianco N, Caliano M, Graditi G, Comparison between two different operation strategies for a heat-driven residential natural gas-fired CHP system: Heat dumping vs. load partialization, Applied Energy 184 (2016) 55-67
3. Mongibello L, Graditi G, Cold storage for a single-family house in Italy, Energies 2016, 9, 1043
4. Helm M, Hagel K, Pfeffer W, Hiebler S, Schweigler C. Solar heating and cooling system with absorption chiller and latent heat storage - Energy Procedia, Volume 48, 2014, Pages 837-849
5. R. Liberatore, A. Giaconia, G. Petroni, G. Caputo, C. Felici, E. Giovannini, M. Giorgetti, R. Branke, R. Müller, M. Karl, T. Fluri, Analysis of a procedure for direct charging and melting of solar salts in a 14 MWh thermal energy storage tank, in: AIP Conf. Proc., 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5117739>
6. R. Liberatore, M. Falchetta, W. Gaggioli, D. Mazzei, V. Russo, Power production of an ORC system using a stratified molten salt as thermal energy storage integrated in a CSP plant, in: AIP Conf. Proc., 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5117651>
7. G.M. Giannuzzi, R. Liberatore, D. Mele, G. Mazzucco, G. Xotta, V.A. Salomoni, C.E. Majorana, R. Di Maggio, Experimental campaign and numerical analyses of thermal storage concrete modules, Sol. Energy. 157 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08>.
8. A. Miliuzzi, R. Liberatore, D. Nicolini, M. Chieruzzi, E.M. Veca, T. Crescenzi, L. Torre, Heat Exchange Analysis on Latent Heat Thermal Energy Storage Systems Using Molten Salts and Nanoparticles as Phase Change Materials, in: Intech, 2018: p. 13