

LA DIVERSITÀ DELL'ACCUMULO

di Mario Conte*

L'accumulo di energia per le nuove reti elettriche avrà diverse caratteristiche

L'ammmodernamento delle reti elettriche in corso in Europa e nel resto del mondo risponde a precise necessità di sviluppo per soddisfare la crescente domanda di energia elettrica, con un minore impatto ambientale e con maggiore integrazione di fonti rinnovabili non programmabili. In questo processo di rapida evoluzione del sistema elettrico, l'uso di sistemi di accumulo è particolarmente richiesto per aiutare a ridurre gli effetti negativi associati a questi cambiamenti, contribuendo a migliorare le capacità operative della rete, ridurre i costi (di investimento e di gestione), aumentare l'affidabilità dei sistemi modificati con nuove tecnologie e, nel contempo, rinviando e riducendo le necessità di investimento per nuove infrastrutture, a cui si possono citare la possibilità di utilizzare i sistemi di accumulo per rispondere a situazioni di emergenza, grazie a ulteriori potenziali servizi di back up e di stabilizzazione della rete. Lo svolgimento di queste accresciute funzioni dei sistemi di accumulo ha richiesto l'aggiornamento e il rinnovamento delle tecnologie di accumulo con caratteristiche tecniche ed economiche sempre più compatibili con le nuove funzioni. Fermo restando

l'obiettivo prioritario del contenimento del costo per ogni tipo di applicazione, le tecnologie per l'accumulo dell'energia si stanno sempre più differenziando e specializzando in modo da rendere massimo il valore economico e l'insieme dei vantaggi associati. Pertanto nelle reti elettriche si possono potenzialmente utilizzare in diversi punti della rete tutte le varie tipologie di sistemi di accumulo, classificabili in differenti modi: con il metodo di accumulo, con le caratteristiche prestazionali, con la taglia per applicazioni centralizzate o distribuite (da decine di MW fino a qualche kW). La classificazione più semplice si basa sul metodo di conversione utilizzato: l'energia elettrica, infatti, a eccezione dell'accumulo nel campo elettrico di un condensatore (che per caratteristiche costruttive può anche essere incluso nella famiglia dell'accumulo elettrochimico, come nel caso dei supercondensatori) e in quello elettromagnetico dei magneti superconduttori, non può essere accumulata direttamente ma deve essere prima convertita in un'altra forma di energia. Si possono quindi distinguere le seguenti metodologie di accumulo:

- **accumulo meccanico** (energia potenziale o cinetica)
 - pompaggio d'acqua
 - sistemi ad aria compressa (CAES)
 - volani (flywheels)
- **accumulo elettrochimico**
 - accumulatori elettrochimici (o anche, comunemente ma erroneamente, batterie)
 - supercondensatori (che sono costruttivamente dispositivi elettrochimici, denominati scientificamente, non a caso, condensatori elettrochimici), che



accumulano direttamente energia elettrica in forma elettrostatica o in combinazione con reazioni elettrochimiche

- **accumulo elettrico**
 - SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage (accumulo in magneti superconduttori)
- **accumulo termico**
 - accumulo del freddo
 - accumulo del calore
- **accumulo chimico**
 - Idrogeno
 - biocombustibili.

La tabella 1 confronta la densità di energia - riferita a quella effettivamente disponibile, dopo i vari processi di conversione - dei vari metodi di accumulo.

Accumulo meccanico

L'accumulo di energia elettrica in forma di energia meccanica può avvenire tramite la conversione in energia potenziale o cinetica. L'esempio più diffuso di accumulo di energia potenziale è quello dei sistemi di pompaggio d'acqua. Un'altra forma di accumulo di energia potenziale è correlata alla compressione elastica di una massa solida o gassosa: applicazioni di questo tipo sono i sistemi ad aria compressa (e, per piccole quantità, l'energia elastica di carica della molla degli orologi meccanici). L'accumulo sotto forma di energia cinetica avviene invece con la messa in movimento, lineare o rotante, di

TABELLA 1

Confronto dei diversi sistemi di accumulo per le reti elettriche

Metodo di accumulo	Tipo di accumulo	Densità di energia, kWh/m ³
Accumulo di energia meccanica	Energia potenziale: per esempio, pompaggio di acqua con differenza di altezza di 360 metri	1
	Energia cinetica in volani	10
Accumulo di energia elettrica	Energia in campi elettrici, come nei supercondensatori	10
	Energia in campi elettromagnetici, come negli SMES	10
Sistemi di accumulo elettrochimico	Batteria Piombo-acido	100
	Batteria Litio-ione	500
Accumulo di energia termica	Calore sensibile in acqua con $\Delta T=100$ K	115
	Calore latente in cambiamenti di fase, come quello da acqua a vapore	636
Accumulo di energia chimica	Idrogeno liquido	2.400
	Benzina	8.500

Fonte: SEFEP - ISEA 2012

una qualunque massa, come nel caso dei volani (in inglese, *flywheels*). Nel 2011 la capacità di pompaggio installata nel mondo ammontava a circa 123 GW. In Europa la capacità complessiva è di 45 GW e rappresenta circa il 5% della capacità elettrica totale. L'Italia ha una grande capacità di accumulo da pompaggio installata, pari a circa 7,6 GW e tuttavia nel 2011 ha prodotto meno di 2 TWh, contro 8 TWh

TABELLA 2

Principali caratteristiche tecniche degli accumulatori elettrochimici

Tecnologie per l'accumulo			Caratteristiche principali					
			Densità di energia		Potenza specifica	Vita ciclica	Efficienza	Intervallo di temperatura
			[Wh/kg]	[Wh/l]	[W/kg]	numero di cicli @ 80% DoD	[%]	[°C]
Piombo	acido libero		25 -40	60 -100	140 -350	200 -1.500	70 -75	20 -40
	VRLA		30 -40	80 -100	140 -300	300 -1.000	80 -85	20 -40
	compresso		40 -50	100	140 -250	800 -1.500	70 -85	20 -40
Alcaline	Ni-Cd							
	Tipo di	potenza	25 -40	130	500	800 -1.500	70 -75	-40 -50
		energia	40 -50	130	120 -350	800 -1.500	70 -75	-40 -50
	NiZn		60 -80	200 -300	500 -1.000	200 -1.000	60 -65	0 -40
	NiMH							
	Tipo di	potenza	40 -55	80 -200	500 -1.400	500 -2.000	70 -80	0 -45
energia		60 -80	200 -350	200 -600	500 -2.000	70 -80	0 -45	
Alta temperatura	NaS (riferiti ai moduli)		103	150	100	4.500	89	-20 -45
	Zebra - Na-NiCl ₂		90-120	183	100-120	2.500-3.000	90	-20 -45
Litio	Li lone							
	Tipo di	potenza	70 -130	150 -450	600 -3.000	800 -1.500	85 -90	-20 -60
		energia	110 -220	150 -450	200 -600	800 -1.500	85 -90	-20 -60
Li Polimeri		100 -180	100	300 -500	300 -1.000	90 -95	-20 -110	
Redox a flusso (varie coppie, valori medi)	Energia		60-80	75-80	50-150	10.000	70-75	0 -40
Supercondensatori	Tipo di	potenza	3 -5	3 -10	2.000 -10.000	500k -1M	95 -100	-20 -90
		energia	12 -20	3 -6	2.000 -10.000	500k -1M	95 -100	-20 -90

prodotti nel 2002, picco storico di utilizzo. A oggi, sono operativi solo due impianti CAES, uno in Germania (Huntorf) e uno negli Stati Uniti (McIntosh - Alabama). Il primo impianto commerciale di volani di taglia significativa (20 MW - 5 MWh), costruito dalla Beacon Power per conto della NYISO (New York Independent System Operator) per svolgere la funzione di regolazione di frequenza, è entrato in servizio nel 2011 a Stephentown (New York).

Accumulo elettrochimico

Gli accumulatori elettrochimici sono sistemi in grado di accumulare energia elettrica convertendola in energia chimica mediante processi elettrochimici. Si differenziano dalle comuni pile primarie perché in essi la reazione di conversione dell'energia è reversibile, e pertanto sono anche denominati pile secondarie. Un sistema di accumulo

elettrochimico normalmente consiste in un insieme, denominato batteria, di accumulatori elettrochimici in cui sia possibile ripristinare elettricamente lo stato dei reagenti precedente alla scarica e che siano collegati in modo da adattarsi alle richieste elettriche ed energetiche del sistema di utilizzazione. Le applicazioni a supporto del sistema elettrico connesse alla rete erano, a fine 2011, pari a 450 MW, una percentuale comunque molto limitata della potenza totale installata per tutte le applicazioni. Nel mondo sono state realizzate diverse decine di impianti con potenze fino ai 10 MW e contenuto di energia fino a 40-50 MWh. Le caratteristiche peculiari dei sistemi di accumulo elettrochimico sono la modularità e la flessibilità di realizzazione e di uso. La tabella 2 riassume lo stato dell'arte dei sistemi di accumulo elettrochimico. I supercondensatori, per la loro capacità di fornire alte potenze ma per tempi

molto brevi e quindi con scarsa attitudine ad accumulare grandi quantità di energia, sono indicati per applicazioni di potenza, particolarmente richieste nei servizi ancillari. I primi impianti di accumulo in reti elettriche con batterie al piombo sono stati costruiti dalla seconda metà degli anni Ottanta. Uno dei più grandi impianti in potenza di accumulo elettrochimico al mondo è stato realizzato con batterie Ni-Cd e si trova a Fairbanks, in Alaska: dal 2003 un impianto da 27 MW (e 14,6 MWh) opera da supporto alla potenza reattiva e come "spinning reserve". Attualmente la batteria Na-S (sodio-zolfo) è il sistema di accumulo elettrochimico più utilizzato nelle reti elettriche con numerosi impianti realizzati principalmente in Giappone e negli Stati Uniti. Un impianto da 180 kW (230 kWh) è stato realizzato da FIAMM in Italia per l'utilizzo del surplus di energia prodotta da un impianto fotovoltaico e altri sono in fase di costruzione e prova.

Negli Stati Uniti sono stati progettati e realizzati alcuni impianti dimostrativi con batterie litio-ione con potenze da 2 MW con lo scopo di regolare la frequenza, mentre altri impianti dimostrativi sono in fase di realizzazione. Impianti di varie taglie di batterie redox sono stati realizzati in diverse parti del mondo (Danimarca, Giappone, Stati Uniti e Tasmania) con principale applicazione nelle wind farm e con potenze comprese tra 5 kW e 4 MW. Infine i supercondensatori sono stati applicati soltanto in alcuni impianti dimostrativi di piccola taglia, come, per esempio, il sistema realizzato dall'ENEA per la Ricerca sul Sistema Elettrico per il livellamento del carico di utenze industriali.

Accumulo elettromagnetico

L'energia può essere accumulata in un campo magnetico creato dal flusso di corrente che attraversa un cavo conduttore (detto più precisamente "induttore"). Se l'induttore è composto da materiale superconduttore, il sistema di accumulo elettromagnetico di energia viene denominato SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). Le prime realizzazioni sperimentali degli SMES risalgono ai primi anni 70. Due unità SMES da 10 MW complessivi (le prime in Italia e tra le prime nel mondo) sono

state installate presso lo stabilimento di Agrate Brianza (MB) della società STMicroelectronics. Al mondo sono stati realizzati alcuni sistemi sperimentali per lo studio della tecnologia e nuovi progetti di ricerca di base e applicata sono stati recentemente finanziati negli Stati Uniti e in Giappone.

Accumulo termico

L'evoluzione delle reti elettriche apre nuove opportunità applicative anche a sistemi di accumulo più convenzionali. L'accumulo di energia termica in diverse forme (calore a bassa e alta temperatura, freddo per usi civili e industriali) è un chiaro esempio di queste nuove possibilità, indubbiamente legate alla disponibilità di fonti primarie di energia in forme diverse o mercati dell'energia con variazioni diurne od orarie dei costi. L'energia termica può essere accumulata con una molteplicità di tecnologie e metodi, che possono essere opportunamente utilizzati in vari punti della rete elettrica. I metodi di accumulo sotto forma di calore sensibile, di calore latente o di energia chimica (più propriamente termochimica) rappresentano le alternative più comunemente utilizzate. Un esempio molto avanzato di accumulo di energia termica in PCM è presente negli impianti solari termodinamici di generazione di energia termica CSP (Concentrating Solar Power). Le tecnologie più recenti sono contenute nell'impianto Archimede da 5 MWe, progettato da ENEL con il supporto di ENEA e realizzato in Sicilia.

Accumulo chimico

L'energia elettrica e l'energia termica (per esempio, da fonte solare) possono essere convertite mediante reazioni chimiche reversibili in energia chimica di diversi materiali da utilizzare per l'accumulo. Per esempio si possono produrre gas, come l'idrogeno e i biocombustibili, che possono essere trasportati e accumulati con diverse modalità per lunghe distanze e per lunghi periodi, praticamente senza perdite. L'idrogeno è considerato uno dei principali vettori energetici di un futuro auspicato non lontano, in cui l'economia dell'idrogeno sarà pienamente sviluppata. L'idrogeno può essere ottenuto da varie fonti,

TABELLA 3

Stato di sviluppo dei sistemi di accumulo

Tecnologia	Maturità applicativa	Costo, in \$/kW	Efficienza (%)	Limiti nella vita ciclica	Tempo di risposta
Pompaggio acqua	Maturo	1.500-2.700	80-82	No	da secondi a minuti
CAES (interrato)	Demo – Usato	960-1.250	60-70	No	da secondi a minuti
CAES (esterno)	Demo	1.950-2.150	60-70	No	da secondi a minuti
Volani	Demo - Maturo	1.950-2.200	85-87	>100.000	istantaneo
Batteria Piombo-acido	Demo-Maturo	950-5.800	75-90	2.200->100.000	millisecondi
Batteria Litio-ione	Demo - Maturo	1.085-4.100	87-94	4.500->100.000	millisecondi
Batteria a flusso (Vanadio)	Sviluppo - Demo	3.000-3.700	65-75	>10.000	millisecondi
Batteria a flusso (Zinco-Bromo)	Sviluppo - Demo	1.450-2.420	60-65	>10.000	millisecondi
Batteria Sodio-Zolfo	Demo - Maturo	3.100-4.000	75	4.500	millisecondi
Produzione di Gas (Power to Gas)	Demo	1.370-2.740	30-45	No	10 minuti
Supercondensatori	Sviluppo - Demo	N.D.	90-94	No	millisecondi
SMES	Sviluppo - Demo	N.D.	95	No	istantaneo

Fonte: State Utility Forecasting Group – Deutsche Bank Report 2015

come combustibili fossili, biomasse, acqua, con molteplici processi che vanno dal reforming, all'elettrolisi fino ai processi termochimici, fotobiologici e ad alta temperatura. Solo alcuni di questi processi hanno raggiunto il livello commerciale, ma la competitività economica dell'accumulo chimico in idrogeno (o altri combustibili gassosi o liquidi) per le applicazioni alle reti elettriche e altri impianti di generazione di energia è ancora da dimostrare, con la necessità di ulteriori attività di ricerca.

Il mercato dell'accumulo

Lo spostamento verso l'utente finale di quote maggiori di generazione di energia elettrica apre nuove opportunità per i sistemi di accumulo. La tabella 3 confronta l'attuale stato di sviluppo dei vari metodi di accumulo e alcune caratteristiche di interesse per le reti elettriche. Per esempio, alcune previsioni di sviluppo delle tecnologie e del mercato, come quella recente della Deutsche Bank, indicano riduzioni di sette volte del costo finale dei sistemi di accumulo elettrochimico nel giro di cinque anni. Su un totale di 127mila MW, presenti nelle reti elettriche di tutto il

mondo nel 2011, circa il 99% risultava composto dai sistemi di pompaggio dell'acqua, mentre i sistemi ad aria compressa (CAES) raggiungevano i 440 MW e subito dopo i sistemi con batterie sodio-zolfo mentre i rimanenti sistemi di accumulo arrivavano a 85 MW. L'accumulo termico per la sola produzione del freddo assommava a circa 1 GW. Le attività di ricerca e sviluppo unite ai vari studi di sistema e di mercato ipotizzano una crescente quota di dispositivi adatti ad applicazioni di taglie medio-piccole con prestazioni e caratteristiche funzionali più vicine a quelle possedute dai sistemi di accumulo elettrochimico

e dei CAES, mentre un ruolo ancora da valutare riguarderà metodi e soluzioni ancora più avanzate e innovative, quali la produzione e accumulo dell'idrogeno (nella prospettiva di sviluppo dell'economia dell'idrogeno) e i sistemi SMES, che utilizzeranno materiali superconduttori operanti a temperature energeticamente ed economicamente più convenienti.

Per le sole applicazioni in impianti solari, il mercato delle batterie è visto in crescita quasi esponenziale arrivando nel 2020 a circa 4,5 miliardi di dollari dagli attuali 200 milioni, su un totale di mercato delle batterie ricaricabili di circa 78 miliardi di dollari. Infine, altre stime di mercato (Boston Consulting Group) prevedono che il mercato dei sistemi di accumulo al 2030 possa raggiungere cumulativamente un totale, riferito alle sole reti elettriche, di 420 GW (oggi sono intorno a 130 GW) con un valore economico complessivo di 280 miliardi di euro: circa la metà di questo mercato è previsto che possa essere coperto da tecnologie di accumulo elettrochimico.

*ENEA