

CONFRONTO TRA DIVERSI SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA

Michele Urbani¹, Naida Corsi²

¹CRB-Centro di Ricerca sulle Biomasse, Via Michelangelo Iorio, 8 - 06125 Perugia (PG)

²IPASS-Consorzio Ingegneria Per l'Ambiente e lo Sviluppo Sostenibile, Via G. Guerra 23 – 06127 Perugia (PG)

SOMMARIO

I sistemi di accumulo di energia sono uno strumento di grande interesse, in quanto possono svolgere un ruolo fondamentale nel migliorare la flessibilità e l'efficienza dei sistemi energetici e la fruibilità delle diverse fonti di energia. La possibilità di poter utilizzare i sistemi di accumulo in più punti della catena energetica ha attivato molte discipline della scienza e della tecnologia e reso disponibili diversi metodi, materiali e sistemi in grado di rendere più efficiente, economicamente conveniente ed ambientalmente accettabile il processo di accumulo dell'energia. Tali sistemi trovano attualmente applicazioni nelle reti elettriche, nei sistemi di condizionamento termico, negli impianti con fonti rinnovabili, nei mezzi di trasporto e fino all'annunciata economia basata sull'idrogeno.

Nel presente lavoro vengono analizzate le potenzialità e i metodi per accumulare l'energia, dando alcuni esempi significativi delle principali applicazioni e i criteri da utilizzare per un confronto tra le varie tecnologie.

INTRODUZIONE

Uno dei maggiori ostacoli alla diffusione delle fonti energetiche rinnovabili è costituito dal fatto che spesso sono fonti discontinue, soprattutto per quanto riguarda il solare, l'eolico ed in qualche misura il mini e micro idroelettrico.

Per poter utilizzare appieno queste fonti primarie è necessario adottare dei sistemi di accumulo che abbiano un ciclo di carica-scarica con il rendimento energetico netto più elevato possibile. L'accumulo di energia è interessante quando l'energia recuperata utile netta, detratta quindi anche dell'energia spesa per il funzionamento degli ausiliari (pompe, scambiatori, controlli, ecc), è maggiore del 70% dell'energia in entrata.

Il metodo più comune per accumulare energia è quello di utilizzare i bacini idroelettrici nei quali, quando vi è eccedenza di produzione di energia elettrica, si pompa acqua da un bacino a valle ad uno a monte, così facendo si recupera l'energia prodotta da centrali termoelettriche che per loro caratteristiche tecniche non possono essere spente come ad esempio le centrali nucleari e ad olio combustibile e quindi nelle ore di bassa richiesta, generalmente notturne e festive, tale energia verrebbe dissipata.

Altro sistema attuale è l'utilizzo delle batterie, accumulatori appunto, che pongono dei problemi sia da un punto di vista dell'inquinamento, per le sostanze tossiche e/o nocive contenute nelle batterie, sia da un punto di vista pratico, visto che la vita delle batterie è comunque limitata, un certo margine di miglioramento in questo settore è comunque possibile, il tema è ampio e tratta anche i supercondensatori (detti anche supercapacitori o ultracapacitori) e i superconduttori.

Altri metodi di accumulo potrebbero essere sfruttati vantaggiosamente, come l'accumulo di aria compressa in caverne (metodo questo già in qualche misura collaudato) o in serbatoi interrati che permettono di fornire aria compressa ad attività industriali come ad esempio ad un impianto turbogas tradizionale, permettendo di eliminare il lavoro dei compressori e aumentando così notevolmente l'efficienza,

oppure la produzione di idrogeno, che può essere poi destinato agli usi più disparati, altri sistemi sono di tipo meccanico (volani o molle) ed altre tecniche permettono l'accumulo di energia termica da utilizzare per riscaldamento.

PRINCIPALI SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA

Bacini idroelettrici

I sistemi convenzionali di accumulo, basati sul pompaggio di acqua, utilizzano due serbatoi-bacini posti a quote differenti: nelle ore in cui l'energia prodotta è superiore all'energia richiesta l'acqua è pompata dal serbatoio inferiore al serbatoio superiore, nelle ore di picco di domanda l'acqua accumulata a monte viene utilizzata per produrre l'energia elettrica, i serbatoi a monte possono costituire una riserva idrica anche per altre necessità e possono produrre energia elettrica "gratis" quando raccolgono l'acqua di origine meteorica, sia i bacini a monte che quelli a valle possono essere utilizzati per mitigare gli effetti delle eccessive precipitazioni, spesso causa di allagamenti quando non di fenomeni alluvionali.

In situazioni favorevoli è tecnicamente possibile ricavare serbatoi da anfratti sotterranei naturali o da ex miniere.

Quando sussistono le necessarie condizioni geologiche e di sicurezza è permesso, senza dover munirsi di alcuna licenza o concessione di derivazione delle acque, dotarsi di laghetti collinari con profondità non superiori ai 10 metri e capacità non superiori ai 100.000 m³ (un ettaro, 100m per 100m o 200m per 50m ecc..).

Questo modesto bacino idrico ha un potenziale di accumulo di 200 kWh per ogni metro di dislivello utile, un laghetto collinare posto a 10 metri di quota rispetto ad un serbatoio inferiore (che potrebbe anche essere il mare) ha una capacità di accumulo di 2000 kWh, con 100 metri di dislivello l'energia accumulabile è di 20 MWh, se ben progettato e gestito potrebbe essere un valido strumento di prevenzione o di alleggerimento di fenomeni alluvionali, fenomeni ricorrenti in

molte situazioni dove questi laghetti potrebbero e dovrebbero essere attuati, in caso di abbondanti piogge la raccolta delle acque dal bacino imbrifero di competenza comporterebbe un guadagno netto di energia.

I primi sistemi di pompaggio sono stati realizzati in Italia e Svizzera a partire dal 1890, dal 1933 si è cominciato ad utilizzare turbine reversibili utilizzate sia come motore-pompa che come generatore di energia elettrica, attualmente le migliori tecniche permettono di ottenere da questi impianti efficienze fino all' 85%.

Tab. 1 Scheda analitica capacità/costi degli impianti di pompaggio attualmente in esercizio con capacità superiore ai 1000 MW di potenza.

| Salto (m) | Potenza massima totale (MW) | Ore di scarica | Costo impianto |
|-----------|-----------------------------|----------------|----------------|
| | 1690 | | |
| 590 | 1800 | | \$ 1080 M |
| 554 | 2400 | | |
| 955 | 1800 | | |
| | 1050 | | |
| | 1060 | | \$ 700 M |
| | 1140 | | |
| 1260 | 1020 | | |
| 1070 | 1184 | | |
| | 1000 | | |
| | 1040 | | |
| 524 | 1050 | 7.2 | |
| 505 | 1240 | | |
| 714 | 1600 | 8.2 | \$ 3200 M |
| 489 | 1200 | | |
| 411 | 1280 | 6 | |
| 470 | 1040 | | |
| 485 | 1036 | | |
| 387 | 1240 | | |
| 387 | 1040 | | |
| 229 | 1280 | 7 | |
| 203 | 1150 | | |
| 518 | 1200 | 13 | |
| 287 | 1096 | | |
| 539 | 1200 | | |
| | 1600 | | |
| | 2268 | | |
| 473 | 1200 | | |
| 310 | 1008 | | \$ 866 M |
| 380 | 1620 | | \$ 1338 M |
| 545 | 1890 | 5 | \$ 310 M |
| 350 | 1566 | 10 | |
| 520 | 1212 | 153 | \$ 416 M |
| 240 | 1080 | 10 | \$ 685 M |
| 110 | 1980 | 9 | \$ 327 M |
| 340 | 1200 | 12 | \$ 212 M |
| 33 | 2880 | 20 | |
| 370 | 1065 | 24 | \$ 652 M |
| 310 | 1900 | 21 | \$ 288 M |
| 380 | 2700 | 11 | \$ 1650 M |

Attualmente sono installati in tutto il mondo più di 90 GW di impianti di pompaggio, corrispondenti al 3% della capacità globale di generazione, questi impianti sono essenziali per il

funzionamento, regolazione e razionalizzazione delle reti di trasmissione dell'energia elettrica, gli impianti con potenza superiore ai 1000 MW sono più di 40.

Il costo degli impianti di pompaggio attualmente installati sono estremamente variabili, da 150 €/kW (USA) a più di 2000 €/kW, (Giappone). E' evidente che questo dipende dalle situazioni oggettive del territorio ma anche che la necessità di sistemi di accumulo sono necessari e convenienti anche quando hanno costi elevati.

Accumulatori voltaici

Oggi le batterie consentono di accumulare energia elettrica prodotta da varie fonti energetiche rinnovabili, pur con molti limiti, soprattutto ecologici.

Ci sono studi e prove sulle più svariate combinazioni chimiche, alcune in fase precommerciale con installazioni pilota ormai in fase definitiva di collaudo, altri sistemi sono nelle fasi iniziali di sviluppo e potranno essere installabili nel medio periodo e altri sistemi sono teoricamente promettenti ma con previsioni di disponibilità commerciale nel medio lungo termine.

Il più grande sistema di accumulatori elettrochimici è di 48 MWh installato a Tokyo ma è prevista a breve termine una installazione da 120 MWh a Barford in Inghilterra, i costi dichiarati sono competitivi con tutte le tecniche di accumulo energetico (+/-0,02 € al KWh accumulato) ma la sfida maggiore è posta dall'ottenimento di sistemi che permettano un contenuto impatto ambientale nella prospettiva di poter installare diffusamente molti sistemi ad alta capacità.

La realizzazione di batterie a basso costo, con un rapporto peso/volume/capacità tale da permettere una buona autonomia e con materiali non eccessivamente antiecológicos permetterebbe di realizzare i sistemi di autotrazione elettrici privati lungamente annunciati ma non ancora disponibili, almeno non con delle caratteristiche tali da attirare l'attenzione di una buona parte degli automobilisti, non mancano anche in questo settore molte interessanti prospettive che se realizzate potrebbero contribuire non poco alla gestione del sistema di generazione-accumulo-trasmissione dell'energia elettrica, oltre che, ovviamente, al minor inquinamento, soprattutto dei centri urbani.

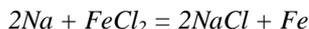
I principali accumulatori elettrochimici voltaici sono:

- VRB: Batterie a flusso Vanadio Redox
- Batterie al Litio
- Ni-Cd: Nichel-Cadmio
- Pb-H₂SO₄ Batterie al Piombo-acido e Piombo-gel
- Ni-NaCl Batterie Z.E.B.R.A.
- Ni-MH Batterie Nichel-idruri
- Ni-Zn Batterie Nichel-Zinco
- Zn-Br Batterie a flusso Zinco-Bromo
- Na-S Batterie Zolfo-Sodio
- PSB : Batteria a flusso Poli-Solfuro Bromuro
- Batterie Metallo-aria

Le batterie Ni-NaCl posseggono caratteristiche tecniche sono molto promettenti. Al momento non sono ancora disponibili di serie ma vengono installate su prototipi auto e mezzi pubblici in fase precommerciale.

Le batterie Ni-NaCl sono costituite da celle sodio-nichel cloruro funzionanti a caldo, conosciute con l'acronimo di ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activity) sono prodotte in esclusiva dalla MES-DEA di Stabio.

Una variante conosciuta sempre con il termine ZEBRA è la batteria Na-FeCl₂, nella quale la reazione totale è:



Opera a 250 °C ed ha un voltaggio di 2.35 V, le caratteristiche delle celle ZEBRA sono simili alla batteria NAS. I vantaggi di questo tipo di batterie riguardano l'elevata efficienza e le ottime prestazioni (oltre 1000 cicli di carica/scarica e ottimo rapporto peso/potenza) nonché l'uso di materiali non tossici.

Gli svantaggi sono legati all'elevata temperatura d'esercizio di ca. 260°C che deve essere mantenuta durante il periodo di scarica (5-8 giorni), ciò implica un notevole consumo - energetico

Aria compressa

Esistono diverse esperienze di accumulo-recupero di energia elettrica per mezzo di sistemi ad aria compressa, in genere questi sistemi utilizzano compressori alimentati da energia elettrica a basso costo prodotta nelle ore notturne, l'aria compressa viene accumulata in cavità sotterranee ermetiche, ad una pressione di 70-100 bar, l'aria compressa così ottenuta ed accumulata viene in genere utilizzata in un impianto turbogas tradizionale, permettendo di eliminare il lavoro del compressore e aumentando così notevolmente l'efficienza: si può risparmiare circa il 40% di gas per la produzione della stessa quantità di energia elettrica.

Un altro conveniente possibile impiego di aria compressa è l'utilizzo della stessa tale e quale, per azionamenti pneumatici in linee di produzione per le più svariate esigenze e in genere per automatismi, praticamente in tutte le unità produttive è necessario un anello di aria compressa, normalmente ad una pressione inferiore a 12 bar, utilizzando aria compressa prodotta di notte si ha un risparmio netto di energia elettrica giornaliera ed un abbassamento del picco di consumo della stessa.

Il primo sistema di accumulo ad aria compressa è stato installato nel 1978 ad Hundorf, in Germania, con una potenza di 290 MW, un altro da 110MW è stato installato nel 1991 in Alabama, è stato costruito in 30 mesi ad un costo di circa 600 \$/kW. In Ohio è prevista l'installazione di un sistema con una potenza di 2700 MW, il serbatoio è posto a 670 metri di profondità ed è una ex miniera di calcare.

Questi sistemi hanno una buona capacità di accumulo: da 2 a 3 kWh/im3 di serbatoio (sotterraneo), per un confronto basti pensare che mediamente i sistemi idroelettrici di accumulo hanno una densità energetica di appena 0,3 kWh / m3 di serbatoio idrico, invece l'efficienza netta è generalmente favorevole ai sistemi idroelettrici i quali permettono di restituire più dell' 80% dell'energia di origine.

Esistono anche un gruppo di accumulo integrati composti da serbatoio per l'aria compressa, compressore con motore/generatore, turbina e piccolo volano di avvio in caso di immediata richiesta di elettricità a causa di interruzioni di rete.

Volani

I volani sono "accumulatori" che utilizzano l'energia cinetica rotazionale. In questo settore tecnologico i nuovi sistemi di accumulo-generazione di energia elettrica prevedono l'impiego di volani ad asse verticale in un robusto contenitore di forma cilindrica nel quale viene mantenuto un certo grado di vuoto al fine di ridurre rumorosità e attriti aerodinamici del rotore, a ciò contribuisce anche l'adozione di cuscinetti magnetici, sostitutivi dei cuscinetti meccanici.

Il rotore monoblocco, senza avvolgimenti elettrici né parti a

contatto strisciante, non richiede raffreddamento e non genera vibrazioni avvertibili; è notevolmente robusto e sopporta anche piccole scosse di terremoto senza fermarsi. Dopo aver raggiunto l'elevata velocità di regime nominale il rotore può cedere energia quando necessario e lo fa sotto forma di corrente alternata ad alta frequenza variabile. Questa corrente viene raddrizzata da un convertitore a frequenza variabile in una tensione continua che costituisce la fonte di energia disponibile a tensione fissa.

La funzione di alimentatore del volano per la ricarica dalla rete viene svolta dallo stesso convertitore, con possibilità di eseguire la carica in tempi più o meno brevi, in funzione della disponibilità di corrente sulla linea DC.

Questi sistemi sono adatti per potenze da 2 kW / 6 kWh e fino a 500 kW e sono parallelabili per potenze più elevate; sono prodotti in serie, hanno le dimensioni di un armadio e sono commercialmente disponibili, i costi sono confrontabili con le batterie al piombo quando si considera la lunga vita e la minima manutenzione di questi "supervolani", senza le incertezze di funzionamento tipiche di un banco di batterie nel quale il malfunzionamento di una sola comporta la disfunzione del sistema.

Vantaggi (rispetto alle batterie chimiche tradizionali)

- minor peso a parità di energia accumulata
- maggiore efficienza (bassissime perdite termiche)
- assenza di componenti chimici pericolosi
- maggiore durata (non risente dei cicli di carica/scarica)
- nessun danno in caso di intensa scarica
- ricaricabile rapidamente
- dimensioni adattabili alle applicazioni
- non necessita rigenerazione

Supercapacitori

I supercapacitori o supercondensatori accumulano l'energia elettrica in due condensatori in serie a doppio strato elettrico EDL (Electrochemical Double Layer)

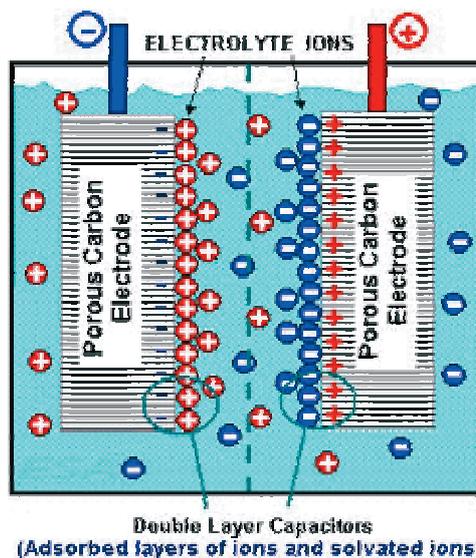


Fig.1 Schema sintetico di funzionamento di un Super Capacitore a doppio strato elettrico

Il supercapacitore più semplice è formato da due elettrodi polarizzabili, un separatore e un elettrolita; il campo elettrico è immagazzinato nelle interfacce tra l'elettrolita e gli elettrodi. Le cariche elettriche si dispongono all'interfaccia elettrodo/elettrolita del SC in modo fisico e non si hanno

processi chimici di ossido-riduzione. I supercapacitori sono interessanti per la loro elevata densità di potenza e per la loro grande durata; inoltre, l'immagazzinamento di energia è più semplice e più reversibile rispetto alle batterie convenzionali. Tuttavia la quantità di carica accumulabile in un SC è limitata e dipende dalla superficie di interfaccia elettrodo/elettrolita. Quelli maggiormente studiati e commercializzati utilizzano elettroliti in soluzione acquosa o organica ed elettrodi a base di carbone di alta area superficiale, per aumentare l'area superficiale degli elettrodi si stanno sviluppando materiali contenenti nanotubi di carbonio, altre ricerche mirano ad ottenere elettrodi composti da film di carbonio nanostrutturato. La presenza di molti vuoti e canali tra i grani di questo film; suggerisce una elevata porosità e una bassa densità del materiale. Misure di riflettività ai raggi X hanno confermato questa ipotesi. Rispetto alla tecnologia basata sui nanotubi, che richiede una sequenza complessa di passi, la deposizione da fasci supersonici di cluster appare una tecnica più semplice e versatile.

L'elevata porosità dei film di carbonio nanostrutturato così depositati, fa sì che la grande superficie attiva disponibile (1400 m²/g) permette di raggiungere i valori seguenti:

- capacità specifica 75 F/g
- massima densità di energia 76 Wh/Kg
- massima densità di potenza 506 KW/Kg

I condensatori a doppio strato, rispetto alle batterie elettrochimiche, non sono soggetti ad usura: sopportano più di 500 000 cicli di carica/scarica con una durata di vita minima di 10 anni, senza che la capacità si modifichi in funzione del tempo. E' particolarmente importante la loro capacità di poter essere caricati e scaricati a correnti molto elevate. Per questa ragione sono il mezzo adatto per i cosiddetti freni rigenerativi. In questo caso l'energia cinetica dei veicoli viene trasformata in energia elettrica che all'azionamento può essere nuovamente utilizzata. Soprattutto nel traffico cittadino, i cui cicli di guida sono caratterizzati da continue accelerazioni e frenate, è possibile in questo modo risparmiare fino al 25% di energia. Potenziali di risparmio simili risultano nel traffico pubblico locale su rotaia, infatti sono in grado di accumulare l'energia di una metropolitana durante la fermata per poi cederla al riavvio successivo, considerando le numerose fermate e ripartenze di questi mezzi è intuitivo il recupero energetico che ne deriva, per queste applicazioni sono già commercialmente disponibili i sistemi appropriati

Superconduttori

Questa tecnologia per l'accumulo energetico è stata sviluppata, per primi, dalla società **Superconductivity Inc.**, denominata **SMES** (Superconducting Magnetic Energy Storage) è basata sull'accumulo di energia in forma di campo magnetico per mezzo di potenti magneti superconduttivi. [1].

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-Milano della società **STMicroelectronics** dove proteggevano i delicati processi produttivi dei chip da momentanee diminuzioni della tensione di alimentazione ("buchi") che possono provocare lunghe interruzioni dell'attività produttiva.

Attualmente in Italia è in fase di studio l'utilizzo integrato della tecnologia dell'idrogeno liquido e dei superconduttori per l'uso efficiente dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili [2]

Idrogeno

Tutte le fonti energetiche rinnovabili possono essere immagazzinate sottoforma di idrogeno, con efficienze variabile a seconda delle tecnologie: l'energia eolica, idroelettrica e geo-termoelettrica possono essere trasformate in idrogeno con una efficienza del 70% circa.

Le biomasse possono dare idrogeno con efficienze simili a quelle ottenibili per la produzione di energia elettrica o carburanti dalle stesse (circa 25-30%),

Attualmente ottenere idrogeno dall'energia solare è meno conveniente rispetto agli altri sistemi ma sono in fase sperimentale diverse tecnologie abbastanza promettenti: l'ENEA sta portando avanti (con molta lentezza) un progetto di termolisi-catalitica che ha l'obiettivo di ottenere idrogeno con un'efficienza superiore al 40% dell'energia solare captata.

Un'altra tecnologia, in fase di R&S, è basata sulle reazioni fotoelettrochimiche, con la quale 2 celle solari catturano la luce del sole da ogni porzione dello spettro ultravioletto. L'interazione dei fotoni con un materiale semiconduttore innesca la reazione che eccita gli elettroni e scinde le molecole di acqua in idrogeno e ossigeno, attualmente l'efficienza è dell'8% ma si ritengono possibili efficienze superiori e una soglia di convenienza ad una efficienza del 10%. E' importante trovare validi sistemi di accumulo di idrogeno in quanto ciò permetterebbe di utilizzare le enormi risorse rinnovabili che spesso possono essere coltivate in aree remote, quali le aree limitrofe ai deserti (sistemi solari) o le pianure siberiane (enorme potenziale eolico), o gli acquiferi geotermici dell'Alaska e dell' Islanda, ecc.

L'idrogeno può essere accumulato anche combinandolo con alcuni composti organici. ammoniaca, metanolo, metilcicloesano. In particolare l'utilizzo del toluene, con formazione di metilcicloesano, è promettente poiché sia il toluene sia il metilcicloesano sono composti conosciuti, facilmente trasportabili e relativamente sicuri. La formazione di metilcicloesano è ottenuta mediante idrogenazione del toluene, una reazione esotermica che è seguita da quella endotermica di deidrogenazione (che avviene a circa 500 °C), con un consumo del 20% dell'energia contenuta nell'idrogeno liberato. Ciò significa che il restante 80% può essere utilizzato.

CARATTERISTICHE DEI DIVERSI SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA

Il motivo per cui vengono sviluppati così diversi metodi di accumulo è che nessuno di loro risulta ottimale in senso assoluto. Tuttavia, confrontare alcune delle proprietà chiave dei suddetti sistemi può contribuire a stabilire l'idoneità di ciascuno di essi ad una specifica applicazione.

Alcune delle caratteristiche delle tecnologie finora descritte vengono riportate nella Tabella 2 [3]. Nella Tabella 3 sono invece riportate le capacità specifiche dei principali accumulatori o vettori di energia

I volani, pur costituendo una importante soluzione tecnologica per il settore automobilistico, non sembrano essere una risposta ai bisogni più generali di accumulo di energia.

Sia i superconduttori magnetici che i supercapacitori sono importanti in quanto, oltre ad accumulare energia aumentano la qualità dell'energia della rete. Infatti tali dispositivi possono rilasciare correnti elevate e reagire a rapidi cambi di tensione.

Tab. 2 Caratteristiche dei principali accumulatori di energia

| Metodo di accumulo | Volani bassa velocità | Volani alta velocità | Bacini idrici |
|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| Caratteristiche | | | |
| Costo capitale/MWh | \$ 300,000 | \$ 25,000,000 | \$ 7,000 |
| Peso/MWh | 7,500 kg | 3,000 kg | 3,000 kg |
| Efficienza | 0.9 | 0.93 | 0.8 |
| Costo manutenzione/MWh | \$ 3 | \$ 4 | \$ 4 |
| Maturità | Commerciale | Neo Commerciale | Commerciale |
| Capacità | 50 kWh | 750 kWh | 22,000 MWh |
| Durata | 20 anni | 20 anni | 40 anni |
| Metodo di accumulo | Aria compressa | Superconduttori | Supercapacitori |
| Caratteristiche | | | |
| Costo capitale/MWh | \$ 2,000 | \$ 10,000 | \$ 28,000,000 |
| Peso/MWh | 2.5 kg | 10 kg | 10,000 kg |
| Efficienza | 0.85 | 0.97 | 0.95 |
| Costo manutenzione/MWh | \$ 3 | \$ 1 | \$ 5 |
| Maturità | Commerciale | Commerciale | Commerciale |
| Capacità | 2,400 MWh | 0.8 kWh | 0.5 kWh |
| Durata | 30 anni | 40 anni | 40 anni |

Tab. 3 Capacità dei principali accumulatori o vettori di energia

| Tipologia | kWh/kg | kWh/m ³ |
|-----------------|--------|--------------------|
| Batterie | 0,1 | |
| Supercapacitori | 0,07 | |
| Bacini idrici | | 0,3 |
| Volani | 1 | |
| Aria compressa | | 2 ⁽¹⁾ |
| Idrogeno | 35 | 460 ⁽²⁾ |
| Benzina | 14 | |
| Etanolo | 12 | |

Note:

⁽¹⁾ a 70 bar

⁽²⁾ a 200 bar

Per l'accumulo di energia su larga scala si utilizzano soprattutto sistemi basati sul pompaggio d'acqua e sistemi ad aria compressa. Questi sono in grado di attenuare anche le fluttuazioni annuali in quanto le perdite energetiche sono

abbastanza basse. Uno degli svantaggi principali è la dipendenza dalle formazioni geologiche che limita la possibilità di installazione degli impianti solo a determinate aree.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata effettuata una ricerca bibliografica sulle caratteristiche e sulle potenzialità dei principali sistemi di accumulo di energia, sia tradizionali che in fase di sviluppo. L'interesse nei confronti di questi dispositivi negli ultimi anni è notevolmente cresciuta, anche in considerazione della liberalizzazione del mercato nazionale dell'energia elettrica e dell'introduzione delle tariffe multiorarie. La notevole capacità di accumulo e i costi relativamente bassi di impianto di sistemi quali ad esempio i sistemi ad aria compressa consentono di immagazzinare energia durante il periodo notturno (quando il costo dell'energia elettrica è inferiore) per poi reimmetterla in rete durante i periodi di maggiore richiesta con interessanti margini di profitto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. L. Diederich, E. Barborini, P. Piseri, A. Podesta', P. Milani, A. Schneuwly, R. Gallay Supercapacitors based on nanostructured carbon electrodes grown by cluster beam deposition, *Applied Physics Letters* 75, 2662 (1999)
2. L. Trevisani, M. Breschi, M. Fabbri, A. Morandi, F. Negrini, P.L. Ribani, Utilizzo integrato della tecnologia dell'idrogeno liquido e dei superconduttori per l'uso efficiente dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili *Dipartimento di Ingegneria Elettrica Università di Bologna*
3. Kenny Y. C. Cheung, Simon T. H. Cheung, R. G. Navin De Silva, Matti P. T. Juvonen, Roopinder Singh, Jonathan J. Woo, Large-Scale Energy Storage Systems, *Imperial College London, ISE2 2002/2003*