

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna`

Scuola di Scienze

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Corso di Laurea in Fisica

Creazione della voce italiana di Wikipedia sugli SMES

Relatore:

Prof. Enrico Gianfranco Campari

Presentata da:

Goffredo Pierbattisti

Anno Accademico 2022/2023

Abstract

Gli SMES (*superconducting magnetic energy storage*) sono sistemi che tramite l'utilizzo di un superconduttore permettono di accumulare energia elettrica all'interno del campo magnetico del superconduttore stesso.

Lo scopo di questa tesi è stato quello di effettuare uno studio sulle caratteristiche e le applicazioni degli SMES al fine di poter colmare la mancanza di una voce italiana dedicata su Wikipedia.

La pagina web della voce, una volta approvata, sarà consultabile cercando:

Immagazzinamento di energia nel campo magnetico di un superconduttore SMES.

Indice

Introduzione	2
1 I superconduttori	4
1.1 Introduzione ai superconduttori	4
1.2 Temperatura critica.....	5
1.3 Effetto Meissner	6
1.4 Teoria BCS	9
2 Gli SMES	11
2.1 Introduzione agli SMES	11
2.2 Principi di funzionamento degli SMES.....	13
2.3 Applicazioni degli SMES	16
3 Creazione di una voce di Wikipedia	20
3.1 Introduzione.....	20
3.2 Criteri per la realizzazione di una voce.....	21
3.3 Implementazione della voce per gli SMES	23
Conclusioni	26
Ringraziamenti	27
Bibliografia	28

Introduzione

La scienza, dea indiscussa della modernità, onnipresente ed onnipotente nei suoi metodi e nella sua capacità di penetrare la realtà pretende che oggi sia quanto mai importante curare con attenzione la trasmissione del sapere scientifico e la divulgazione della scienza stessa, che devono essere accessibili universalmente a tutti in maniera democratica e oggettiva tramite fonti verificate e riconosciute dalla comunità stessa.

Entrambi questi obiettivi trovano il loro naturale svolgimento nella nota piattaforma enciclopedica di Wikipedia, la quale, con oltre 55 milioni di voci al suo interno e 21 anni di onorato servizio [1] rappresenta una delle collaborazioni globali e pacifiche tra le più importanti mai realizzate dall'uomo che spazia tutti gli aspetti dello scibile umano.

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di contribuire attivamente, seppur in minima parte, all'accrescimento del sapere scientifico presente in Wikipedia tramite la creazione di una voce italiana dell'enciclopedia in un tema ad alto valore tecnologico, in particolare è stata costruita la voce italiana riguardante gli SMES, dall'inglese *superconducting magnetic energy storage*, sistemi che permettono di immagazzinare con un'elevatissima efficienza energia elettrica nel campo magnetico di un superconduttore adeguatamente ingegnerizzato, al fine di renderla rapidamente disponibile con un'elevata *power quality*, utile in applicazioni avanzate.

La tesi ricalcherà sia la fase di costruzione della pagina sia gli argomenti trattati all'interno della stessa; in particolare uno dei criteri necessari per costruire una voce enciclopedica è l'essere autoconsistente e universale, ovvero fruibile alla maggior parte delle persone, dunque è opportuno fornire gli strumenti basilari utili alla comprensione dell'argomento senza dilungarsi in questioni tecniche le quali trovano ampio spazio all'interno dei vari testi specialistici.

Nella parte iniziale si tratta la classe dei superconduttori: questa parte ha scopo introduttivo e nessuna pretesa di essere esaustiva. In seguito entreremo nel merito della tecnologia SMES, esplorandone i principi di funzionamento, facendo un'analisi energetica e considerando possibili applicazioni, limiti nello sviluppo ed orizzonti futuri.

Lo stoccaggio dell'energia [2] è un tema sempre presente nella storia ed è andato di pari passo con lo sviluppo tecnologico ed economico; tra i vari metodi per immagazzinare energia gli SMES sono i materiali con la migliore efficienza energetica, raggiungendo picchi del 95% tra carica e scarica dell'apparato (*round trip*).

Uno dei limiti dell'utilizzo dei superconduttori come metodo di immagazzinamento dell'energia è la difficoltà nel mantenere i materiali al di sotto della temperatura critica, per questo motivo gli SMES vengono utilizzati principalmente in stoccaggi dell'energia di breve durata o applicazioni in cui è richiesta una *power quality* elevata, ad esempio nel *load leveling*, ovvero nell'assorbimento ed emissione di energia elettrica da una rete effettuato in modo da far coincidere produzione e consumo elettrici per evitare sbalzi ed instabilità nella trasmissione sulla rete.

Capitolo 1

I Superconduttori

1.1 Introduzione ai superconduttori

I superconduttori sono una classe di materiali che presentano caratteristiche sorprendenti: sotto ad una certa temperatura critica T_c manifestano una transizione di fase in cui si assiste all'annullarsi della resistenza elettrica al passaggio di corrente, con una contemporanea espulsione del campo magnetico dall'interno del materiale durante la transizione allo stato di superconduttore (effetto Meissner).

I superconduttori grazie al fenomeno delle correnti persistenti sono particolarmente adatti alla creazione di campi magnetici di intensità elevata e trovano applicazione in vari ambiti come la fusione nucleare, l'MRI, e i grandi acceleratori di particelle.

L'effettiva natura di superconduttore, ovvero di materiale per cui sia ragionevole assumere $\rho = 0$ è data dall'esistenza di correnti persistenti, ovvero correnti che non dissipano energia per effetto Joule e dunque in principio di durata illimitata, osservate studiando i campi magnetici indotti dalle correnti stesse.

In questo capitolo, a seguito di una breve introduzione storica sull'argomento, verranno esplorate le principali proprietà che definiscono un materiale superconduttore, in particolare la temperatura critica con la conseguente classificazione in superconduttori LTS e HTS e l'effetto Meissner che assieme al campo critico descrivono il comportamento in presenza di un campo magnetico di detti materiali, portando alla divisione in superconduttori di I e II tipo.

In seguito, verrà introdotta la teoria BCS, teoria quantistica in cui si spiega la superconduttività tramite la condensazione delle coppie di Cooper, coppie di elettroni che formano uno stato legato, libere di muoversi nel reticolo cristallino senza subire scattering da questo.

La teoria BCS, particolarmente precisa nel caso degli LTS di II tipo, presenta serie difficoltà nella spiegazione degli HTS.

Per concludere si vedranno alcune immediate applicazioni dei magneti superconduttori.

1.2 La temperatura critica

La superconduttività fu scoperta da H. Kamerlingh Onnes nel 1911 [3] a Leiden in un esperimento in cui stava misurando l'andamento in funzione della temperatura della resistività del mercurio durante un raffreddamento a temperature prossime allo zero kelvin.

Omnes osservò una riduzione nella resistività secondo la legge

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (1)$$

e scoprì che raggiunta la temperatura $T_c = 4.2\text{K}$ la resistività crollava a valori non misurabili sperimentalmente la cui unica spiegazione era assumere che fosse $\rho = 0$ fig(1).

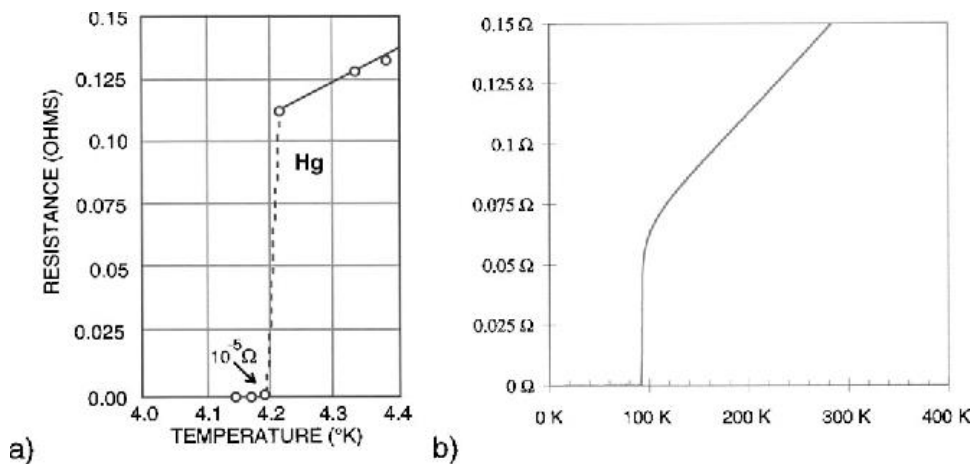


Figura 1 [16] diagramma a): caduta della resistenza (in Ohms) in funzione della temperatura per il mercurio in corrispondenza alla transizione nella fase di superconduttore

Nel corso degli anni, in successivi esperimenti vennero trovati altri elementi e leghe con temperature critiche che spaziavano in un ampio range; da circa 5K fino ad arrivare in alcune leghe a temperature critiche dell'ordine di 150K e in alcuni casi a grandi pressioni

anche temperature di 200K fig(2), così, per tener conto dell'ampia casistica di temperature critiche è stato deciso di dividere i superconduttori in due categorie, gli LTS (*low temperature superconductors*) in cui si ha $T_c < 30$ K e gli HTS (*high temperature superconductors*) in cui $T_c > 30$ K.

La ricerca di superconduttori con T_c elevate è ancora molto attiva e si ricerca al fine di ottenere materiali superconduttori a temperatura ambiente.

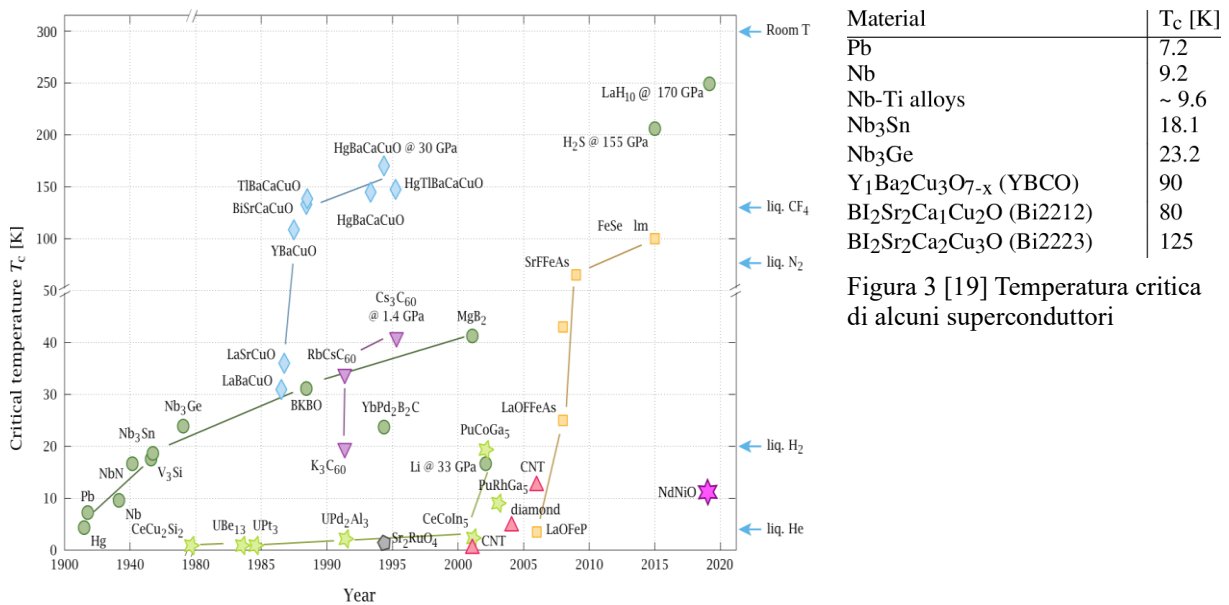


Figura 3 [19] Temperatura critica di alcuni superconduttori

Figura 2 [17]: Serie storica di scoperte dei materiali superconduttori; in ordinata è graficata la temperatura critica, notare che con l'avanzare degli anni la ricerca ha fatto scoperte importanti nell'ambito dei superconduttori HTS

1.3 Effetto Meissner

L'effetto Meissner, scoperto dai fisici Meissner e Ochsenfeld nel 1933 [4] è uno dei fenomeni caratterizzanti i superconduttori e consiste nell'espulsione del campo magnetico dal materiale quando questo passa nella fase di superconduttore.

La natura dell'espulsione può essere indagata in due modi diversi: in un primo caso si può raffreddare un materiale superconduttore in un campo magnetico esterno nullo $H = 0$ (*zero field cooling*) e modificando in seguito H stesso si studia la risposta del materiale; si

osserva sperimentalmente l'assenza di induzione magnetica all'interno del superconduttore.

In questo caso l'assenza di induzione magnetica B all'interno del super conduttore potrebbe essere una conseguenza della resistività nulla e della legge di Lenz $E = \frac{d\varphi_B}{dt}$ per la quale vengono a crearsi delle correnti che si oppongono alla variazione di flusso del campo magnetico le quali, trovandosi in un materiale a conduttività infinita, non dissipano ma schermano costantemente il campo magnetico H esterno mantenendo l'induzione magnetica $B=0$.

Nonostante ciò, gli esperimenti mostrano la possibilità di ottenere lo stesso effetto di espulsione raffreddando sotto la T_c un materiale immerso in un campo magnetico $H \neq 0$.

Ciò rende evidente che non sia possibile descrivere l'effetto Meissner col la legge di Lenz in quanto in questo caso l'espulsione del campo si osserva in corrispondenza di una transizione di fase termodinamica instaurata da una variazione di temperatura che porta ad una situazione di equilibrio energetico del materiale.

quindi l'effetto Meissner è un effetto caratteristico dei superconduttori che deve essere verificato qualora si voglia studiare la natura di un dato materiale a temperature superconduttive, ovvero un materiale per essere considerato realmente un superconduttore deve presentare indipendentemente sia le correnti persistenti inducibili dall'esterno, sia l'effetto Meissner.

Una descrizione microscopica dell'effetto Meissner è possibile grazie alla teoria BCS; volendo invece osservare le proprietà macroscopiche del superconduttore, è possibile dare una descrizione qualitativamente corretta considerando un superconduttore come un materiale diamagnetico perfetto in cui l'induzione $B=0$; infatti si ha che in presenza di un campo magnetico esterno H , con suscettività magnetica χ , vale:

$$M = \mu_0 H \quad (2)$$

Da cui:

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi)H \quad (3)$$

E dunque si trova, una volta imposto $B = 0$ come richiesto dall'effetto Meissner, che $\chi = -1$, ovvero che il superconduttore è analogo ad un diamagnetico perfetto.

Il legame termodinamico tra temperatura critica T_c e campo magnetico evidenziato dall'effetto Meissner nella transizione di fase dei superconduttori di tipo I richiede l'esistenza di un campo critico H_c dipendente dalla temperatura oltre il quale il fenomeno di espulsione del campo magnetico sia energeticamente sconveniente; quando un campo maggiore o uguale a H_c viene applicato nei pressi di un materiale nello stato superconduttivo si ha la perdita del comportamento di superconduttore.

Sperimentalmente si trova che esiste un diagramma di fase H-T in cui la curva di transizione da comportamento normale a super conduttore è di tipo parabolico, seguendo la legge sperimentale

$$H_c(T) = H_0 \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right) \quad (4)$$

Nei superconduttori di tipo II invece assistiamo a una parziale espulsione del campo magnetico del materiale in risposta ad un campo H compreso tra $H_{c2}(T)$ e $H_{c1}(T)$ fig(5).

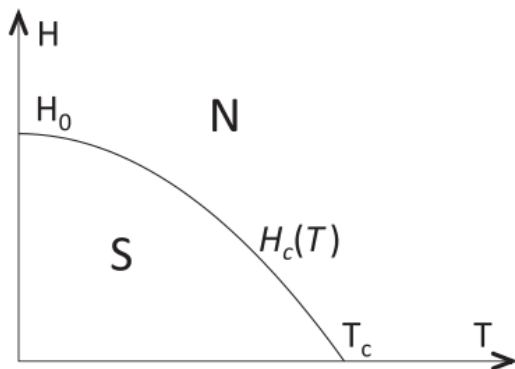


Figura 4: Diagramma di fase di un superconduttore di I specie; con S si indica la fase di superconduttore e con N la regione nella quale si ha un comportamento normale

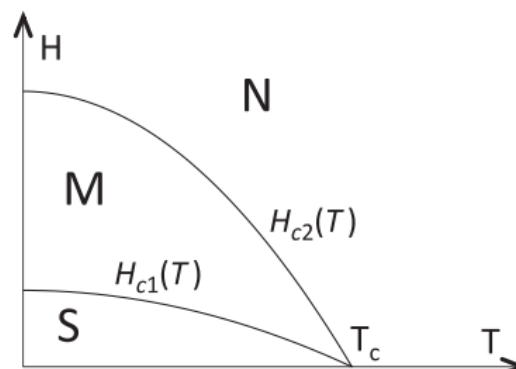


Figura 5: Diagramma di fase di un superconduttore di II specie

Nella regione compresa tra gli archi H_{c1} e H_{c2} si osserva un comportamento misto del materiale in cui si sviluppano domini superconduttivi alternati a domini non superconduttivi.

La transizione dallo stato di superconduttore a quello normale dovuto alla presenza di un campo magnetico critico pone limitazioni all'intensità dei campi magnetici che è possibile creare senza che gli stessi modifichino la natura di superconduttore del materiale, e dunque si hanno anche limitazioni alle correnti che possono scorrere

liberamente all'interno di un superconduttore il cui limite superiore viene detto corrente critica I_c .

L'effetto Meissner trova importanti applicazioni all'interno dell'imaging per risonanza magnetica e nella levitazione magnetica, dove sono necessari campi magnetici intensi e controllabili.

1.4 La teoria BCS

Lungi dall'essere una trattazione esaustiva, in questo paragrafo verranno introdotte le principali idee della teoria BCS, la prima teoria per il comportamento dei superconduttori LTS di seconda specie.

Le prime osservazioni alla base del modello BCS sono che i liquidi refrigerati sino a raggiungere lo stato superfluido, presentando comportamenti altamente correlati e privi di viscosità, sono dal punto di vista logico molto vicini al comportamento dei superconduttori.

In particolare, il fatto di trovare che gli isotopi ^4He e ^3He che differiscono solo nel carattere molecolare di bosone-fermione possedevano o meno alla temperatura di superfluidità le caratteristiche di un fluido perfetto ha guidato la realizzazione di una teoria in cui una correlazione analoga a quella bosonica viene attribuita alle coppie di Cooper altamente correlate presenti in un superconduttore.

L'idea alla base della teoria BCS è che coppie di elettroni con un'energia sufficientemente piccola da interagire in maniera significativa con il reticolo cristallino possano con questo scambiarsi fononi, ovvero quanti di interazione reticolare.

Questa interazione permette la formazione di uno stato legato di coppie di elettroni dette coppie di Cooper il cui moto nel reticolo è privo di ostacoli e scattering e da luogo al fenomeno della superconduttività.

Il primo passo nella comprensione della teoria BCS fu formalizzato da L.N Cooper nel 1956 [5] quando venne dimostrato che un mare elettronico di Fermi la presenza di una generica forza attrattiva tra due elettroni generava uno stato legato tra gli stessi.

In un secondo momento venne teorizzato che l'interazione che avviene tra un elettrone che si muove con energia

$$E = K_b T < \frac{h}{\omega_d} \quad 5)$$

e il reticolo cristallino, dove ω_d è la frequenza di oscillazione del reticolo, era tale da modificare in maniera sensibile il reticolo fig(6).

Questa variazione nella struttura del reticolo causa un addensamento di carica positiva che con un certo delay temporale segue facendo da "scia" al moto dell'elettrone il quale potrà dunque attrarre indirettamente un altro elettrone che si trovi nei pressi dell'addensamento di carica senza risentire della repulsione coulombiana visto il ritardo nell'interazione, causando così la creazione di una coppia di Cooper.

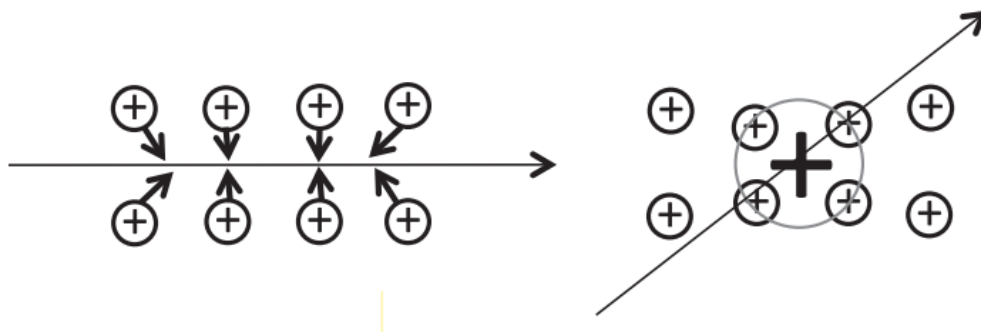


Figura 6: Variazione della struttura del reticolo cristallino (cariche positive) al passaggio di un elettrone la cui energia sia confrontabile con i modi vibrazionali del reticolo

La conduttività infinita (o analogamente la resistività nulla) trova come spiegazione fenomenologica il fatto che le coppie di Cooper a bassa temperatura hanno un comportamento analogo a quello bosonico in quanto sono lo stato legato di due fermioni in stati quantici con spin appagati secondo il principio di esclusione di Pauli. Essendo presenti un numero molto elevato di coppie, queste formano uno stato condensato nel quale sono altamente correlate l'energia per separare una coppia di Cooper con quella necessaria per separare un numero molto maggiore di coppie. Questo fa sì che durante il loro moto le coppie di Cooper non possano interagire con gli atomi del reticolo dando luogo all'effetto Joule in quanto l'energia della singola coppia è correlata a quella di tutto il condensato.

La teoria BCS è una teoria fondamentalmente quantistica e richiede per un'approfondita comprensione l'uso dei formalismi della seconda quantizzazione, la quale, esulando dallo scopo di questa tesi, viene rimandata a testi specialistici.

Capitolo 2

Gli SMES

2.1 Introduzione agli SMES

La sempre crescente voracità energetica dei paesi più sviluppati, unita alla richiesta incalzante di energia dei paesi in via di sviluppo, insieme alle sfide tecnologiche e climatiche, in particolare alla decarbonizzazione nel 2050 prevista dagli accordi di Parigi, hanno richiesto e richiedono lo sviluppo di tecnologie per la produzione, il trasporto e lo stoccaggio di energia che siano efficienti, a basso impatto ambientale, sicure e scalabili.

A causa della natura intermittente della maggior parte delle fonti di energia rinnovabile come il vento e il solare, lo stoccaggio dell'energia stessa è diventato un componente importante per qualsiasi implementazione sostenibile e affidabile.

Numerose ricerche all'avanguardia sono state condotte su sistemi di stoccaggio dell'energia validi per le applicazioni di energie rinnovabili. Alcuni dei sistemi di stoccaggio più ampiamente investigati includono sistemi di immagazzinamento di energia con batterie (BESS), idro-accumulo con pompaggio (PHES), stoccaggio di energia ad aria compressa (CAES), volano, super-condensatori e sistemi di stoccaggio superconduttivo ad energia magnetica (SMES) fig(7).

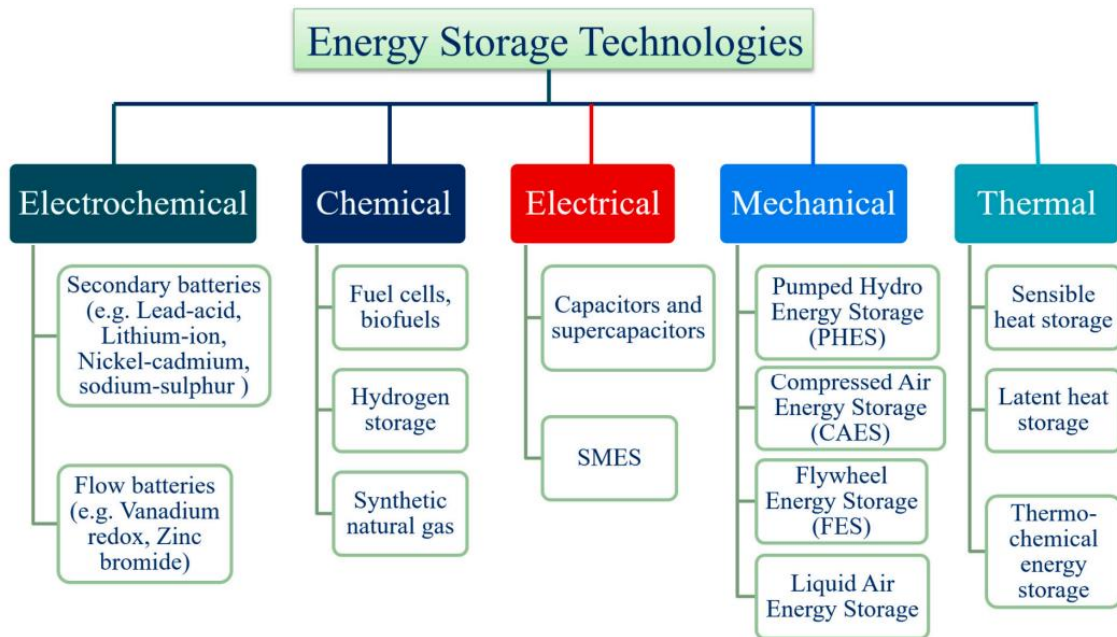


Figura 7: Schema riassuntivo dei principali sistemi per accumulare energia

In questa tesi in particolare verranno esplorati gli SMES (*superconducting magnetic energy storage*), i quali permettono di immagazzinare energia elettrica nel campo magnetico di un magnete superconduttore.

Lo SMES è un sistema che si presta principalmente per la fornitura di potenza impulsiva ad alto valore energetico [7], in quanto scarica rapidamente l'energia che ha accumulato ed ha un'efficienza nel ciclo di carica e scarica che si avvicina al 95%, dunque le perdite energetiche dovute alla fisica dell'apparato sono minime.

L'apparato di uno SMES è fondamentalmente semplice: una bobina di superconduttore (solitamente di NbTi) viene raffreddata criogenicamente venendo posta a contatto con un liquido refrigerante, solitamente un bagno di azoto liquido o elio liquido, e viene caricata elettricamente tramite induzione magnetica dall'esterno, permettendo una corrente persistente che manterrà in maniera imperitura l'energia trasferita originariamente sotto forma di induzione nel campo generato dalla corrente del solenoide superconduttore.

Gli SMES sono apparati estremamente stabili: immagazzinano energia elettrica in un campo magnetico e dunque sono sistemi di stoccaggio dell'energia di tipo elettromagnetico, ciò implica che non vi siano parti in movimento durante la conversione energetica, e l'assenza di riscaldamento effettivo durante la carica e scarica dovuto alla refrigerazione criogenica li rendono estremamente sicuri, anche se devono essere

opportunamente ingegnerizzati in quanto la presenza di campi magnetici tanto elevati (dell'ordine di 1-10 T) causa sforzi sul materiale il quale deve essere ben supportato per non subire danneggiamenti.

Una importante limitazione all'efficienza energetica e all'impiego su vasta scala degli SMES è la necessità di mantenere il materiale del nucleo dell'apparato allo stato superconduttivo, quindi imponendo un costo energetico elevato per la refrigerazione e limitazioni importanti sulla geometria del sistema.

In questo capitolo si tratterà la tecnologia SMES esplorandone prima i principi di funzionamento, per poi andare a studiare l'implementazione della tecnologia; osservazioni di natura ingegneristica hanno fatto in modo che le forme più utilizzate per realizzare gli SMES siano la forma solenoidale e la forma toroidale.

Seguirà infine una discussione riguardo gli sviluppi futuri degli SMES, in particolare verranno riportate le conclusioni tratte in un articolo di review [6].

2.2 Principio di funzionamento degli SMES

In una bobina di materiale superconduttore raffreddato criogenicamente viene indotta magneticamente una corrente elettrica che continuerà a scorrere anche nel momento in cui il sistema venga isolato dalla rete elettrica esterna [6].

L'energia magnetica E_{mag} immagazzinata nel campo magnetico di un superconduttore si trova partendo dalla potenza elettrica [7]

$$P(t) = q \frac{V}{t} = iV \quad 1)$$

Dove q è la carica presente nel superconduttore, V è la forza elettromotrice.

Il legame tra tensione indotta e variazione della corrente è dato da

$$V = L \frac{di}{dt} \quad 2)$$

dove L è l'autoinduttanza del superconduttore, da cui

$$P(t) = iL \frac{di}{dt} \quad 3)$$

Ed integrando si ottiene

$$E_{\text{mag}} = \int_0^t P(t)dt = \int_0^t iL \frac{di}{dt} dt = \int iLdi = \frac{1}{2} Li^2 \quad 4)$$

Segue che avendo campo magnetico B si avrà per l'energia

$$E_{\text{mag}} = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2\mu_0} \iiint_{\text{Spazio}} B^2 dx dy dz \quad 5)$$

Dove L è l'autoinduttanza della bobina ed i è la corrente persistente presente.

Una volta caricato lo SMES e separatolo dalla rete elettrica, questo si comporterà come un accumulatore di energia elettrica la cui energia è proprio quella presente nel campo magnetico del superconduttore [9].

Uno SMES è costituito dai seguenti componenti:

1. Bobina superconduttrice magnetica

La bobina costituisce la parte più importante dello SMES in quanto è dove viene immagazzinata l'energia elettrica, essa è fatta di materiale superconduttore, in particolare viene spesso utilizzata la lega niobio-titanio NbTi per le sue proprietà di superconduttore [10], in particolare la $T_c = 10K$ e la possibilità di supportare in regime superconduttivo un campo magnetico critico dell'ordine dei 10-15 T, inserita in un substrato di rame.

2. Sistema criogenico

Il sistema criogenico serve a mantenere il superconduttore alla temperatura critica in modo da permettere il mantenimento di conduzione elettrica.

Solitamente vengono utilizzati Elio o Azoto liquidi per mantenere le temperature adatte al mantenimento del regime critico [11] fig(8).

Sperimentalmente si osserva che l'energia necessaria per raffreddare l'avvolgimento di superconduttore è molto inferiore a quella che è possibile immagazzinare nello stesso.

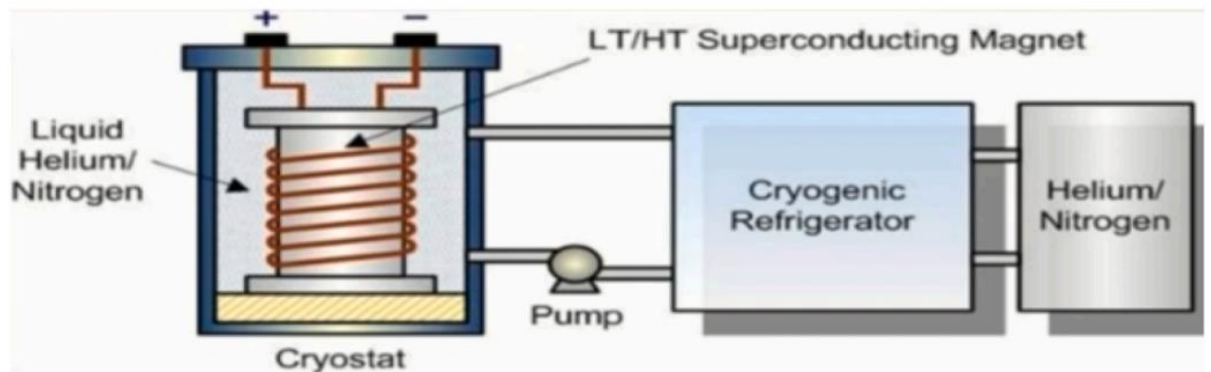


Figura 8: Rappresentazione schematica della struttura di uno SMES

3. Sistema di condizionamento della potenza e sistema di controllo

Questi due apparati servono da interfaccia in modo da permettere un'integrazione adeguata dello SMES con quelle che possono essere le varie richieste della rete elettrica, in particolare uno SMES accumula energia sotto forma di corrente diretta, mentre la maggior parte delle reti elettriche richiede corrente alternata; il sistema di condizionamento si occupa di convertire una grande corrente elettrica continua in una grande tensione alternata.

Si hanno due tipologie possibili di SMES: gli HTS SMES e i LTS SMES.

I vantaggi di una piuttosto che l'altra configurazione sono principalmente dovuti alla lavorabilità dei materiali, in generale gli HTS pur avendo una temperatura critica di

circa 70K ed essendo per questi vantaggiosi dal punto di vista del costo energetico della refrigerazione, presentano importanti problematiche per quanto riguarda la lavorabilità dei materiali e l'adattabilità a diversi casi particolari.

Dunque gli SMES sono quasi esclusivamente SMES LTS costituiti da NbTi.

2.3 Applicazioni degli SMES

L'energia elettrica non può essere immagazzinata nella rete di trasmissione nazionale ma deve esserci sempre equilibrio tra domanda ed offerta [12]; tutta e sola l'energia immessa sulla rete deve essere consumata altrimenti possono verificarsi fenomeni di risonanza che possono alzare o abbassare la frequenza di trasmissione sulla rete.

Questa eventualità va impedita in quanto un'oscillazione della frequenza può causare danneggiamenti alle macchine sensibili a queste oscillazioni collegate alla rete.

In Europa la frequenza di trasmissione dell'energia elettrica è pari a 50Hz ed un discostamento da questi valori viene prontamente compensato con delle strategie di *load-leveling*, ovvero livellamento del carico, assorbendo l'energia immessa nella rete e non utilizzata nei momenti di scarsa domanda, e rimettendola durante i momenti di grande richiesta (si pensi ad esempio alla differenza di consumo e conseguente richiesta elettrica che avviene in una città tra giorno e notte).

Le variazioni durante un giorno possono anche raggiungere picchi del 40% della domanda di energia elettrica [13].

Parte dell'energia necessaria a livellare il carico può essere gestita a livello di produzione, mentre una parte consistente deve essere immagazzinata e rilasciata al momento opportuno.

Proprio per ovviare a questo problema vi fu la prima spinta economico-scientifica nella ricerca degli SMES, i quali, con i loro tempi di risposta di circa 100ms e la grande capacità di assorbimento ed emissione della potenza elettrica fornita si ponevano almeno sul piano teorico come gli apparati ideali per garantire la stabilità della rete [9] fig(9).

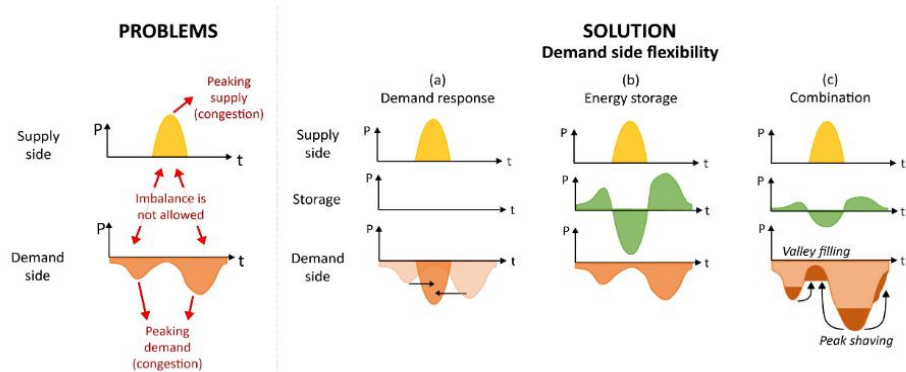


Figure 9: rappresentazione schematica del problema del livellamento del carico energetico [18]

Una caratteristica molto interessante degli SMES è il fatto che più un impianto è grande, minori sono i costi per MWh per realizzare l'impianto fig(10); degli studi [9] mostrano che il costo di realizzazione dell'impianto scala con la superficie dell'apparato, mentre l'energia immagazzinabile all'interno dello SMES scala con il volume dell'apparato, rendendo così assolutamente vantaggiose le configurazioni di dimensioni maggiori. La rapidità di risposta degli SMES permette loro di essere utilizzati per garantire la stabilità dei sistemi elettrici.

Alcuni studi hanno analizzato l'impatto che avrebbe la sostituzione dei ben rodati LTS con i più efficienti HTS [14].

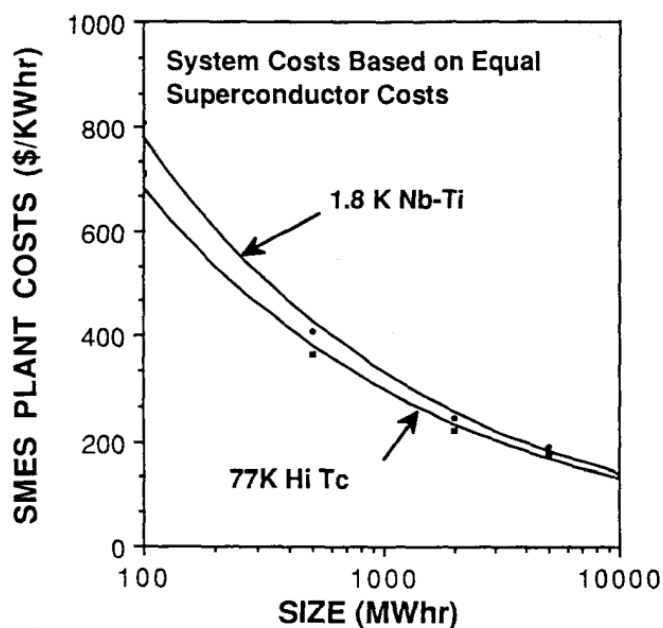


Figura 10: relazione costo-energia prodotta per un impianto SMES; notare che il costo per MWh cala in maniera importante all'aumentare delle dimensioni dell'impianto

È stato dimostrato che l'efficiamento energetico che si otterrebbe con la totale sostituzione con questi nuovi materiali (circa 2%), dovendo rivedere l'impianto di raffreddamento e considerando i costi di sostituzione rende poco vantaggioso l'utilizzo dei superconduttori HTS.

In tabella sono riportate alcune caratteristiche di un impianto SMES che possa immagazzinare 5000MWh di energia fig(11):

TABLE I
Characteristics of a 5000 MWhr SMES Plant

Peak Stored Energy (MWhr)	5250
Peak Power (MW)	1000
Coil Height (m)	19
Coil Diameter (m)	1000
Aspect Ratio	.019
Operating Temperature (K)	1.8
Current (ka)	200
No. of Turns	556
No. of Radial Layers	4
Maximum Wall Pressure (MPa)	1.92
Peak Magnetic Field (T)	6.69
Midplane Magnetic Field (T)	5.18
Strut Spacing (m)	4.75
Cooldown Hoopstress (MPa)	345
Refrigeration Load (MWhr/day)	120
Construction Time (yrs)	7
Land Requirement (acres)	5300

Figura 11: caratteristiche di un impianto SMES

Come è evidente da un'analisi della tabella, le dimensioni di un impianto sono molto elevate; infatti, si trova che per immagazzinare 5000MWh di energia sono necessarie dimensioni importanti, ovvero 500 metri di raggio e 19 metri di altezza per una bobina.

Nella seguente tabella [6] è possibile analizzare le principali caratteristiche energetiche degli SMES confrontate ad altre tecnologie per immagazzinare energia fig(12).

Si può notare che la densità energetica degli SMES, con un range tra 0.5-5 Wh/Kg è nettamente inferiore a quella di quasi tutti gli altri metodi per immagazzinare energia, si prenda ad esempio le cellule a combustibile (8000-10000 Wh/Kg) oppure i più modesti accumulatori elettrochimici (circa 70-100 Wh/Kg).

Ciò giustifica la grande ampiezza vista poco sopra degli impianti SMES.

Dove gli SMES risultano vincenti è invece la *power density*, presentando un range di valori tra 500-5000 W/Kg maggiore delle celle a combustibile (500-3000 W/Kg) e dei sistemi elettrochimici (circa 150-200 W/Kg in media).

È possibile confrontare i differenti tempi di scarica dei vari metodi, e si osserva che gli SMES, assieme ai super-capacitatori sono i meccanismi con i tempi di scarica più rapidi disponibili al momento, in maniera consistente con quanto affermato fino ad ora.

Gli SMES sono una tecnologia relativamente nuova e gioveranno sicuramente dei futuri progressi tecnologici, trovando una nicchia di applicazioni in cui potranno svolgere funzioni in cui vengano esaltate le loro caratteristiche positive.

Grandi aspettative sono rivolte agli SMES di ridotte dimensioni, i quali potrebbero avere delle applicazioni anche in ambiti in cui la tecnologia coinvolta è meno sofisticata e costosa.

Comparison of energy storage technologies: Key features ([19-25]).

Category	Type	Rated power (MW)	Energy density (Wh/kg)	Power density (W/kg)	Discharge Time	Life (years)	Efficiency
Electrochemical	Lead-acid	≤100	30-50 Wh/kg	75-300	≤8 h	5-20	70-90 %
	Li-ion	≤100	75-200 Wh/kg	150-315	≤2 h	5-15	85-98 %
	NaS	≤50	150-240 Wh/kg	90-230	≤8 h	10-15	75-90 %
	NiCd	≤40	50-75 Wh/kg	150-300	≤10 h	10-20	60-90 %
	Vanadium RFB	≤50	10-25 Wh/kg (16-33 Wh/L)	Up to 2.78 W/cm ²	≤12 h	5-10	80-90 %
Chemical	ZnBr FB	≤10	75-85 Wh/kg	Up to 150 W/kg	≤10 h	5-10	70-80 %
	Fuel cells	≤50	8000-10,000 Wh/kg	500-3000	≤24 h	5-15	20-66 %
Mechanical	PHES	≤5000	0.2-2 Wh/L	-	≤24+ hrs	40-70	70-87 %
	CAES	≤3000	3-12 Wh/L	0.5-2 W/L	≤24+ hrs	20-40	60-89 %
	FES	≤10	10-30 Wh/kg	400-1500	≤1 h	15-20	80-95 %
Thermal	Thermo-chemical ES	≤50	70 Wh/kg (280 Wh/L)	-	hours	10-30	60-90 %
Electrical	Supercapacitors	≤10	2.5-15 Wh/kg	500-2000	≤1 min	20-40	60-95 %
	SMES	≤100	0.5-5 Wh/kg	500-5000	≤1 min	20-40	95-98 %

Figura 12: Caratteristiche energetiche comparate di vari metodi per immagazzinare energia

Capitolo 3

Creazione di una voce di Wikipedia

3.1 Introduzione

*Per consultare la pagina sugli SMES cercare sul web:
immagazzinamento di energia nel campo magnetico di un
superconduttore SMES*

Wikipedia è un'enciclopedia online collaborativa nata nel 2001 da Jimmy Wales e Larry Sanger e ad oggi gestita dalla fondazione senza scopo di lucro Wikimedia Foundation, è composta da più di 55 milioni di voci.

Una voce di Wikipedia è una “pagina” che tratta di un argomento specifico più o meno generale, alla cui realizzazione possono partecipare un numero arbitrario di persone, le quali, in linea di principio, possono contribuire liberamente una volta accreditatisi sul sito web dell'enciclopedia.

Chiunque può realizzare una voce di Wikipedia o contribuire alla formazione di un'altra voce; questo è sicuramente sia il maggior punto di forza sia la grande debolezza di Wikipedia, infatti, se da un lato permettere la collaborazione libera e globale di esperti in un determinato settore dà la possibilità di creare un unicum in cui si venga a trovare condensata la conoscenza umana, da un altro lato c'è il rischio per nulla remoto che persone possano vandalizzare il lavoro di collaborazione svolto con gran fatica ed impegno per il gusto di divertirsi.

Vi sono però diversi strumenti per bloccare in maniera efficiente questa eventualità.

Per evitare che persone poco corrette possano utilizzare Wikipedia per diffondere informazioni false, pareri personali, pubblicità, *trolling* e spam, una volta iscritti bisogna attenersi a un codice deontologico ben preciso per quanto riguarda la verificabilità, l'oggettività e l'universalità delle informazioni che vengono divulgate, pena la

cancellazione delle informazioni scritte e il ripristino della voce allo stato precedente alla modifica nel caso di irregolarità nel copyrighting o di non universalità fino ad arrivare al *banning* nel caso in cui venga tenuta una condotta scorretta.

In questo capitolo conclusivo verrà discussa la creazione della voce italiana di Wikipedia degli SMES, assente al momento attuale, verrà inoltre introdotta la metodologia di creazione di una pagina e le regole da seguire.

Nonostante sia necessaria una profonda revisione anche dell'analogia pagina in inglese che presenta alcune problematiche come l'utilizzo di citazioni senza fonti o passaggi poco chiari, è stato preferito dedicare questa tesi alla costituzione ex novo della pagina in italiano.

Non si esclude affatto la possibilità di ampliare, migliorare e modificare la voce stessa in un secondo momento; infatti, questa costituirà sia per la mancanza di competenze di chi scrive sia per sua natura, un prodotto imperfetto, migliorabile e da sottoporre all'attenta valutazione dei contributori più esperti, i quali potranno guidare il miglioramento della voce in un secondo momento.

La peculiarità di una voce di Wikipedia è il suo essere in un qualche senso viva; questa è sottoposta continuamente ad un processo di revisione e correzione, aggiornamento e ampliamento.

3.2 I criteri per la realizzazione di una voce

A seguito dell'obbligatoria domanda di senso, la quale dovrebbe essere il primo step in ogni ambito della ricerca, per cui ci si deve chiedere se la realizzazione di una voce enciclopedica sia di qualche utilità per gli altri e sia anche possibile, è necessario per poter scrivere di un argomento rispondere a determinati requisiti che causerebbero altrimenti la cancellazione della voce [15]:

- Non primarietà della voce

Wikipedia non è il luogo adatto in cui pubblicare ricerche originali o personali, infatti un'enciclopedia non è una fonte di informazione primaria, ma bensì secondaria, ovvero

sono presenti informazioni verificabili e accettate dalla maggioranza degli esperti in un determinato ambito; per fare un parallelismo con la produzione di paper scientifici, Wikipedia idealmente è una collezione di articoli di review e pochi articoli originali ampiamente verificati ed accettati dalla comunità intera.

- Verificabilità

Una voce di Wikipedia deve essere verificabile; questo concetto è diverso dalla veridicità di un'informazione, ma in linea generale si ritiene che la verificabilità sia un parametro oggettivo mentre la veridicità potrebbe essere soggettiva, in ogni caso è considerato dalla comunità di Wikipedia un buon criterio quello di diffidare dell'informazione poco precisa e generalista.

È dunque di estrema importanza citare chiaramente le fonti ed omettere i passaggi che risultino oscuri o incomprensibili al fine di evitare di scrivere informazioni non corrette per via di una errata comprensione dell'informazione stessa.

- Neutralità

Wikipedia non è luogo di discussione o dibattito delle personali opinioni.

Quindi nella redazione di una voce non trova alcuno spazio l'espressione di ideologie personali.

La redazione di una voce deve essere effettuata mantenendo un tono neutrale anche qualora si trattino argomenti in cui è facile travasare la propria ideologia personale (ad esempio politica, religione ...)

- Universalità

Nella stesura di una voce di Wikipedia è necessario tenere a mente che questa deve essere enciclopedica: la voce deve essere autonoma e rilevante per una gran parte delle persone, dunque non deve mai essere appesantita di formalismi e tecnicismi eccessivi che ne pregiudicano l'universalità e trovano spazio nelle trattazioni specialistiche.

- Lunghezza della voce

Una voce di Wikipedia deve avere una lunghezza tale per cui si possa distinguere per il carattere informativo da una definizione di un dizionario.

3.3 Implementazione della voce per gli SMES

La realizzazione della voce di Wikipedia riguardante gli SMES è stato un processo lungo che ha richiesto diverse fasi di elaborazione.

La pagina è stata scritta in modo da essere quanto più autoconsistente; dopo una breve introduzione sul funzionamento dei sistemi SMES e della loro rilevanza tecnologica, sono state fornite le basi per la comprensione della fenomenologia dei superconduttori senza scendere in dettagli tecnici che avrebbero pregiudicato l'universalità della voce, infatti una descrizione analitica dei superconduttori a livello di teoria BCS richiede il formalismo della seconda quantizzazione, il quale esula ampiamente dalla fisica trovata nello studio degli SMES: per una descrizione autoconsistente degli SMES sono necessarie e sufficienti delle considerazioni energetiche riguardanti l'energia immagazzinata nel magnete superconduttore, le quali trovano naturale descrizione con il semplice formalismo dell'elettrotecnica basilare (Circuiti RLC, definizione di potenza elettrica).

Per rendere ragione della natura superconduttiva del fenomeno senza appesantire la trattazione è stato dunque deciso di fornire una descrizione fenomenologica dei superconduttori e della teoria BCS, avendo introdotto le principali proprietà dei superconduttori quali la temperatura critica T_c , l'effetto Meissner, l'esistenza di un campo critico H_c , di una corrente critica ed avendo spiegato in maniera euristica come funziona il pairing degli elettroni nelle coppie di Cooper che si creano quando gli elettroni scambiano fononi interagendo con il reticolo cristallino del materiale superconduttore. Vengono inoltre introdotte le principali classificazioni dei superconduttori, ovvero quelle in cui si distinguono superconduttori a transizione immediata (Tipo I) e a transizione in due fasi (Tipo II) e quelle in cui si distinguono gli LTS e gli HTS.

Per quanto riguarda la parte che concerne gli SMES, è stata scelta una divisione per cui in un primo momento si introduce il funzionamento di uno SMES, nel quale è stata descritta la struttura del magnete raffreddato criogenicamente, dei materiali di cui è fatto, ovvero principalmente NbTi e delle forme principali, quella solenoidale e quella toroidale in cui può essere ingegnerizzato, poi si introduce il sistema di raffreddamento e infine l'apparato di connessione alla rete elettrica e commutazione della corrente da continua ad alternata. In un secondo momento viene esplorato il campo di applicabilità degli SMES in particolare come stabilizzatori della linea e per effettuare il livellamento del carico e vengono paragonati ad altri metodi per immagazzinare energia. Viene inoltre evidenziata la loro applicabilità come erogatori impulsivi di potenza e vengono descritte le qualità degli SMES, ovvero i tempi di carica e scarica dell'ordine dei cento millisecondi, l'alta densità di potenza, l'alta resistenza ad un elevato numero di cicli di lavoro e l'alta efficienza energetica nel processo di carica e scarica. Viene infine accennato allo *scaling* dei costi di un impianto a SMES e si trova che il costo per MWh prodotto cala vertiginosamente all'aumentare delle dimensioni dell'impianto.

Sono state utilizzate varie immagini sia descrittive sia tabulari acquisite dai paper di review utilizzati per la stesura della voce che permettono una visione dinamica dell'argomento.

Una delle difficoltà maggiormente riscontrate è stata trovare della buona bibliografia in cui vengano trattati i *superconducting magnetic energy storage* non come un tema tangenziale ma come argomento centrale; i pochi articoli trovati che trattano esclusivamente di SMES sono o eccessivamente introduttivi o si focalizzano su applicazioni specifiche degli stessi, lasciando così ben poco spazio a una trattazione completa del problema.

Durante la stesura di una voce di Wikipedia è normale trovarsi dinanzi a diversi impedimenti, sicuramente l'essere oggettivi ed enciclopedici sono due caratteristiche duali: da un lato si richiede di essere quanto più specifici e tecnici, condensando informazioni spesso ridondanti o eccessivamente tecniche in una trattazione coesa non specialistica e chiara, mentre da un altro lato viene richiesto di mantenere il più possibile

un assetto generalista che permetta di rendere fruibile la voce al maggior numero di persone.

Probabilmente il modo migliore per costituire con successo una voce è quello di collaborare attivamente con altri contributori dell'enciclopedia alla stesura di una voce singola in modo da poter sanare queste difficoltà.

Conclusioni

La creazione della pagina Wikipedia sugli SMES ha contribuito attivamente, seppur in piccolissima parte, ad ampliare e a diffondere il sapere scientifico.

La redazione della voce è stata impegnativa e si è proceduto con vari tentativi per trovare l'impostazione giusta; questa verrà aggiornata e migliorata nel corso del tempo e contribuirà a diffondere la conoscenza degli SMES, i quali hanno ed avranno una rilevanza in ambiti come lo stoccaggio dell'energia, il livellamento del carico e le applicazioni in cui viene richiesta grande efficienza e velocità nel trasmettere la potenza elettrica.

Si sono voluti anche evidenziare i limiti degli SMES, tra cui le dimensioni che li rendono inadatti ad usi per applicazioni non specialistiche e la difficoltà di realizzazione sia da un punto di vista strutturale sia economico.

Qui si spera si muoverà la ricerca futura.

Ringraziamenti

Ringrazio la mia famiglia, ringrazio mia sorella Virginia, la luce della mia vita ed i miei genitori Marina ed Andrea, che mi hanno sempre sostenuto, inoltre ringrazio mio zio Massimo, il mio fan numero uno; forse non vi dico abbastanza quanto vi voglia bene e quanto tenga a voi, siete le persone più importanti per me.

Ringrazio i miei amici, quelli veri, quelli su cui posso contare, non importa la distanza che ci separa.

Ed infine un ringraziamento speciale al mio gatto Kira, che inconsapevolmente mi regala tanta gioia.

Grazie di esistere.

Bibliografia

- [1] <https://it.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_storage
- [3] 2 H. Kamerlingh-Onnes, Akad. van Wetenschappen, Amsterdam 14, 818 1911.
- [4] W. Meissner and R. Ochsenfeld, Naturwissenschaften 21, 787 (1933)
- [5] L.N. Cooper, Phys. Rev. 104, 1189 (1956)
- [6] Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications Bukola Babatunde Adetokun *, Oghenewogaga Oghorada, Sufyan Ja'afar Abubakar
- [7] Jérémie Ciceron, Arnaud Badel, Pascal Tixador, Superconducting magnetic energy storage and superconducting self-supplied electromagnetic launcher, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 80, 20901 (2017)
- [8] J. Miles, R.G. Mills, "Observation of persistent current in a superconducting solenoid", Physical Review Letters, 10, 93-96 (1963).
- [9] C. A. Luongo, "Superconducting storage systems: an overview," in *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 32, no. 4, pp. 2214-2223, July 1996, doi: 10.1109/20.508607.
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Niobium%E2%80%93titanium>
- [11] H.K. Yeom, Y.J. Hong, S.J. Park, T.B. Seo, K.C. Seong, H.J. Kim, Study of cryogenic conduction cooling systems for an HTS SMES, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2) (2007) 1955–1958.
- [12] <https://www.swissgrid.ch/it/home/operation/regulation/frequency.html>
- [13] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=92399>
- [14] W. Hassenzahl, "Superconducting magnetic energy storage," in *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 25, no. 2, pp. 750-758, March 1989, doi: 10.1109/20.92399.
- [15] https://it.wikipedia.org/wiki/Aiuto:Come_scrivere_una_voce
- [16] <https://physlab.org/wp-content/uploads/2016/04/Squidcomprehensive.pdf>
- [17] https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Timeline_of_Superconductivity_from_1900_to_2015.svg
- [18] <https://heatpumpingtechnologies.org/news/1/54881/>
- [19] https://www.researchgate.net/figure/Critical-temperature-of-superconducting-materials_tbl1_44216049