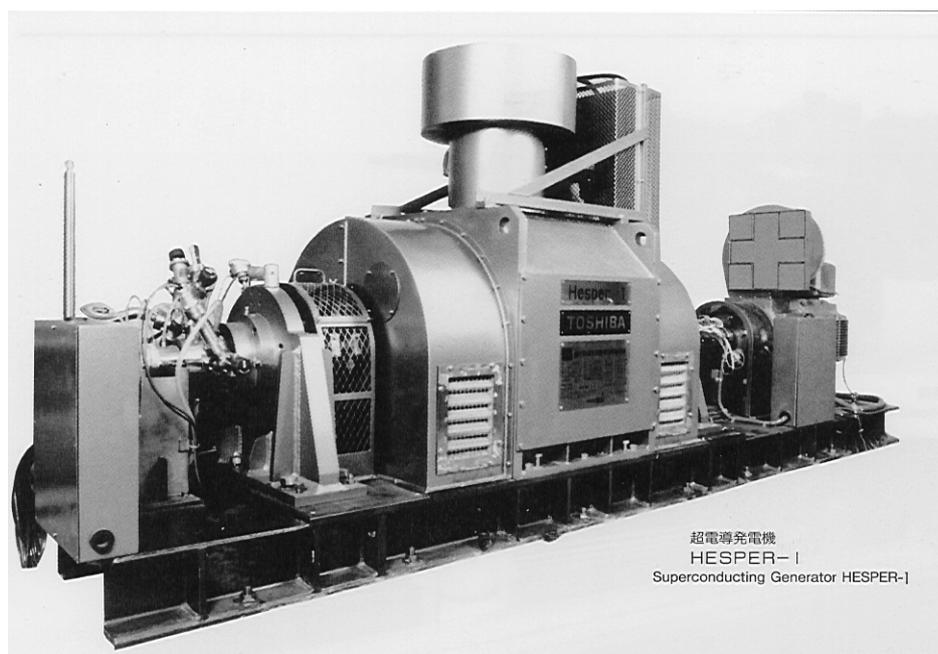


## 14. ALTERNATORI, MOTORI ELETTRICI E TRASFORMATORI

Nelle centrali elettriche convenzionali viene prodotta energia elettrica a partire dall'energia meccanica fornita ad un alternatore da una turbina azionata o da vapore ad elevata pressione (centrali termoelettriche), o tramite la caduta di acqua in condotta forzata (centrali idroelettriche). I turboalternatori convenzionali hanno potenze nominali che possono superare anche i 1500 MVA e rendimenti di conversione dell'energia molto elevati (fino al 99% per le taglie maggiori). I meccanismi di perdita che fanno sì che il rendimento non sia unitario sono le perdite nel ferro per correnti parassite e per isteresi, e le perdite resistive negli avvolgimenti rotorici e statorici. Dal momento che i superconduttori non presentano perdite resistive in corrente continua, ma danno luogo a perdite in regime di corrente alternata, sono stati realizzati alternatori aventi gli avvolgimenti rotorici, interessati dal passaggio di corrente continua, costituiti da superconduttori. Le perdite complessive si riducono di circa il 50%, ma un ulteriore notevole vantaggio di questa soluzione è la notevole riduzione di peso e dimensioni (di circa il 40-50%) dovuta alla rimozione del nucleo ferromagnetico. Sono già stati realizzati con successo diversi prototipi da alcune decine di MVA con gli avvolgimenti sul rotore raffreddati ad elio liquido. L'alternatore superconduttivo raffreddato ad elio liquido si dimostra però competitivo da un punto di vista economico con gli alternatori convenzionali solo per taglie superiori a circa 500 MVA. Potenzialmente si potrebbero realizzare unità compatte da 2000-3000 MVA e concentrare la produzione di energia elettrica in pochi siti. La previsione di un rallentamento nella costruzione di nuove centrali, soprattutto nucleari, ha però ridotto le attività internazionali in questo settore. L'unica eccezione è il Giappone dove è in corso un programma coordinato tra le grandi industrie del settore.



*Fig. 22 Alternatore superconduttore HESPER - 1 (Toshiba)*

Si sta in particolare esaminando la possibilità di realizzare alternatori completamente superconduttivi (rendendo superconduttivo anche l'avvolgimento statorico) e di utilizzare materiali ad alta temperatura critica che renderebbero molto più semplice l'impianto criogenico. Vantaggi analoghi a quelli descritti per gli alternatori valgono per i motori elettrici. In particolare l'utilizzo di superconduttori rende possibile l'eliminazione dal circuito magnetico principale del ferro (la cui saturazione nei motori convenzionali limita il valore di picco del campo magnetico ottenibile al traferro) e la creazione di un elevato campo magnetico nel traferro senza alcuna perdita. Questo consente una diminuzione della taglia del motore a parità di potenza. La applicazione più interessante dei superconduttori nel campo dei motori elettrici è la realizzazione con questi materiali degli avvolgimenti rotorici del motore sincrono, che sono eccitati in corrente continua e consentono il massimo sfrut-

tamento delle caratteristiche dei superconduttori. Gli avvolgimenti statorici di questi motori, percorsi da corrente alternata, sono invece realizzati in rame. Data l'assenza del nucleo di ferro, essi sono spesso definiti come motori a nucleo in aria, poiché è proprio in aria che si sviluppa il campo magnetico al loro interno. I motori sincroni a superconduttori potrebbero trovare applicazione per azionare pompe e ventole di grande potenza. Infatti la riduzione delle dimensioni (circa il 20% sul diametro ed il 60% sulla lunghezza) e del peso (circa il 50% per via dell'assenza di ferro) a parità di potenza dovrebbero consentire risparmi in termini di materiali e costi di produzione e installazione che dovrebbero permettere di avvicinarsi al costo iniziale dei motori convenzionali, che per il momento è inferiore. Il problema è rendere il risparmio energetico assicurato da queste macchine nel corso della loro vita utile superiore alla differenza tra il loro costo iniziale e quello dei motori convenzionali. L'incremento dell'efficienza ottenibile con questi motori è piuttosto limitato (0.5-1%). I motori industriali consumano però circa il 60% dell'energia prodotta complessivamente (e circa il 70% di quella utilizzata in un comune stabilimento produttivo) e quindi l'incremento della loro efficienza, per quanto apparentemente modesto, permetterebbe un risparmio energetico rilevante. Basti pensare che un aumento dell'1% dell'efficienza dei motori industriali di grossa taglia negli Stati Uniti consentirebbe un risparmio annuo di circa 300 M\$. Le taglie dei motori allo studio sono abbastanza elevate: la American Superconductor, in collaborazione con la Reliance Electric sta attualmente studiando prototipi da 150 e 3700Kw e prevede di commercializzare nell'anno 2001 i primi motori da 1500Kw.

L'uso dei superconduttori per i trasformatori costituisce una grossa sfida tecnologica rispetto alle altre applicazioni esaminate. Infatti i trasformatori convenzionali di grossa taglia sono in grado di raggiungere rendimenti del 99,7% e tali macchine lavorano sempre in regime di correnti alternate in cui anche i superconduttori presentano delle perdite seppur modeste. Tuttavia, dal momento che le perdite in gioco sono molto elevate, un miglioramento di un solo decimo di punto percentuale nel rendimento può rappresentare un risparmio di energia molto significativo. Come nel caso dei motori elettrici l'utilizzo del trasformatore superconduttivo diventa conveniente se il risparmio energetico durante tutta la vita del trasformatore (di circa 30 anni) ammortizza l'investimento iniziale. Anche per i trasformatori si possono ottenere notevoli riduzioni di peso ed ingombro rispetto al corrispondente dispositivo convenzionale. Vi sono però ulteriori vantaggi nell'utilizzo dei trasformatori superconduttivi, in particolare se costruiti con materiali ad alta temperatura critica.

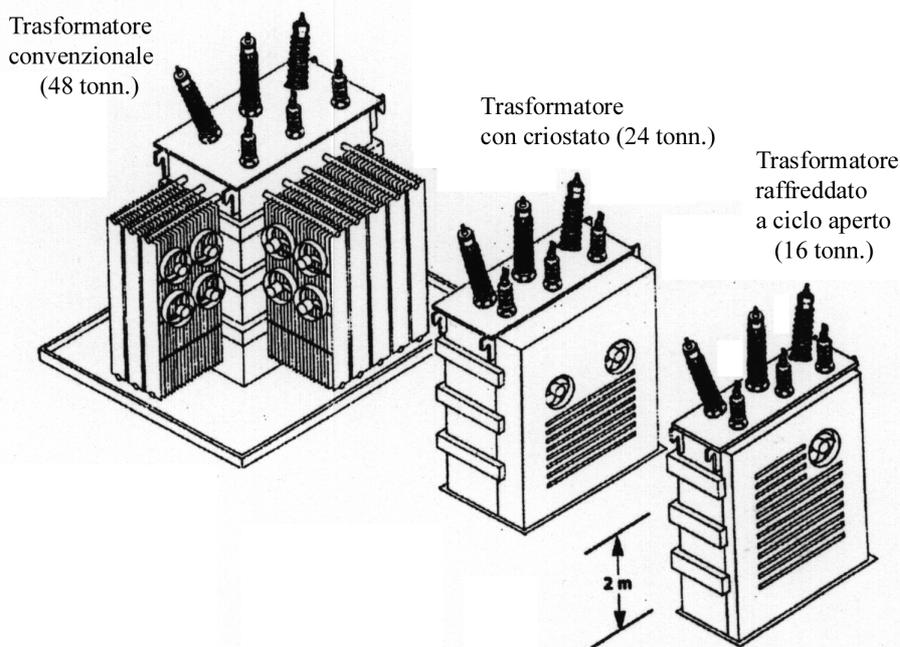


Fig. 23 Confronto di dimensioni e peso tra trasformatore convenzionale, superconduttivo a ciclo di refrigerante chiuso e superconduttivo a ciclo aperto.

Le ottime proprietà dielettriche dell'azoto liquido ne consentono infatti l'utilizzo non solo come refrigerante, ma anche come isolante, sostituendo gli olii attualmente utilizzati per i trasformatori convenzionali ed evitando, quindi, i pericoli ambientali dovuti alla loro infiammabilità. In generale, per le applicazioni della superconduttività alle macchine elettriche, sono necessari materiali che presentino elevate densità di corrente anche in presenza di campi magnetici elevati. Queste caratteristiche sono proprie solo di alcuni materiali superconduttori, come il  $NB_3Sn$  (bassa temperatura critica) e l'YBCO (alta temperatura critica). Attualmente però la tecnologia di fabbricazione dell'YBCO non consente la realizzazione di nastri della lunghezza necessaria. Per questo motivo i maggiori sforzi di ricerca in questo settore sono orientati verso l'ottenimento di nastri di YBCO della lunghezza necessaria.

## 15. LIMITATORI DI CORRENTE

Il limitatore di corrente è un dispositivo ad impedenza variabile, basato sulla rapida transizione (in tempi inferiori a 1 ms) dell'elemento superconduttore quando la corrente che lo attraversa supera il valore critico. In condizioni operative il limitatore ha un'impedenza molto bassa, ma assume istantaneamente un valore elevato in caso di corto circuito, limitando così rapidamente la corrente circolante. Il limitatore permette quindi di proteggere apparecchiature sensibili alle sovracorrenti e di evitare la sostituzione di componenti del sistema di distribuzione dell'energia elettrica le cui caratteristiche risultassero non più adeguate ai valori previsti di correnti di corto circuito. Quest'ultima possibilità non è così remota, dal momento che la tendenza attuale di aumentare la potenza elettrica installata nelle reti ad alta tensione comporta un aumento dei valori delle correnti di corto circuito.

Il limitatore superconduttivo può essere realizzato secondo due diverse configurazioni fondamentali: resistiva e induttiva. Nel primo caso, il dispositivo è costituito da un cavo superconduttore posto in serie alla linea, con dimensioni tali da assumere alla transizione un valore di resistenza sufficiente a limitare la corrente. Ciò richiede notevoli lunghezze di cavo superconduttore e provoca la dissipazione di elevate quantità di energia durante la transizione. Il limitatore induttivo è assimilabile ad un trasformatore con l'avvolgimento secondario superconduttivo chiuso su se stesso. In condizioni operative il flusso magnetico prodotto dall'avvolgimento primario in rame (inserito in serie alla linea da proteggere) è compensato dal flusso magnetico prodotto dalla corrente indotta nel secondario e l'impedenza del dispositivo è molto bassa e coincide idealmente con la resistenza del primario. In caso di corto circuito la corrente indotta nel secondario aumenta oltre il valore critico facendo transire il superconduttore allo stato normale. Ciò provoca l'aumento del flusso magnetico nel nucleo e l'insorgere di un'induttanza elevata che svolgerà le funzioni di limitazione.



Fig. 24 Avvolgimento di un limitatore di corrente

Questa configurazione non richiede contatti elettrici tra il superconduttore e la linea e permette di utilizzare superconduttori sia sotto forma di fili che di anelli massivi. È prevedibile che questa sia la prima estesa applicazione della superconduttività ai sistemi elettrici di potenza.

## 16. MAGNETI SUPERCONDUTTORI

La possibilità dei superconduttori di condurre elevate densità di corrente con perdite molto basse è risultata ideale per la costruzione di elettromagneti. Essi sono meno costosi da installare e mantenere degli elettromagneti convenzionali, sono più compatti e possono produrre campi più elevati. Sistemi magnetici completi sono già commerciali. Essi producono campi elevatissimi (fino a 20 T e oltre) in volumi tra 0.01 e 1 dm<sup>3</sup>, ma possono anche produrre campi da 5-6 T in regioni dell'ordine del m<sup>3</sup>. La assenza del ferro nel circuito magnetico consente di evitare la limitazione dovuta alla saturazione che di fatto non consente di superare i 2 T negli elettromagneti convenzionali. Gli avvolgimenti sono generalmente a forma di solenoidi cilindrici, ma possono anche assumere forme differenti per particolari applicazioni. Essi vengono utilizzati in numerosi settori: elenchiamo di seguito le applicazioni principali.

**Acceleratori di particelle:** per gli studi di fisica delle particelle vengono costruiti magneti che si inseriscono uno dopo l'altro con estrema precisione in tunnel che possono essere lunghi alcuni chilometri. Essi hanno la funzione di collimare e deflettere il fascio di particelle accelerandolo fino ad energie elevatissime. Il più noto è certamente quello costruito presso il CERN di Ginevra dove vengono accelerate particelle di vario tipo. Uno degli attuali progetti in corso al CERN (denominato LHC, Large Hadron Collider) è volto alla ricreazione delle condizioni dell'universo 10<sup>-12</sup> s dopo il Big Bang, quando la temperatura era di 10<sup>16</sup> K, e richiede il raggiungimento di energie elevatissime (14 TeV). Per questo si prevede la sostituzione di tutti i magneti convenzionali del tunnel già esistente con magneti superconduttori che porteranno ad un campo superiore ad 8T, valore irraggiungibile in modo conveniente con i magneti convenzionali.

**Separatori magnetici:** questi dispositivi vengono utilizzati per catturare particelle paramagnetiche, ferromagnetiche o diamagnetiche da un fluido in moto. In questa applicazione sono necessari elevati campi magnetici in regioni abbastanza estese. La capacità di cattura dipende fortemente dal campo magnetico e dalle dimensioni delle particelle (aumentando con l'aumentare di entrambi). Per questo la scelta dei magneti superconduttori si è rivelata competitiva, soprattutto nel caso in cui le particelle da catturare sono debolmente magnetiche (diamagnetiche o paramagnetiche) e di piccole dimensioni (fino al μm).

**Generatori MHD:** i dispositivi per la generazione magnetofluidodinamica dell'energia sono caratterizzati dalla dipendenza della densità di potenza prodotta dal quadrato del modulo dell'induzione magnetica. La superconduttività è quindi necessaria perché utilizzando magneti convenzionali occorrerebbe fornire potenza elettrica ai magneti (che andrebbe dissipata tutta in calore per effetto Joule) in quantità tale da superare quella prodotta nel processo di conversione.

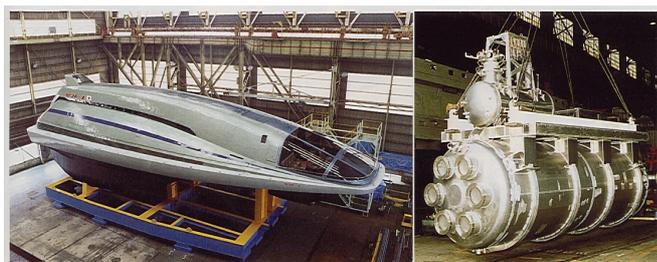


Fig. 25 Yamato I (Motore MHD)

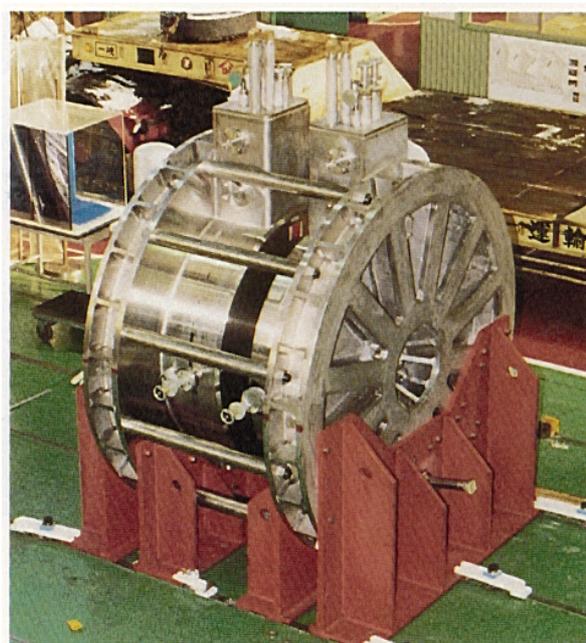


Fig. 26 Magnete per MHD (generatore a disco)