



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Vittorio BUCCI

Progetto di impianti di propulsione navale

10.3 PROPULSIONE DIESEL-ELETTRICA

Anno Accademico 2017/2018

Impianti di propulsione navale

Propulsione elettrica

Il concetto di propulsione elettrica non è nuovo, essendo nato all'incirca un secolo fa. La propulsione elettrica è stata sperimentata in passato su navi militari, navi passeggeri e navi cisterna allo scopo di evitare l'impiego di riduttori di giri di elevata potenza mossi da turbine a vapore. Invece di azionare la linea d'assi tramite riduttore, la turbina a vapore era accoppiata ad un generatore elettrico che forniva la potenza al motore elettrico di propulsione. Vennero adottati sia sistemi in corrente alternata che sistemi in corrente continua, per i quali la regolazione della velocità era più agevole. I servizi di bordo venivano alimentati da gruppi turboalternatori separati.

Le applicazioni della propulsione elettrica si sono tuttavia estese solo nel corso degli anni '80 e '90, quando gli sviluppi dell'elettronica di potenza hanno reso possibile il controllo della velocità dei motori elettrici entro un'ampia gamma di potenze mediante dispositivi compatti, affidabili e dal costo competitivo.

Negli impianti propulsivi elettrici moderni, la generazione di energia è concentrata in un'unica centrale che provvede ai fabbisogni energetici sia della propulsione che degli utenti non propulsivi.

Impianti di propulsione navale

Pregi della propulsione elettrica :

- poichè il numero di gruppi elettrogeni in servizio è correlato alla quantità di energia richiesta, è possibile utilizzare i motori primi alla percentuale di carico più favorevole dal punto di vista del consumo specifico di combustibile;
- si ha di conseguenza una riduzione del consumo totale di combustibile, delle emissioni inquinanti e delle spese di manutenzione, specie quando la nave debba operare con grandi variazioni della richiesta di potenza;
- minore vulnerabilità dell'impianto in caso di avaria singola;
- possibilità di impiegare motori diesel "high" o "medium speed", compatti e leggeri;
- maggiore flessibilità nell'utilizzo degli spazi a bordo, dovuta al fatto che la sistemazione dei gruppi generatori non è vincolata dalle linee d'assi e dai motori elettrici di propulsione;
- possibilità di adottare propulsori di tipo azimutale o POD in caso di particolari esigenze di manovrabilità;
- diminuzione dei livelli di vibrazione e rumore grazie al fatto che i gruppi generatori sono fissati elasticamente e marciano a giri fissi. Ricordiamo che nella propulsione diesel meccanica convenzionale i motori lenti a due tempi e i riduttori di giri accoppiati ai motori a quattro tempi non possono essere fissati elasticamente a scafo;

Impianti di propulsione navale

- **facilità di ottenere l'inversione del senso di rotazione dell'elica;**
- **possibilità di sviluppare elevati momenti torcenti a bassi giri dell'elica;**
- **possibilità di adottare sia eliche a pale orientabili che eliche a pale fisse**

Nella scelta del tipo di propulsione, questi vantaggi debbono essere soppesati con gli **svantaggi tipici della propulsione elettrica :**

- **elevato costo di acquisto dell'impianto;**
- **maggior peso rispetto ad un impianto diesel meccanico con motori diesel a quattro tempi;**
- **inevitabili maggiori perdite nella catena di conversione dell'energia (da meccanica ad elettrica e quindi a meccanica), anche se i rendimenti elettrici sono di per sè elevati;**
- **maggior numero di componenti dell'impianto (generatori, trasformatori, azionamenti a velocità variabile, motori elettrici di propulsione);**
- **necessità, da parte degli armatori, di adottare differenti strategie operative e manutentive, impiegando personale addestrato allo scopo.**

In generale, si può affermare che la convenienza dell'impianto propulsivo elettrico in termini di costo globale (costo iniziale più costi di esercizio) è tanto maggiore quanto maggiore è la percentuale del carico elettrico non propulsivo rispetto a quella del carico elettrico propulsivo.

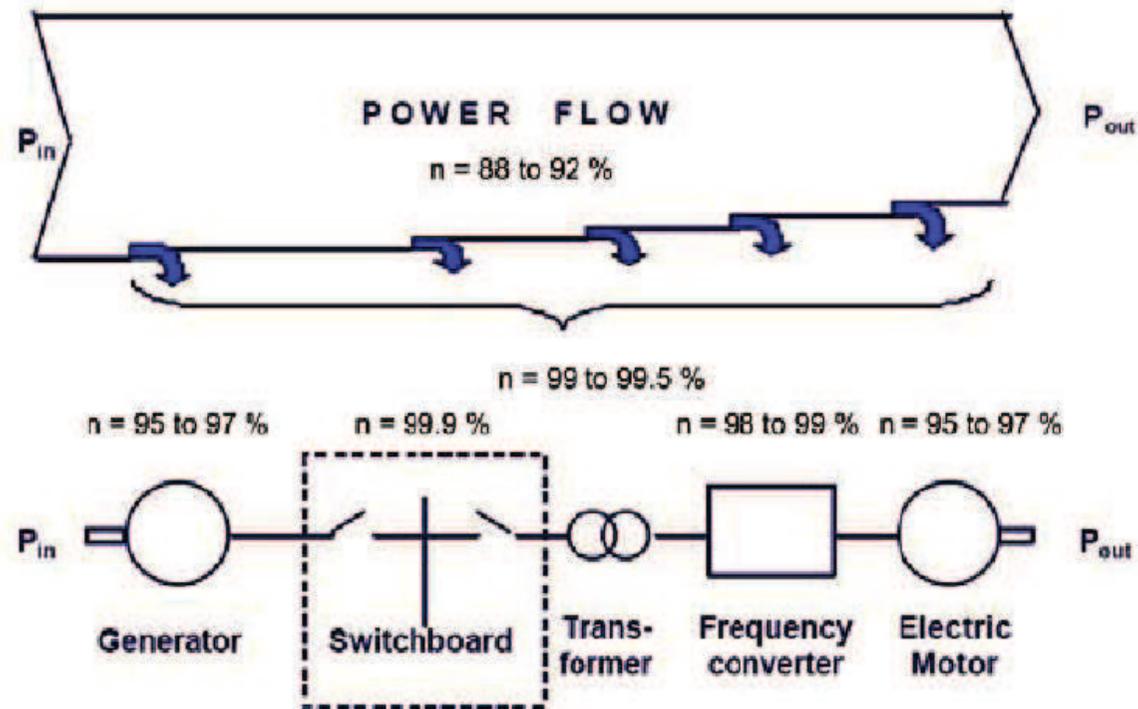
Impianti di propulsione navale

Propulsione elettrica

Scelta :	Requisiti e caratteristiche operative	Punteggio
• Non consigliata	Navigazioni oceaniche a velocità costante. Scarse esigenze di manovra.	•
•• Meritevole di valutazione	Ridondanza, disponibilità e continuità del servizio in caso di avaria singola	••
••• Adeguate	Basso livello di emissioni inquinanti dei motori primi	••
•••• Molto appropriata	Forti variazioni nei carichi propulsivi e / o nei carichi elettrici per impianti di bordo	•••
••••• Obbligatoria	Flessibilità nel progetto e nell'utilizzazione degli spazi	•••
	Impiego di motori "dual fuel" a gas	•••
	Elevati carichi elettrici per impianti di bordo e impianti di processo	••••
	Posizionamento dinamico e / o esigenze di manovra	••••
	Bassi livelli di rumorosità e vibrazioni	••••
	Navi tipo rompighiaccio	•••••
	Innovazione tecnologica – Nuove tipologie di navi	••

Impianti di propulsione navale

Rendimenti della propulsione elettrica



Impianti di propulsione navale

Altre considerazioni sul confronto fra propulsione convenzionale e propulsione elettrica. Nella propulsione convenzionale :

- **i motori principali a quattro tempi funzionano in condizioni non ottimali per tutti i periodi di manovra, con consumi ed emissioni inquinanti elevati;**
- **i gruppi elettrogeni ausiliari debbono essere dimensionati per l'azionamento delle eliche di manovra. In alcuni tipi di navi (p. es. navi da crociera) le eliche di manovra richiedono una potenza molto elevata con tempi di utilizzo molto bassi;**
- **i motori diesel dei gruppi elettrogeni sono di tipo diverso, per diametro dei cilindri e velocità, rispetto ai motori principali: ciò comporta la necessità di gestire di un maggior numero di rispetti;**
- **per rendere più flessibile la propulsione convenzionale, si possono adottare alternatori asse mossi da prese di potenza poste sui riduttori di giri, impiegabili sia in manovra che in navigazione. La presenza di alternatori asse impone la scelta fra due possibili soluzioni impiantistiche :**
 - ✓ **impianto propulsivo con elica a pale orientabili funzionante a giri fissi e alternatore asse collegato a sbarre separate del quadro elettrico, oppure:**
 - ✓ **alternatore asse a giri variabili dotato di convertitore di frequenza;**

Impianti di propulsione navale

Rispetto alla propulsione elettrica, entrambe le alternative comportano limitazioni operative:

- **Nel primo caso si è vincolati dalla marcia a giri fissi e dall'impossibilità di far operare gli alternatori asse in parallelo con i gruppi diesel generatori ausiliari;**
- **Nel secondo caso il sistema di conversione raggiunge costi elevati, senza comunque conferire all'impianto di generazione / propulsione la flessibilità operativa tipica della propulsione elettrica.**

Impianti di propulsione navale

Requisiti della propulsione diesel elettrica.

Sono richiesti :

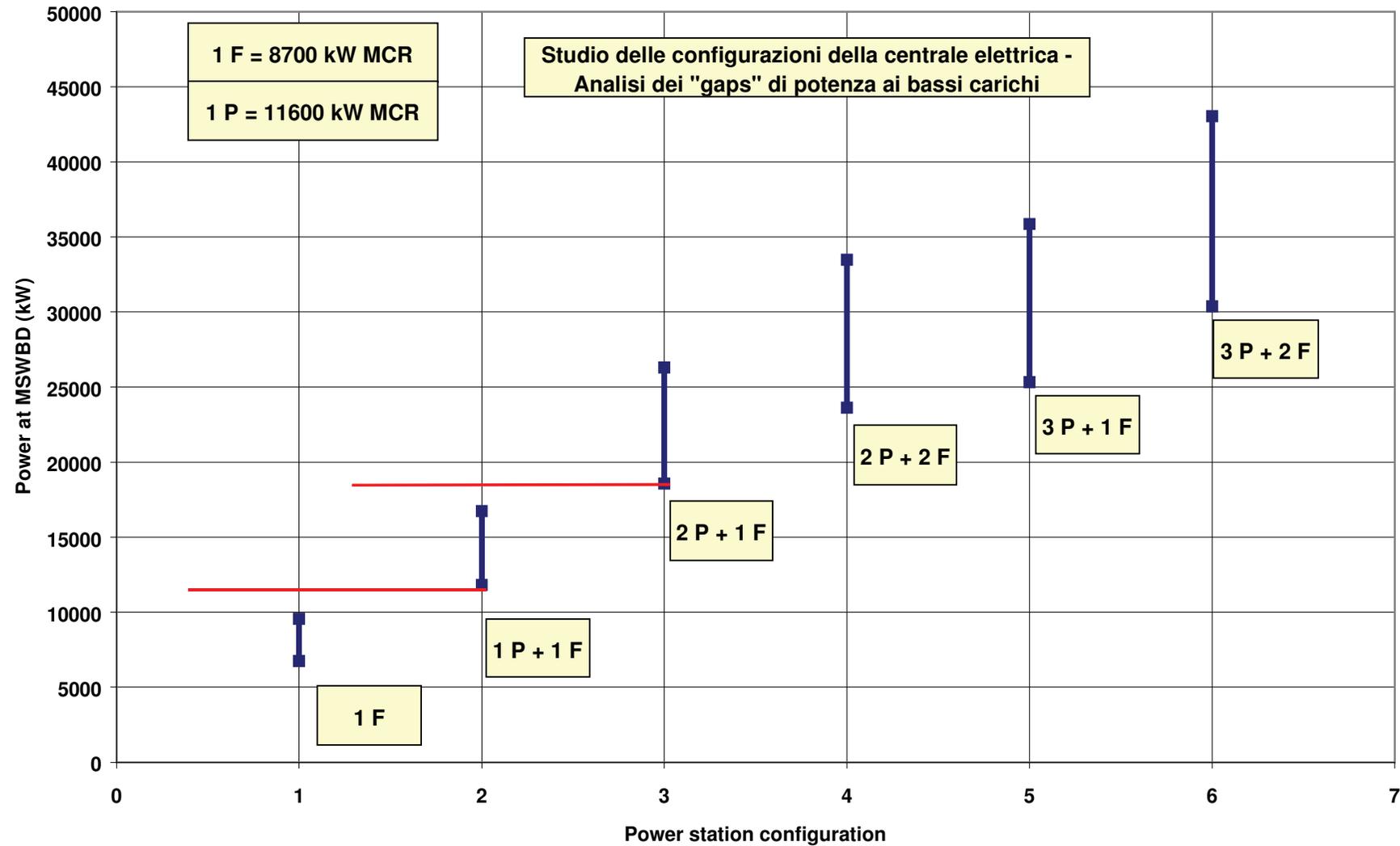
- **il dimensionamento dell'impianto di generazione per la potenza propulsiva incluso il "sea margin", più il carico elettrico di bordo (ship service electric load) maggiorato con un margine che tenga conto delle incertezze di progetto (es. margine del 15%). E' fondamentale disporre di una curva di previsione velocità – potenza propulsiva affidabile e di una valutazione corretta del carico elettrico di bordo;**
- **il dimensionamento della centrale con un D/A sempre in riserva e possibilmente un D/A in manutenzione (eccetto che per il 100% della MCR propulsiva);**
- **per ogni D/A un carico massimo dell'85 - 90%, e un carico minimo del 60%;**
- **motori diesel a quattro tempi con cilindri dello stesso diametro, corsa e numero di giri per una gestione semplificata della manutenzione e dei rispetti;**
- **motori diesel funzionanti continuativamente in nafta pesante a tutti i possibili carichi;**
- **gruppi D/A, o soli motori diesel, fissati a scafo tramite resilienti;**
- **automazione dell'impianto tipo UMS;**

Impianti di propulsione navale

- **studio delle possibili configurazioni della centrale elettrica in termini di numero di gruppi D/A e numero di cilindri per gruppo D/A. Stabilita una certa configurazione della centrale, si esegue un diagramma a barre che fornisce, per ogni possibile combinazione di utilizzo dei gruppi D/A, le potenze minime e massime disponibili in corrispondenza delle % minime e massime di carico accettabile. Si osserva che le configurazioni sono in genere critiche ai bassi carichi (presentano dei “vuoti” di potenza fra una combinazione di motori e la successiva) mentre hanno maggior flessibilità agli alti carichi. Un buon equilibrio si ottiene in genere con le configurazioni “padri + figli”, dove il numero di cilindri dei motori “figli” è circa $2/3$ di quello dei motori “padri” (es. : 8 + 12, 9 + 14, 12 + 16). Analizzando le varie possibilità, si eliminano, se possibile, i “vuoti” di potenza in corrispondenza di una serie di condizioni di servizio che possono andare da :**
 - ✓ **porto senza passeggeri, a**
 - ✓ **velocità massima con passeggeri al completo**

includendo una serie di velocità intermedie più manovra e fissando i relativi bilanci elettrici preliminari;

Impianti di propulsione navale



Impianti di propulsione navale

Inoltre :

- **nella scelta del sistema elettrico di conversione (sincroconvertitore, cicloconvertitore, PWM) si tiene conto della distorsione armonica introdotta nella rete elettrica di bordo dal convertitore;**
- **la presenza della distorsione armonica impone l'adozione di filtri armonici oppure di motogeneratori che separano elettricamente la rete degli utenti sensibili (luce, strumentazione elettronica) dalla rete di bordo inquinata dalle armoniche prodotte dai convertitori di frequenza;**
- **negli impianti ad alta potenza si adottano le tensioni di 6.6 e 11 kV per limitare l'intensità della corrente. Per potenze inferiori si adotta la tensione di 3.3 kV;**
- **gli utenti elettrici ad alto assorbimento di corrente sono alimentati direttamente alla tensione di generazione (eliche di manovra, compressori condizionamento);**
- **gli altri utenti elettrici (pompe, ventilatori, ecc.) sono alimentati in bassa tensione (690 V, 450 V e 220 V per gli utenti minori).**

Motori elettrici di propulsione – Convertitori di frequenza - Trasformatori

- **i motori elettrici di propulsione sono in generale a doppio avvolgimento, alimentati da doppio convertitore di frequenza (un convertitore per ciascun avvolgimento). I motori sono in grado di operare nella modalità “half motor”, ossia con un solo avvolgimento alimentato;**

Impianti di propulsione navale

- La frequenza base di 60 Hz può essere variata dai convertitori di frequenza tra circa 6 e 16 Hz con corrispondente campo di giri tra 50 e 140 giri/min. per un motore a 7 coppie polari;
- il motore è alimentato a circa 1500 V. Il raffreddamento del motore è ad aria in circuito chiuso, circolata da una serie di ventilatori. L'aria, a sua volta, è raffreddata da refrigeranti con circolazione di acqua dolce dell'impianto di raffreddamento centralizzato della nave;
- il motore è a doppio cuscinetto. Può essere necessaria la lubrificazione forzata a bassi giri (es. da 0 a 50 giri/min.);
- i trasformatori di alimentazione dei convertitori di frequenza portano da 6.6 a 1 – 3 kV la tensione in ingresso ai convertitori. Gli avvolgimenti dei trasformatori sono costruiti per ottenere il richiesto sistema di impulsi del convertitore (6 o 12). Il sistema a 12 impulsi comporta una minore distorsione armonica in rete;
- il raffreddamento dell'apparecchiatura statica di conversione è eseguito con circolazione forzata di acqua dolce deionizzata (non conduttrice, in quanto i componenti da raffreddare sono montati direttamente senza isolamento sugli elementi dissipatori di calore raffreddati ad acqua);
- ai bassi carichi il fattore di potenza del convertitore diminuisce. Pertanto un generatore, già erogante una corrente a basso $\cos \phi$, può non essere in grado di far fronte ad un ulteriore incremento di corrente, anche se la potenza propulsiva è bassa. E' richiesta quindi l'inserzione in rete di un altro generatore. Entrambi i generatori funzioneranno basso carico (diseconomicità).

Impianti di propulsione navale

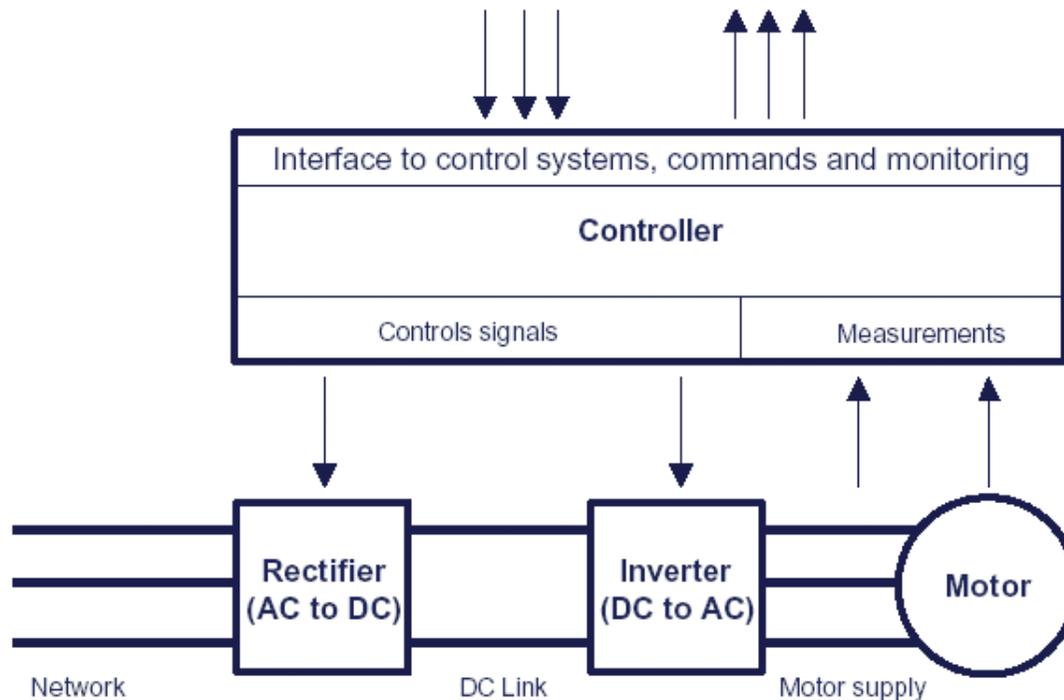
Controllo del motore elettrico di propulsione

**Il principale tipo di controllo del motore è il controllo di velocità.
Tramite due computers vengono controllati i valori di velocità, coppia e potenza del motore.**

Il sistema di controllo comprende :

- **selezione della stazione in comando;**
- **controllo della velocità attuale, min., max. e sovravelocità;**
- **programma aumento / diminuzione giri, interfacciato con il Power Management System;**
- **sincronizzazione di fase delle eliche;**
- **controllo dei valori min. e max. della frequenza;**
- **limitazione della coppia elica;**
- **interventi per avarie e sicurezze varie;**
- **logiche di avviamento;**
- **diagnostica dell'impianto.**

Impianti di propulsione navale



Schematics of a variable speed drive, showing a frequency converter with DC Link, typically for VSI and CSI type converters.

Il “controller” acquisisce valori misurati e valori di feedback da sensori posti nell’azionamento e nel motore.

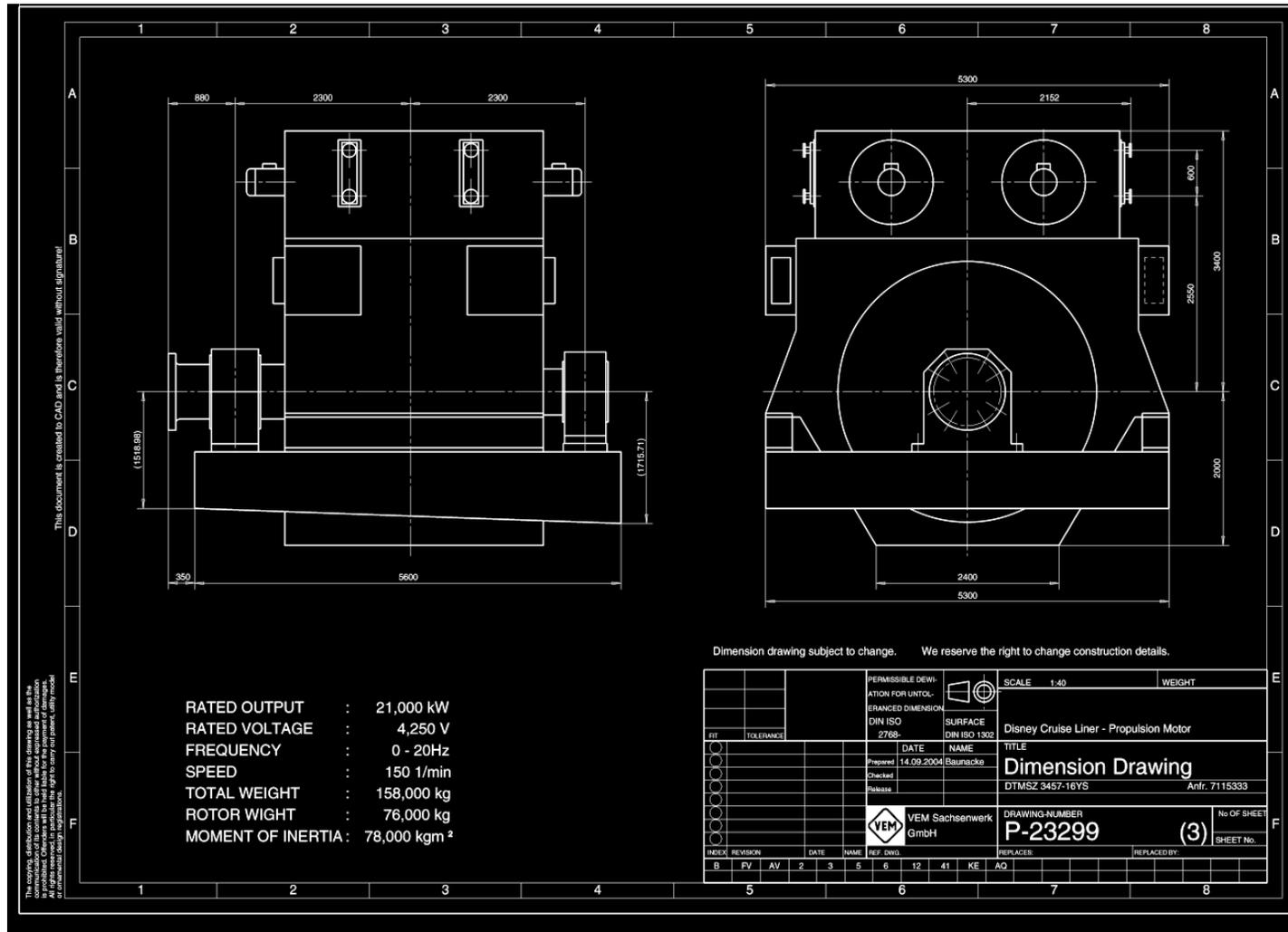
Tipicamente vengono misurati le correnti e la velocità del motore e, alle volte, le temperature e le tensioni.

Il “controller” provvede a comandare l’accensione e lo spegnimento degli elementi (tiristori o GTO) del raddrizzatore e dell’inverter.

Schema di controllo per sincroconvertitori e convertitori PWM

Impianti di propulsione navale

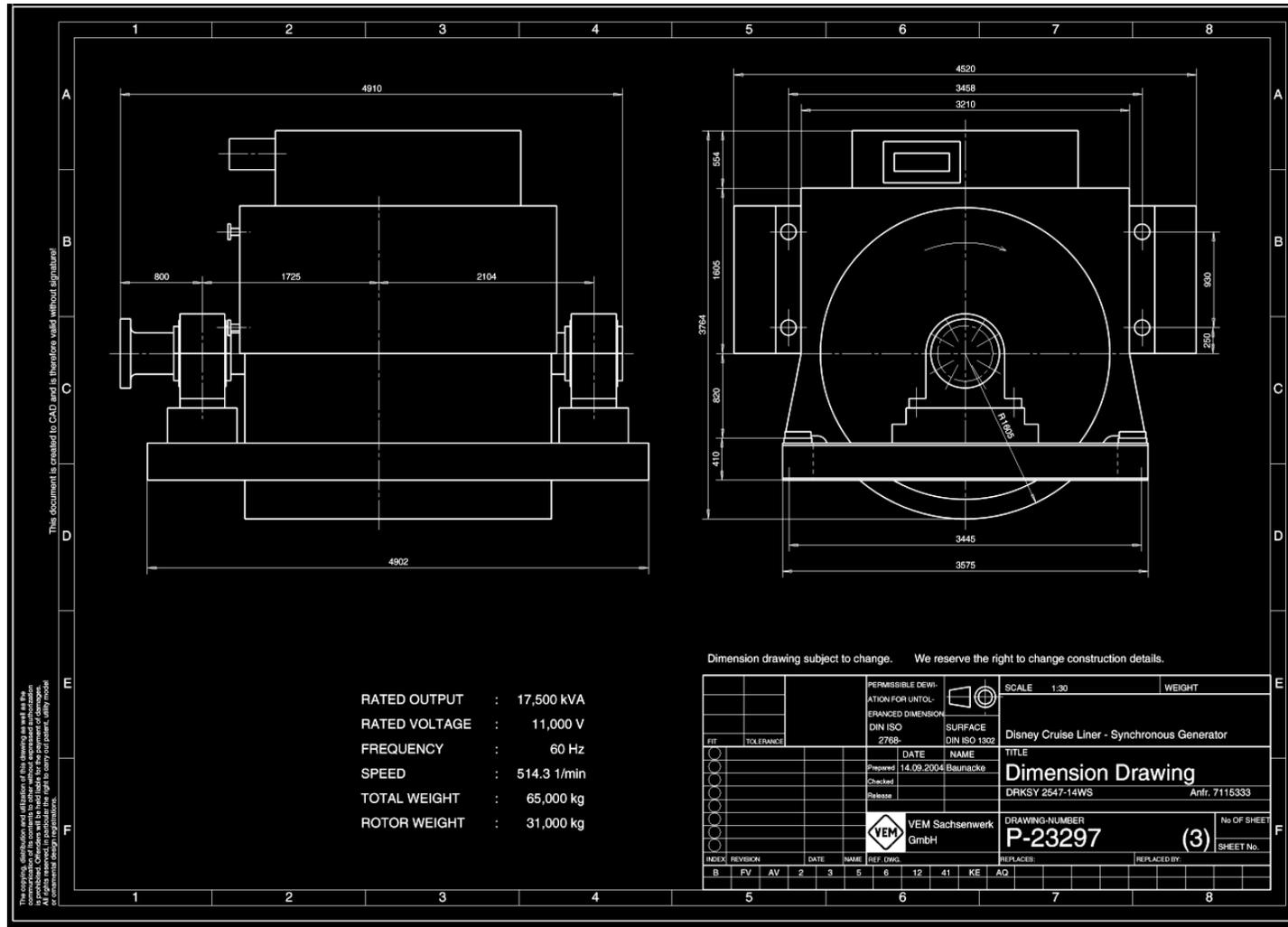
Motore elettrico di propulsione



Data: 15/02/2007

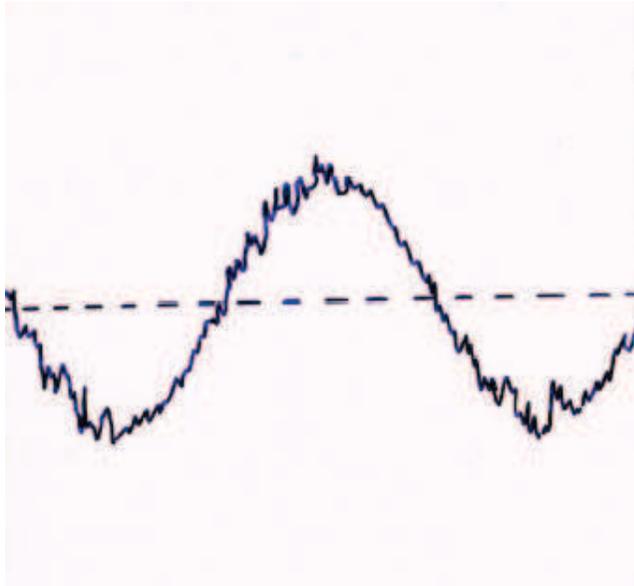
Impianti di propulsione navale

Alternatore



Impianti di propulsione navale

Distorsione armonica



$$\text{THD}(i) = 100\% \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_{(h)}^2}}{i_{(1)}}$$

Esempio di forma d'onda della tensione al quadro elettrico principale a 6.6 kV nella condizione :

- **Potenza M.P. : 14 MW (MCR)**
- **Giri M.P. : 140 al min.**
- **Distorsione massima rilevata : 8.4%**
(dipendente anche dal carico elettrico non propulsivo)

La distorsione della forma d'onda richiede la protezione dei circuiti elettronici e luce.

Distorsione totale della corrente (Total harmonic distortion = THD).

$i_{(1)}$ è il valore fondamentale RMS dell'onda di corrente

$i_{(h)}$ è il valore RMS dell'armonica di ordine h di corrente.

Impianti di propulsione navale

Nelle reti di distribuzione in c.a. prive di convertitori di frequenza, le onde di tensione e corrente hanno, in linea di massima, forma puramente sinusoidale con frequenza pari alla frequenza di alimentazione (50 o 60 Hz).

Quando alla rete è connesso un carico non lineare, ossia un carico che non preleva corrente sinusoidale, come nel caso del convertitore di frequenza, la corrente del carico provocherà una distorsione della corrente di rete.

La forma d'onda della corrente di rete, oltre ad avere una componente sinusoidale di frequenza pari alla frequenza di alimentazione, avrà componenti sinusoidali di ordine superiore dipendenti dal tipo di convertitore e dalla sua configurazione (a 6 o a 12 impulsi). La distorsione armonica non crea problemi ai motori elettrici, anche se provoca un aumento delle perdite resistive i^2R a causa delle fluttuazioni della corrente. Per componenti sensibili quali radio, radar, computer, la distorsione può rappresentare un problema e il suo valore massimo va controllato. I sistemi più usati per ovviare al problema sono :

- adozione di convertitori a 12 impulsi in luogo di quelli a 6 impulsi;**
- applicazione di filtri armonici in rete (non efficaci nel caso dei cicloconvertitori);**
- installazione di una rete indipendente che alimenta gli utenti sensibili. Tale rete, elettricamente separata dalla rete principale, è alimentata da gruppi motogeneratori.**

Impianti di propulsione navale

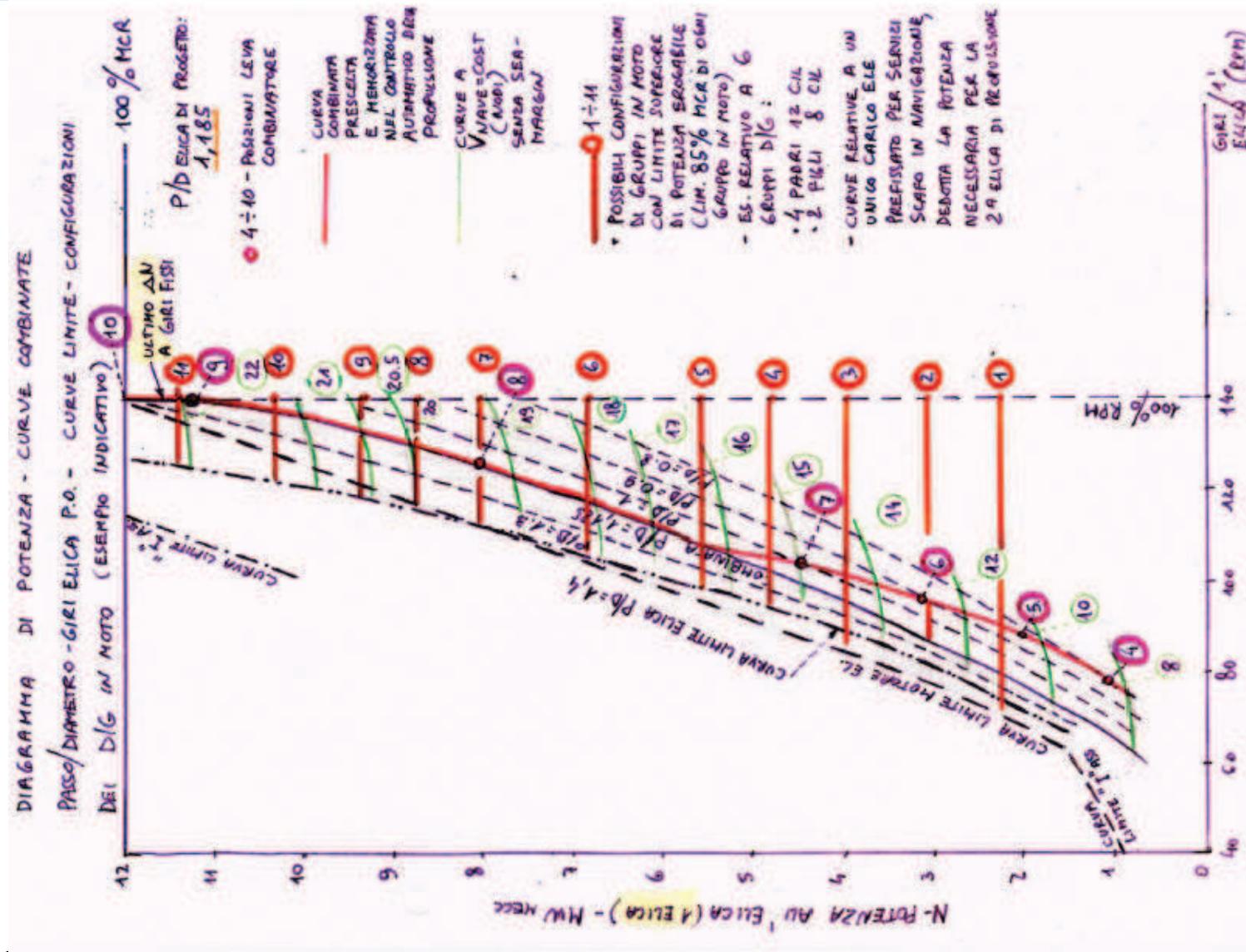
Scelta dell'elica

- Le eliche, sia a pale fisse che orientabili, sono sempre del tipo ad alto skew.
- Poichè il motore elettrico di propulsione è in grado di coprire con continuità tutto il campo di giri da max. AV a max. AD, **l'elica può essere a pale fisse.**
- Da tener presente che l'elica a pale fisse può assorbire solo il 50% della MCR in marcia addietro. Nonostante ciò viene sempre preferita da alcuni armatori.
- **L'elica a pale orientabili** ha un rendimento di poco inferiore a quello dell'elica a pale fisse.
- La scelta dell'elica a p. o. sacrifica una certa % di rendimento a vantaggio di un miglior comportamento vibratorio. L'elica a p. o. è basicamente unidirezionale e pertanto la forma della pala può essere ottimizzata sia idrodinamicamente che strutturalmente. Le eliche a p. o. ad alto skew producono il minimo campo di impulsi di pressione sulla volta di poppa.
- Il diagramma giri – potenza dell'elica a p.f. è ovviamente unico, il che implica una perdita di rendimento quando elica e scafo sono sporchi.
- Con l'elica a p.o è invece possibile variare la combinata prescelta mantenendosi sulle curve a velocità nave costante. Per tale tipo di navi è importante poter prolungare i tempi fra le immissioni in bacino per manutenzione.

Impianti di propulsione navale

- **In caso di danni all'elica, una pala di elica a p. o. può essere sostituita anche a nave galleggiante.**
- **Il meccanismo di controllo del passo è da lungo tempo del tutto affidabile.**
- **Oltre che in modo combinato, passo e giri possono essere regolati separatamente, sia localmente che a distanza da tutte le stazioni di controllo remoto (plancia, ali di plancia, ECR).**
- **il controllo totale sulla manovrabilità della nave può includere la gestione delle eliche di propulsione, dei timoni e delle eliche di manovra tramite un dispositivo azionabile da uno "joystick".**
- **Per ridurre gli sbilanciamenti e le forze verticali sincronizzate sulla struttura scafo, è prevista la sincronizzazione di fase delle due eliche. Il sistema di sincronizzazione di fase delle eliche agisce dal 30% al 100% dei giri nominali e consente di variare l'angolo di sfasamento delle pale fra 0° e 180° (fra elica "master" ed elica "slave").**

Impianti di propulsione navale



Data: 15/02/2007

Impianti di propulsione navale

Gestione della centrale elettrica tramite Power Management System

Lo scopo del Power Management System (PMS) è quello di assicurare che in ogni condizione operativa la potenza in rete sia sufficiente per far fronte alla richiesta proveniente dai vari carichi (propulsione, ausiliari, impianti di processo, ...).

Ciò si ottiene monitorando i carichi, lo stato dei generatori e lo stato del sistema di distribuzione. Se la potenza diviene insufficiente, sia per l'aumento dei carichi che per guasto ad un generatore, il PMS avvierà in automatico il generatore successivo nella sequenza di avviamento.

Il controllo dei motori può essere :

- **completamente automatico tramite PMS;**
- **manuale a distanza, controllato dal PMS;**
- **manuale a distanza non automatico;**
- **locale**

Tutti i motori in stand-by sono mantenuti preriscaldati e prelubrificati, pronti ad essere avviati e connessi immediatamente in rete secondo una sequenza prefissata. E' anche prevista la funzione di "slow turning" mediante aria avviamento (p. es. 1 minuti ogni 2 ore).

Impianti di propulsione navale

Il controllo dei motori diesel è affidato a regolatori di giri elettronici che consentono una regolazione dei giri di tipo isocrono.

Compiti del PMS :

- **gestione della generazione di potenza** : monitoraggio della frequenza e della tensione, monitoraggio della ripartizione dei carichi attivo e reattivo, avviamento / arresto dei generatori in funzione dei carichi. Inoltre il PMS controlla le protezioni e le avarie dei gruppi, stacca dal quadro il gruppo in avaria previo avviamento e collegamento al quadro di un gruppo stand-by. In caso di avaria grave ferma immediatamente il gruppo. I motori diesel vengono caricati secondo un programma “aumenta / diminuisce” che evita stress termici;
- **gestione dei carichi** : monitoraggio dell’assorbimento di potenza, coordinamento dei sistemi di limitazione della potenza, taglio dei carichi non essenziali, blocco dell’avviamento dei grossi utenti. Il PMS controlla le richieste di inserzione in rete degli utenti ad alta potenza e avvia in anticipo nuovi gruppi elettrogeni arrestandoli successivamente in automatico (sistema detto “interrogazione di potenza”);

Impianti di propulsione navale

- **gestione della distribuzione** : configurazione e controllo delle sequenze di riconfigurazione del sistema di distribuzione. In molte navi aventi modi operativi differenti (per esempio mezzi per operazioni “offshore”), il sistema di distribuzione deve essere configurato di volta in volta in base al modo operativo richiesto.

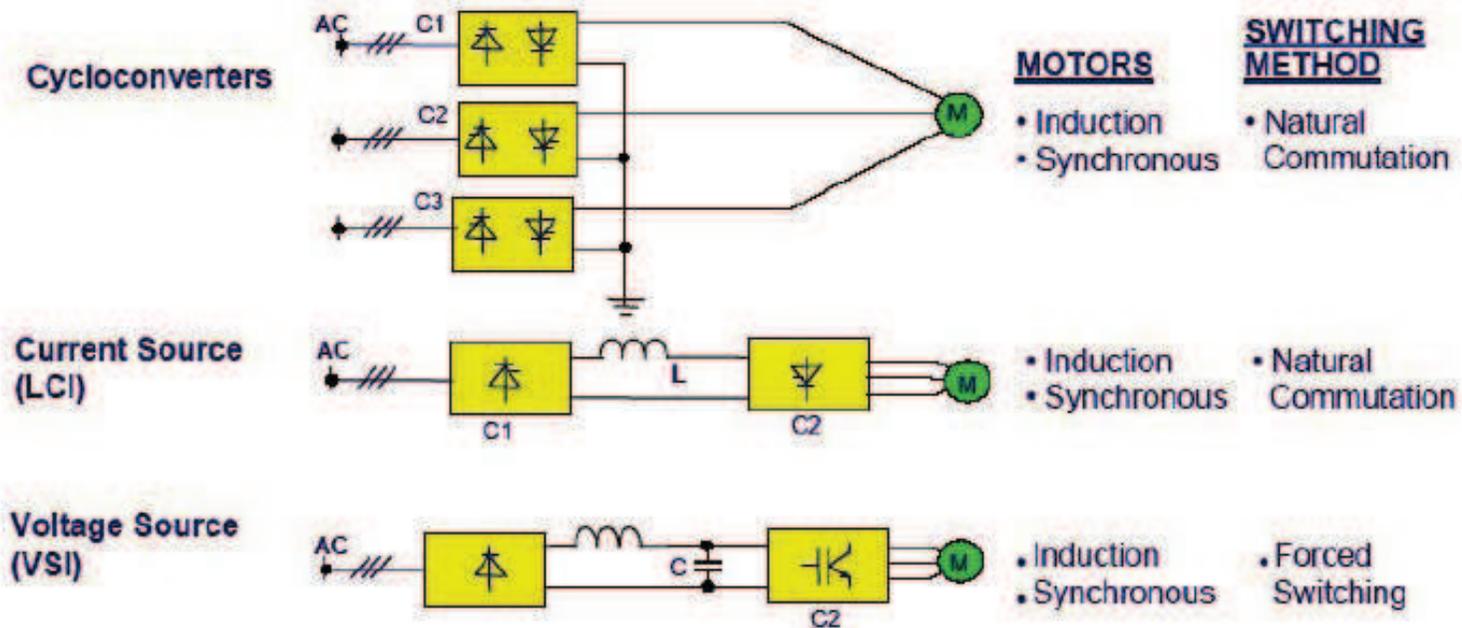
Per le navi da crociera sono previsti tre modi di controllo della centrale elettrica:

- **Porto**
- **Manovra**
- **Navigazione**

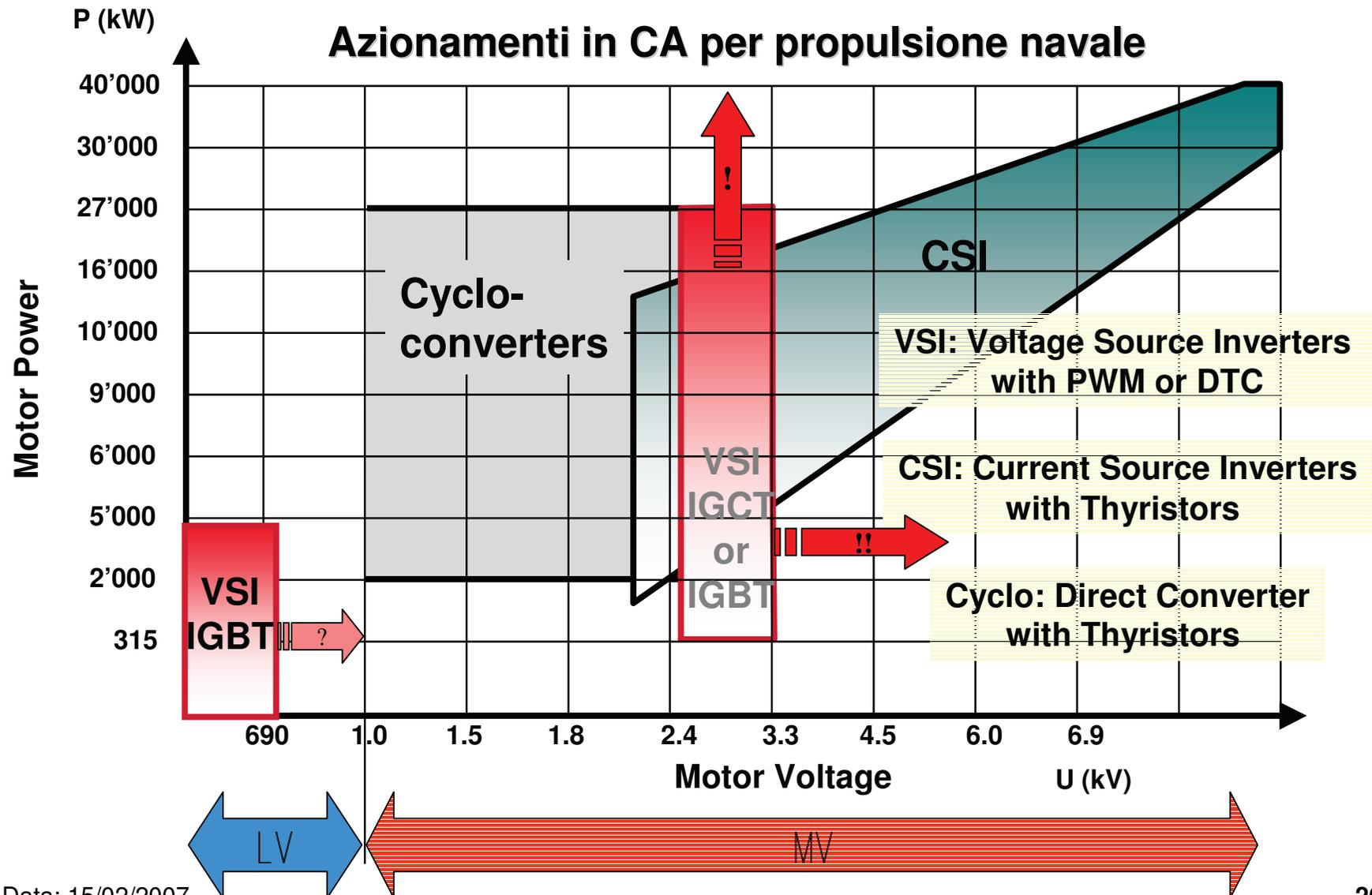
In porto può essere tenuto in moto un solo gruppo collegato al quadro elettrico principale. In altre condizioni i gruppi sono sempre almeno due. In manovra si prefissa il numero di gruppi in moto e tale numero non viene mai ridotto per ragioni di sicurezza (pericolo di black out durante le fasi della manovra).

Impianti di propulsione navale

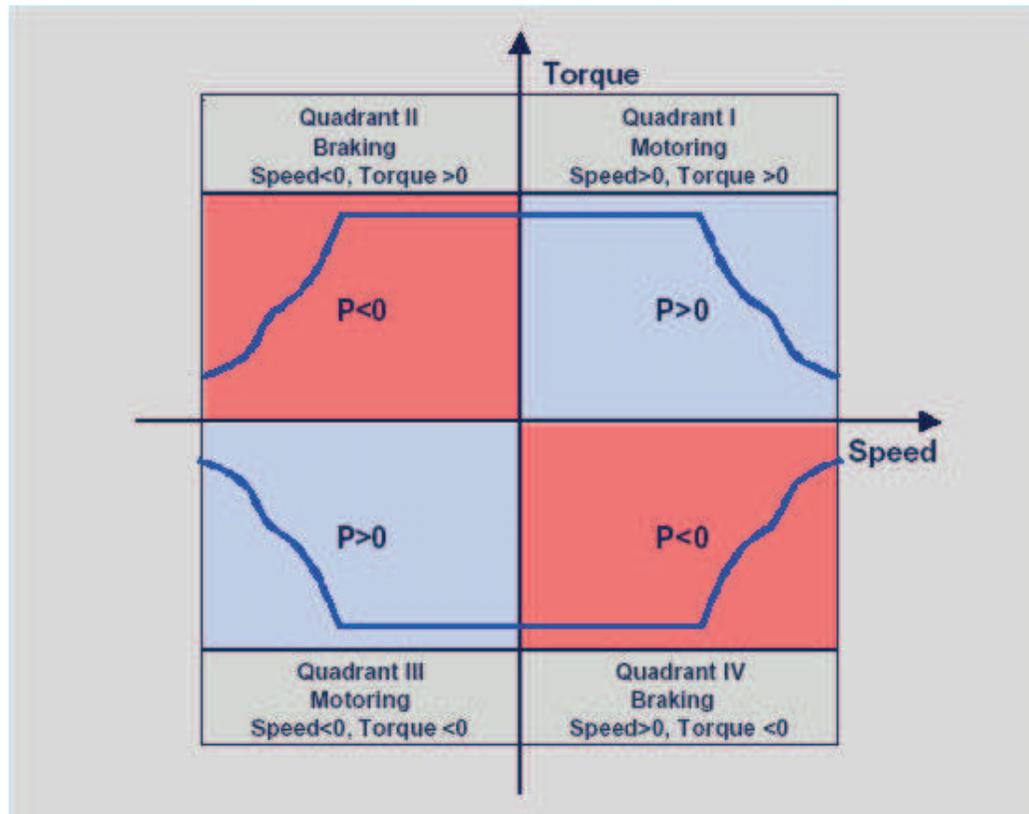
Convertitori per impiego propulsivo navale.



Impianti di propulsione navale



Impianti di propulsione navale



The four quadrants of operations

Gli azionamenti a velocità controllata sono spesso suddivisi in base alla loro possibilità di operare nei quattro quadranti del diagramma velocità – momento torcente. Alcuni sono progettati per operare anche nei quadranti 2 e 4, ossia per assorbire la potenza rigenerata dal carico durante la frenatura.

Impianti di propulsione navale

Sincroconvertitori

- **Sinonimi di “sincroconvertitore” :**
 - ✓ “Load Commutated Inverter” (LCI)
 - ✓ “Current Source Inverter” (CSI)

- **In campo navale il sincroconvertitore viene usato solo per azionare motori sincroni. Esso può essere impiegato, previa modifiche, anche con motori asincroni;**

- **Il sincroconvertitore è costituito da quattro componenti fondamentali :**
 - ✓ **il raddrizzatore controllato sul lato rete**
 - ✓ **il collegamento intermedio in corrente continua (DC link)**
 - ✓ **l’inverter sul lato motore**
 - ✓ **il sistema di controllo**

- **Il raddrizzatore controllato viene alimentato dalla rete a frequenza costante (60 Hz) e produce una corrente continua ai terminali del DC link. Il valore di tale corrente viene controllato variando l’angolo di accensione dei tiristori. Lo stato di conduzione dei tiristori si interrompe quando la corrente di rete passa per lo zero : per tale ragione si dice che i tiristori sono commutati naturalmente dalla rete;**

Impianti di propulsione navale

- **L'induttore posto nel DC link provvede a "smussare" i picchi della corrente continua. L'insieme raddrizzatore controllato – DC link produce una corrente all'incirca costante;**
- **L'inverter lato motore converte la corrente continua prelevata dal DC link in corrente alternata a frequenza variabile. I tiristori dell'inverter vengono accesi in sincronismo con la rotazione del motore. La loro commutazione è di tipo naturale, comandata dalla forza contro-elettromotrice del motore. Al fine di assicurare ai terminali del motore la tensione necessaria per la commutazione dei tiristori, il motore deve operare in modo capacitivo (sovraeccitazione), con la corrente in anticipo di fase sulla tensione;**
- **La velocità del motore viene controllata variando la frequenza in uscita dall'inverter. Il flusso magnetico del motore e la coppia vengono invece controllati variando l'ampiezza della corrente in uscita dal DC link;**

Impianti di propulsione navale

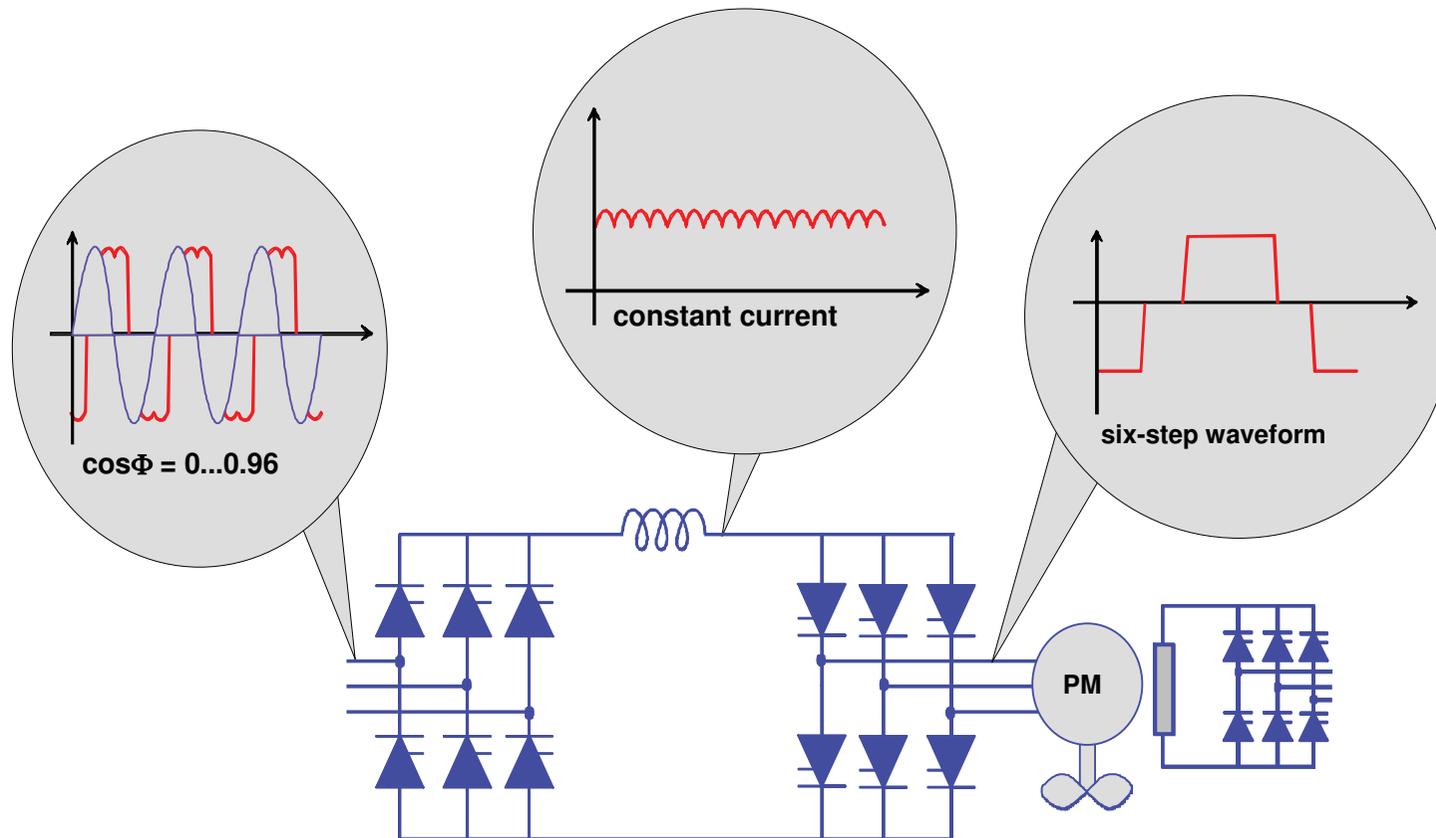
- **A bassa velocità (al di sotto del 10% della velocità nominale), la forza contro-elettromotrice del motore è insufficiente ad assicurare la commutazione dei tiristori dell'inverter. Il DC link viene allora fatto funzionare in modo pulsante, azzerando periodicamente la corrente continua. Ciò comporta notevoli pulsazioni di coppia a bassi giri;**
- **Il sincroconvertitore consente la rigenerazione e quindi rende possibile l'arresto e l'inversione del moto dell'elica in tempi rapidi. Durante la fase di frenatura, l'energia rigenerata può essere convertita in calore tramite un resistore, in genere raffreddato ad acqua;**
- **Visto dalla rete, il sincroconvertitore rappresenta un carico con fattore di potenza pari a circa 0.9 a velocità nominale, decrescente al decrescere della velocità. Visto dall'inverter, il motore opera con fattore di potenza 0.9 poiché scambia con esso la potenza di commutazione;**
- **La frequenza in uscita può superare la frequenza in entrata (es. 80 Hz contro 60 Hz in entrata);**

Impianti di propulsione navale

- **La potenza massima può raggiungere i 100 MW (30 MW nelle applicazioni navali);**
- **I sincroconvertitori per alte potenze sono di solito progettati come convertitori a 12 impulsi. I circuiti dei convertitori a 12 impulsi fanno uso di due convertitori a 6 impulsi alimentati da trasformatori separati i cui avvolgimenti sono connessi in modo da produrre due tensioni in uscita sfasate fra loro di 30° . La tensione applicata ad uno dei convertitori dal trasformatore connesso a triangolo è in fase con la tensione primaria. Il trasformatore che alimenta l'altro convertitore è connesso a stella e produce una tensione sfasata di 30° .**

Impianti di propulsione navale

Sincroconvertitore (Current Source Inverter) – Motore sincrono



Impianti di propulsione navale

Cicloconvertitori

- **Il cicloconvertitore converte una tensione costante a frequenza costante in una tensione variabile a frequenza variabile in un solo stadio, senza bisogno di collegamenti intermedi in corrente continua;**
- **Il cicloconvertitore può essere usato per alimentare sia motori sincroni che motori asincroni. In campo navale esso viene tuttavia impiegato solo con motori sincroni;**
- **I cicloconvertitori impiegano tiristori ordinari, ossia componenti a commutazione naturale. La tensione in uscita è costruita collegando gli avvolgimenti del motore in successione a ciascuna delle fasi della rete a frequenza costante nel momento in cui la tensione nella fase è prossima al valore desiderato. Per ciascuno dei tre avvolgimenti del motore sono necessari due convertitori controllati, ciascuno dei quali ha sei tiristori: un convertitore fornisce la corrente positiva e l'altro la corrente negativa;**

Impianti di propulsione navale

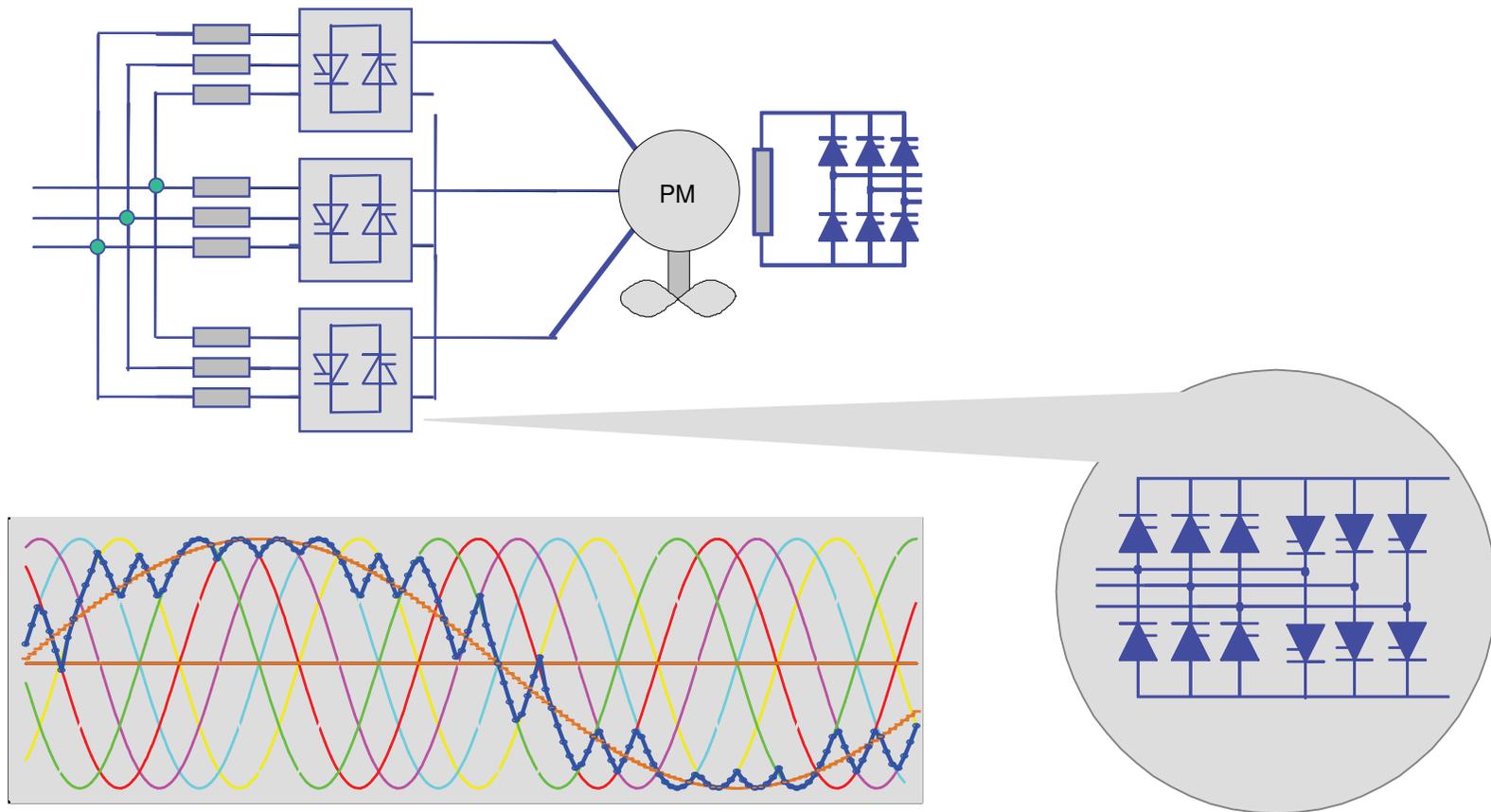
- **I pregi maggiori del cicloconvertitore sono l'elevata coppia sviluppata a bassi giri, con ridotte pulsazioni di coppia e un'eccellente risposta dinamica. Nelle applicazioni su navi rompighiaccio, il cicloconvertitore rende possibile la rotazione di un'elica bloccata dai ghiacci senza provocare lo stallo del motore. Nelle applicazioni su navi a posizionamento dinamico e su navi passeggeri consente la manovra con bassissime velocità di rotazione dell'elica;**
- **Il cicloconvertitore può funzionare in marcia addietro e consente la rigenerazione;**
- **La rete percepisce il cicloconvertitore come un carico avente fattore di potenza compreso fra 0.75 e 0.85 alla velocità nominale del motore. Il fattore di potenza tende a decrescere man mano che la velocità diminuisce. Per tale ragione, la potenza apparente installata (kVA) deve essere sufficientemente elevata e ciò determina un incremento di dimensioni dei generatori. Di per sé, il motore alimentato dal cicloconvertitore funziona con fattore di potenza pari all'unità; in effetti il motore non scambia potenza reattiva con il cicloconvertitore e ciò rappresenta un vantaggio in quanto consente di ridurre il dimensionamento del motore;**

Impianti di propulsione navale

- **La frequenza in uscita raggiunge valori massimi pari al 30-40% della frequenza in entrata. Nei sistemi a 50 e 60 Hz, la frequenza in uscita è pertanto dell'ordine di 15-20 Hz. In tal modo è possibile alimentare motori con alto numero di poli (es. 20) al fine di ottenere velocità relativamente basse (es. 120 giri/min.) con le quali azionare l'elica senza bisogno di riduttori di giri;**
- **La tensione nominale dei motori varia fra i 1500 e i 1800 V;**
- **La potenza massima è dell'ordine dei 30 MW, con la possibilità di sostenere elevati sovraccarichi.**

Impianti di propulsione navale

Cicloconvertitore – Motore sincrono



Impianti di propulsione navale

Convertitore tipo PWM (pulse width modulated)

- **Sinonimo di convertitore PWM : “Voltage Source Inverter” (VSI);**
- **Il convertitore PWM si usa per alimentare motori ad induzione (asincroni);**
- **Il circuito base di un convertitore PWM è simile a quello di un sincroconvertitore: anch'esso è costituito da un raddrizzatore lato rete e da un inverter lato motore;**
- **Il raddrizzatore lato rete è di tipo non controllato e alimenta un collegamento in corrente continua (DC link) dotato di capacità C. L'inverter lato motore, a differenza di quanto avviene nel sincroconvertitore, ha la possibilità di effettuare la commutazione forzata della corrente tramite transistors o tiristori tipo GTO. Lo stato di conduzione o non conduzione di tali elementi è ottenuto controllando la corrente di base del transistor o applicando impulsi di corrente alla porta del tiristore GTO;**
- **La temporizzazione degli impulsi è posta sotto il controllo di un regolatore elettronico che dà inizio alla conduzione applicando alla porta del GTO un impulso di corrente positivo e interrompe la conduzione applicando alla porta un impulso di corrente negativo;**

Impianti di propulsione navale

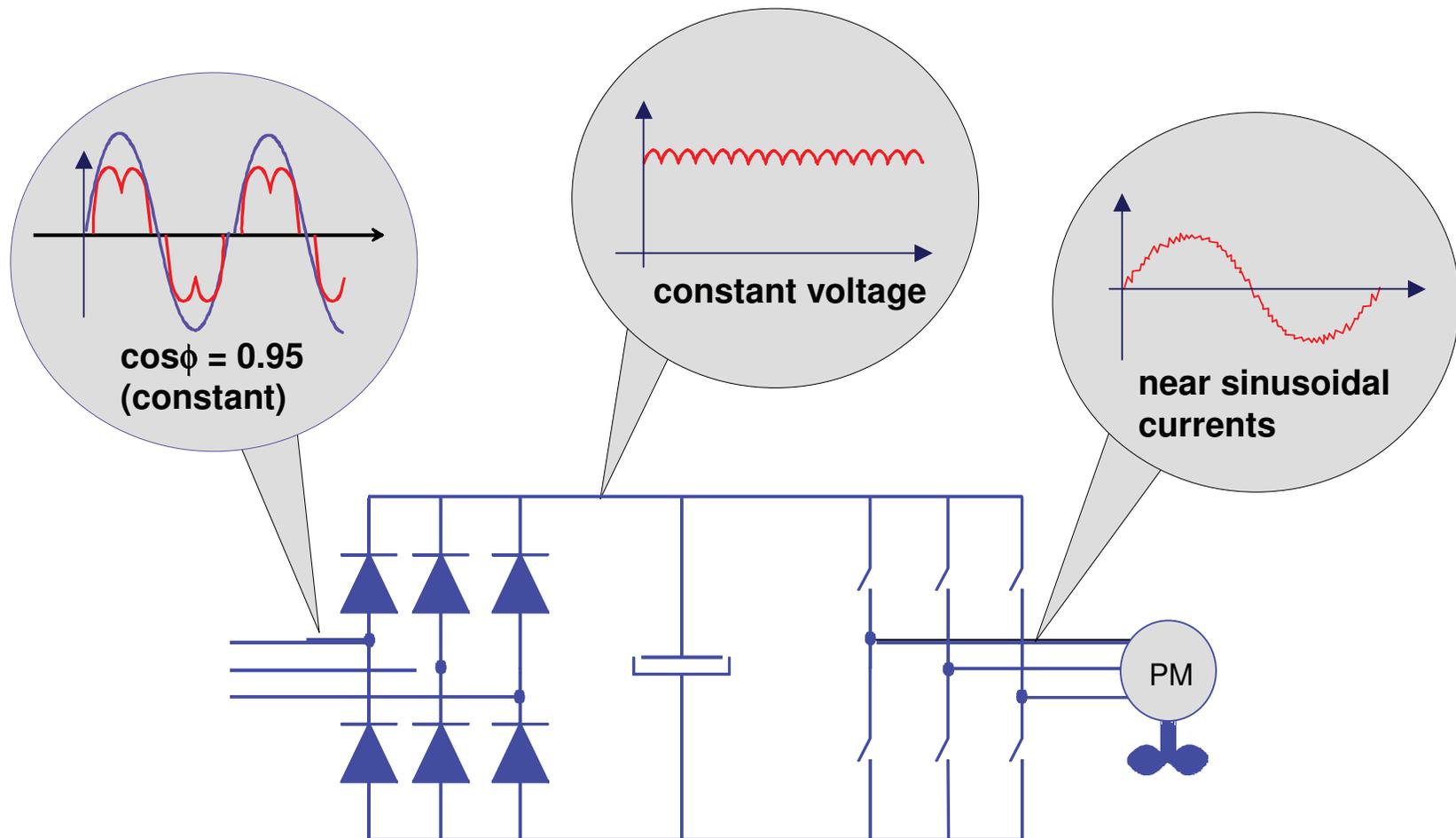
- **La componente fondamentale della corrente alternata in uscita verso il motore viene ottenuta accendendo e spegnendo i GTO in modo da formare impulsi di larghezza variabile (vedi figura);**
- **Si usano dispositivi elettronici del tipo :**
 - ✓ **IGBT insulated gate bipolar transistor**
 - ✓ **GTO gate turn off thyristors**
 - ✓ **IGCT integrated gate commutated thyristors**
- **I convertitori PWM possono alimentare il motore in marcia avanti e indietro. La rigenerazione non è possibile in quanto il raddrizzatore non controllato non è in grado di generare una tensione negativa;**
- **I convertitori di tipo PWM hanno un fattore di potenza relativamente alto che si avvicina a 0.9 e si mantiene costante ad ogni velocità del motore, contrariamente a quanto accade per sincro- e cicloconvertitori;**
- **La corrente ai morsetti del motore è sinusoidale e dà luogo a bassissime pulsazioni di coppia;**

Impianti di propulsione navale

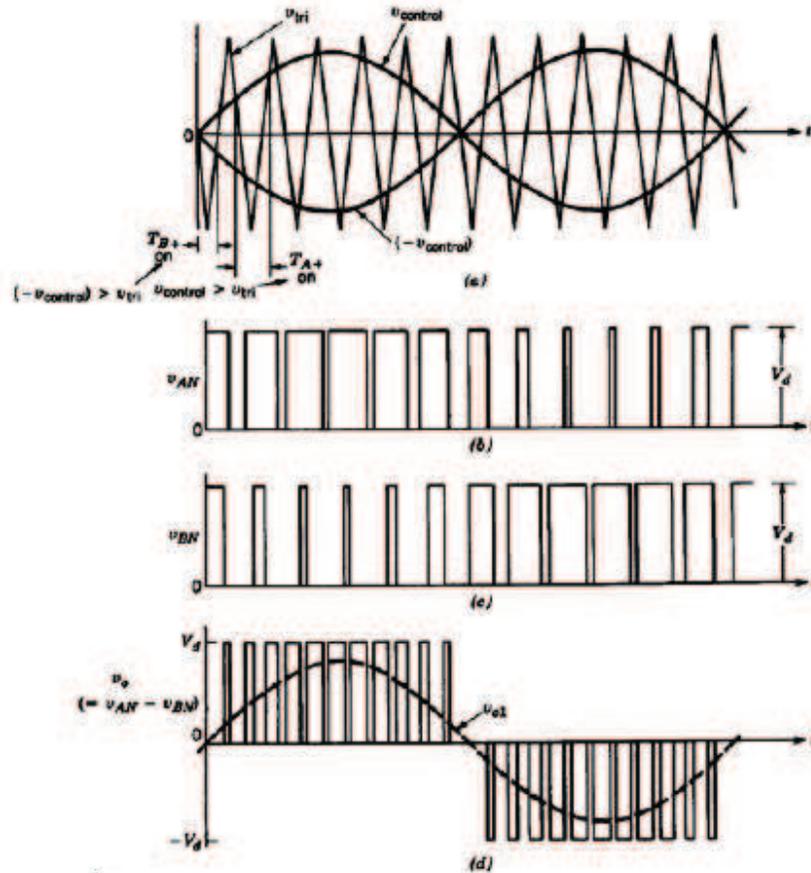
- **La frequenza in uscita può raggiungere valori maggiori di 300 Hz;**
- **La potenza è per ora limitata a circa 10 – 15 MW, con prospettive di notevole incremento connesso all'adozione di componenti IGBT a tecnologia avanzata. Particolarmente interessante la possibilità di azionamento di motori asincroni ad alta velocità accoppiati a riduttore di giri (assieme relativamente compatto e poco ingombrante, se paragonato ad un motore elettrico lento). Buona ridondanza nel caso di due motori elettrici azionanti un riduttore.**

Impianti di propulsione navale

PWM converter [Voltage Source Inverter (VSI)]



Impianti di propulsione navale



← Single phase PWM unipolar voltage switching

Sinusoidal control signal $v_{control}$ at the desired frequency (dependent on machine speed) is compared with a triangular waveform v_{tri}

Impianti di propulsione navale

Azionamento in c.a. media tensione (3.3 kV)



A medium voltage, 3300V IGCT VSI drive for induction motor drives (ABB ACS 6000).

Cabinets (from left):

1: Diode rectifiers,

2: Terminal cabinet and control modules,

3: IGCT inverter module,

4: DC link capacitors,

5: Water-cooling unit with heat exchanger and circulation pumps.