



# **Analisi della distorsione armonica sul sistema elettrico di Megayacht a propulsione elettrica**

INTRODUZIONE .....	5
<b>1 Propulsione elettrica nei sistemi navali .....</b>	<b>6</b>
1.1 GENERALITA' .....	6
1.2 PROPULSIONE ELETTRICA IN CORRENTE ALTERNATA .....	7
1.3 I COMPONENTI D'IMPIANTO .....	8
<i>1.3.1 Gruppi elettrogeni .....</i>	<i>8</i>
1.4 POSSIBILI CONFIGURAZIONI DEI SISTEMI DI PROPULSIONE IN BASE ALLA SCELTA DEL MOTORE ELETTRICO .....	10
<b>2 Azionamenti usati per la propulsione diesel-elettrica .....</b>	<b>11</b>
2.1 AZIONAMENTI A VELOCITA' VARIABILE CON MOTORI IN CONTINUA ...	11
<i>2.1.1 Pro e contro della propulsione in continua .....</i>	<i>12</i>
2.2 AZIONAMENTI CON MOTORI IN CORRENTE ALTERNATA .....	13
<i>2.2.1 Pro e contro della propulsione alternata .....</i>	<i>14</i>
2.2.2 Convertitori indiretti .....	15
2.2.2.1 Generalità .....	15
2.2.2.2 P.W.M.(Pulse Width Modulation) .....	16
2.2.2.3 Sincroconvertitore .....	19
2.2.3.1 Convertitori diretti .....	24
2.2.3.2 Generalità .....	24
2.2.3.3 Cicloconvertitore .....	25

<b>2.3 Motori elettrici di propulsione a c.a.</b> .....	29
2.3.1 GENERALITA' .....	29
2.3.1.1 Motore sincrono .....	29
2.3.1.2 Motore asincrono .....	32
<b>3 Vantaggi della propulsione elettrica</b> .....	35
3.1 Riduzione delle dimensioni del locale apparato motore .....	35
3.2 Diminuzione della potenza installata .....	37
3.3 Diminuzione dei costi di esercizio e manutenzione .....	37
3.4 Riduzione del livello vibratorio trasmesso alle strutture .....	38
3.5 Accresciuta flessibilità di manovra .....	39
3.6 Grande affidabilità e sicurezza delle apparecchiature .....	40
<b>4 Propulsione diesel-elettrica per megayacht</b> .....	42
4.1 GENERALITA' .....	42
4.2 RIASSUNTO DEI BENEFICI DELLA PROPULSIONE DIESEL-ELETTRICA ....	44
4.3 PROPULSIONE DIESEL-ELETTRICA NON CONVENZIONALE .....	45
4.3.1 Benefici del propulsore Azipod .....	45
<b>5 Analisi del sistema di una nave esistente</b> .....	48
5.1 SCHEMA DELLA NAVE CONSIDERATA .....	48
5.1.1 Generatori sincroni .....	49
5.1.2 Convertitori .....	50
5.1.3 Bow thruster .....	52
5.1.4 Trasformatori .....	52
<b>5.2 La simulazione</b> .....	52
5.3 SCHEMA ELETTRICO .....	53
5.4 MODELLAZIONE DELLO SCHEMA .....	54

5.5 SIMULAZIONI EFFETTUATE .....	55
5.5.1 Possibili configurazioni di funzionamento .....	57
5.6 ANALISI DELLE ARMONICHE DI TENSIONE ALLA SBARRA PRINCIPALE NELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE .....	58
5.7 COMMENTO DEI RISULTATI .....	86
APPENDICE	
Ponte di Graetz Semicontrollato .....	88

# Introduzione

Lo scopo di questa tesi è l'analisi della distorsione armonica sul sistema elettrico di Megayacht a propulsione elettrica.

La propulsione elettrica su Megayacht ha assunto negli anni un utilizzo sempre maggiore e quindi si è reso necessario lo studio delle problematiche tra cui quello della distorsione armonica.

Tale problematica si pone in quanto la potenza elettrica necessaria per la propulsione è predominante rispetto alla potenza installata a bordo della nave.

La potenza elettrica viene fornita ai motori di propulsione tramite dei convertitori che distorcono notevolmente la tensione, questa distorsione di tensione comporta il non funzionamento o il non corretto funzionamento delle altre utenze elettriche installate a bordo.

Per giungere allo studio della distorsione armonica sul sistema elettrico di Megayacht a propulsione elettrica siamo partiti dalla narrazione della propulsione elettrica nei sistemi navali (CAP. 1), poi abbiamo visto i tipi di azionamenti e i tipi di propulsori utilizzati per la propulsione (CAP. 2).

Successivamente abbiamo effettuato uno studio sulla propulsione diesel-elettrica per Megayacht con propulsione convenzionale e azimutale (CAP. 3).

Siamo passati all'analisi del sistema della nave in studio (CAP. 4) effettuando la schematizzazione del suo impianto elettrico di bordo con l'utilizzo del programma Matlab che ci ha consentito di effettuare delle simulazioni per le varie configurazioni di servizio al fine di determinare il THD e successivamente abbiamo commentato i risultati ottenuti (CAP. 5).

È stata aggiunta un'appendice in cui viene descritto il funzionamento del ponte di Graetz semicontrollato in quanto la ricerca bibliografica effettuata su tali tipi di ponte non ha portato a risultati di valore.

# 1 PROPULSIONE ELETTRICA NEI SISTEMI NAVALI

## 1.1 Generalità

Per propulsione elettrica (P.E.) si intende l'azionamento delle eliche mediante uno o più motori elettrici, alimentati da generatori riservati a tale scopo o dalla rete ausiliaria di bordo.

Gli impianti di P.E. sono costituiti da una serie di motori primi (Diesel medio-veloci), accoppiati ciascuno ad un alternatore, che alimentano la rete elettrica; a tale rete sono collegati i motori elettrici di propulsione (MEP) dotati di convertitori che hanno la funzione di variare il regime di rotazione del motore agendo sulla frequenza di alimentazione.

Il confronto della propulsione Diesel elettrica viene fatto rispetto a quella Diesel meccanica tradizionale (motore Diesel di propulsione, eventuale riduttore, linea d'asse, elica, timone). L'impianto di propulsione Diesel meccanico tradizionale può essere costituito o da un motore Diesel due tempi lento (a corsa lunga e sovralimentato) accoppiato direttamente all'elica o da un quattro tempi medio-veloce anch'esso sovralimentato, con a valle un riduttore; in entrambi i casi la dimensione della sala macchine è notevole o per la presenza dell'imponente Diesel due tempi o per quella di più Diesel e dei riduttori.

Il motore Diesel ha elevato rendimento nel ristretto range di giri in cui è stato ottimizzato, mentre a bassi regimi i consumi aumentano e la coppia fornita è insufficiente per velocità di rotazione inferiori al 40% rispetto a quella di esercizio.

La P.E. consente di:

- ridurre le dimensioni del locale apparato motore
- diminuire la potenza installata
- diminuire i costi di esercizio e manutenzione
- ridurre il livello vibratorio trasmesso alle strutture e in mare
- accrescere la flessibilità di manovra
- aumentare la disponibilità e la sicurezza delle apparecchiature

I vantaggi generali della propulsione elettrica appaiono evidenti se questa viene comparata con la soluzione propulsiva meccanica convenzionale.

Il rapido sviluppo dell'elettronica di potenza, caratterizzato da grande affidabilità e più estesi limiti operativi, sta inoltre rendendo fortemente appetibile questo tipo di propulsione anche per applicazioni diverse (navi cisterna, navi da carico, traghetti) da quelle che per evidenti vantaggi iniziarono a farne uso (navi da crociera, rompighiaccio, navi oceanografiche, navi posacavi e posatubi, mezzi sottomarini).

## **1.2 Propulsione elettrica in corrente alternata**

I gruppi elettrogeni che alimentano i motori elettrici oggi sono costituiti da motori diesel, generalmente a media velocità, che azionano alternatori a giri costanti.

I motori elettrici di propulsione, in relazione alle potenze propulsive, possono essere motori asincroni o motori sincroni.

Per la regolazione della velocità dei motori elettrici a c.a., e quindi dell'elica, vengono impiegati i convertitori statici di frequenza del tipo indiretto o del tipo diretto in relazione alle potenze elettriche da controllare e alla potenza richiesta per la propulsione.

L'elica, a seconda della tecnica utilizzata nei convertitori statici di frequenza, potrà essere a pale fisse o a pale orientabili.

La propulsione elettrica in c.a., per la facilità con cui oggi può essere regolata la velocità del motore elettrico di propulsione, per la possibilità di utilizzare diesel-alternatori semi-veloci che occupano poco volume, per la possibilità di ridurre il numero dei motori diesel presenti sulla nave perché dagli stessi diesel alternatori viene prelevata anche l'energia elettrica per le altre utenze elettriche, per la scarsa manutenzione richiesta dai motori elettrici in c.a. e dagli alternatori, per l'assenza di riduttori di giri, per la riduzione del rumore e delle vibrazioni, per la migliore affidabilità conseguente alla realizzabile ridondanza, e ancora per tanti altri vantaggi che successivamente prenderemo in esame, oggi diventa sempre più utilizzata non solo sulle navi speciali ma anche sulle navi passeggeri per crociere e sui traghetti (passeggeri e auto).

## 1.3 I componenti d'impianto

Come è stato già detto in precedenza, l'impianto propulsivo diesel-elettrico è costituito da gruppi elettrogeni (motore diesel + alternatore sincrono), convertitori statici di frequenza e motori elettrici di propulsione.

Vediamo gli aspetti principali di ciascuno di essi.

### 1.3.1 Gruppi elettrogeni

I gruppi elettrogeni di propulsione alimentano non solo i motori elettrici per la propulsione ma anche tutte le utenze elettriche.

Essi sono costituiti da motori diesel 4 tempi semiveloci o veloci che azionano alternatori trifasi.

Il numero dei diesel-alternatori, per una nave bielicata, varia in generale da tre a cinque. Il regime rotazionale dei diesel-alternatori è costante, e l'energia elettrica è prodotta a 50 Hz o 60 Hz.

L'energia elettrica prodotta va alle sbarre e da esse può alimentare:

- direttamente o attraverso trasformatori i motori per la propulsione;
- direttamente alcune utenze importanti quali i thrusters, ecc.;
- attraverso trasformatori le altre utenze elettriche trifasi a 400 V e monofasi a 220 V.

Appare evidente che la potenza elettrica alle sbarre è funzione della velocità della nave e della potenza assorbita dalle altre utenze elettriche.

Pertanto il numero dei diesel-alternatori in funzione varierà con il carico elettrico; in tal modo ogni diesel-alternatore funzionerà con rendimento elevato.

I motori elettrici di propulsione potranno variare la loro velocità perché possono essere alimentati a frequenza variabile per la presenza di convertitori statici di frequenza.

Le potenze elettriche dei gruppi elettrogeni, in generale, sono ripartite su 'n' gruppi in maniera che, in navigazione, con 'n-1' gruppi elettrogeni in funzione sono assicurate la piena velocità della nave e la piena funzionalità delle utenze elettriche.

In tal modo un gruppo elettrogeno è sempre in stand-by o in manutenzione.

Gli alternatori sono del tipo a poli salienti con avvolgimenti rotorici alimentati a corrente continua ed avvolgimenti statorici disposti a formare un carico trifase a stella equilibrato.

La corrente circolante nelle bobine del rotore provoca un campo magnetico costante che si concatena con le spire dello statore.

La rotazione di tale campo magnetico provoca un gradiente di flusso concatenato con le singole spire e quindi una forza elettromotrice indotta allo statore.

La corrente alternata che viene così a circolare negli avvolgimenti statorici ha una frequenza legata alla velocità di rotazione del rotore (ad ogni giro del rotore corrisponde un'oscillazione completa della corrente in ciascuna fase dei conduttori).

Tale velocità è mantenuta costante dal motore primo.

La relazione che lega queste grandezze è la seguente:

$$f = \frac{n_0 \cdot p}{60}$$

dove :

f: frequenza [Hz]

p: numero di poli dell'alternatore

$n_0$ : velocità di rotazione del rotore [giri/min].

## 1.4 POSSIBILI CONFIGURAZIONI DEI SISTEMI DI PROPULSIONE IN BASE ALLA SCELTA DEL MOTORE ELETTRICO

In tabella I sono evidenziate le caratteristiche e le applicazioni significative delle tre categorie di motori elettrici.

**Tabella I**

	Vantaggi	Svantaggi	Impiego
Motori in c.c.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versatilità</li> <li>- Elevata coppia anche a bassa velocità</li> <li>- Semplicità di regolazione e controllo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo elevato</li> <li>- Limitazione di potenza</li> <li>- Consumo delle spazzole e relativa manutenzione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 100% delle applicazioni fino agli anni '70</li> <li>- Alcune applicazioni di piccola potenza</li> <li>- Realizzazioni particolari</li> </ul>
Motori asincroni	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versatilità</li> <li>- Elevata coppia anche a basse velocità, nel caso che venga controllato con tecniche di regolazione opportune</li> <li>- Robustezza</li> <li>- Nessun contatto strisciante</li> <li>- Compattezza</li> <li>- Basso costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitazione di potenza</li> <li>- Corrente di spunto elevata ( fino a 7-8 volte la corrente nominale), in assenza di avviatore o sistemi di controllo</li> <li>- Fattore di potenza inferiore all' unità</li> <li>- Valori usuali di traferro minori di un motore sincrono di medesima taglia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hanno rimpiazzato quasi completamente il motore c.c nelle applicazioni di potenza piccola e media</li> <li>- Si prevede un impiego sempre crescente in tutti i tipi di nave</li> </ul>
Motori sincroni	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocità di rotazione agganciata alla frequenza di sincronismo con elevata coppia di reazione</li> <li>- Elevato traferro e coppia fornita, con connessione diretta motore-albero-elica</li> <li>- Corrente di spunto paragonabile a quella nominale</li> <li>- Fattore di potenza prossimo all' unità e regolabile in ogni condizione di impiego</li> <li>- Regolazione fine della velocità</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenza del circuito di eccitazione separata che richiede un'alimentazione a parte con relativo convertitore ed elettronica di controllo ( eccetto i motori a magneti permanenti )</li> <li>- Maggior onere di manutenzione ( rispetto al motore ad induzione )</li> <li>- Maggior ingombro e peso nel range di potenza medio-piccole</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Motore di propulsione per navi passeggeri di media e grossa potenza</li> <li>- Motore elettrico delle fregate statunitensi</li> <li>- Motore di propulsione per rompighiaccio di grossa potenza</li> </ul>

Tabella I : caratteristiche e applicazioni significative delle tre categorie di motori elettrici.

## **2 Azionamenti utilizzati per la propulsione diesel-elettrica**

### **2.1 Azionamenti a velocità variabile con motori in continua**

Questo sistema utilizza un motore in continua, operante nei quattro quadranti di coppia – velocità; è reversibile e consente la frenatura a recupero.

Il convertitore è costituito da un ponte a tiristori che alimenta l'armatura del motore: in tal modo si ottiene una buona risposta dinamica del sistema, poiché la corrente di armatura del motore può essere variata molto rapidamente.

La risposta dell'azionamento alle variazioni della coppia resistente dell'elica risulta quindi essere buona.

Un convertitore reversibile (costituito da un doppio ponte di tiristori) alimenta l'avvolgimento di campo, consentendo l'inversione della velocità di rotazione del motore.

La propulsione a mezzo motori in continua presenta però in ambito navale i seguenti problemi:

- la dimensione non trascurabile
- la manutenzione dei collettori
- la presenza di interruttori in continua

## 2.1.1 Pro e Contro della propulsione in continua

### Pro:

- E' un sistema comunemente testato durante gli anni in molte navi commerciali e nelle industrie;
- Un sistema AC-DC ha bisogno di minor volume e peso;
- Un sistema AC-DC non ha problemi con una temperatura dell'ambiente superiore a 55°.

### Contro:

- Un motore di propulsione DC ha le spazzole ed è perciò soggetto a manutenzione delle stesse e dei filtri;
- Con un sistema DC il fattore di potenza ( $\cos.\phi$ ) alla velocità nominale è più basso di quello di un sistema AC e si riduce a velocità più bassa, perciò devono essere installati più kVA;
- Il decremento dell'efficienza del sistema DC a bassa velocità è maggiore rispetto a quello del sistema AC;
- A causa del ponte a tiristori controllato del sistema DC, il disturbo della sinusoide è più alto se comparato con quello del sistema AC.

## 2.2 Azionamenti con motori in alternata

La regolazione della velocità dei motori elettrici di propulsione a c.a. viene effettuata mediante convertitori statici di frequenza.

La velocità di un motore sincrono, infatti, è data da:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

e quella di un motore asincrono da:

$$n = n_0 \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s)$$

Dalle due relazioni si nota che per un motore sincrono la velocità dipende dalla frequenza di alimentazione e dal numero di coppie polari, mentre per un motore asincrono dipende dalla frequenza di alimentazione, dal numero delle coppie polari e dallo scorrimento.

Lo scorrimento dipende a sua volta dalla coppia resistente e dalla tensione applicata che ne amplia però di poco il valore.

La variazione continua di velocità del motore elettrico a c.a. può essere ottenuta quindi soltanto con una variazione della frequenza statorica.

E' necessario però, abbassando la frequenza, abbassare anche la tensione applicata se si vuole evitare la saturazione del ferro. Il rapporto fra tensione applicata e frequenza deve essere mantenuto costante.

Le tecniche utilizzate per variare con continuità la frequenza di alimentazione sono quelle che utilizzano i convertitori statici.

Per convertitore statico di frequenza si intende un dispositivo atto a convertire una tensione di ampiezza e frequenza assegnate in una tensione di ampiezza e frequenza variabili.

Il termine statico significa che questa conversione avviene staticamente e cioè senza organi in movimento.

Solo lo sviluppo della tecnica costruttiva dei semiconduttori comandati (SCR, GTO, IGBT) ha consentito la realizzazione dei convertitori statici di frequenza che possono essere classificati in base alla presenza o meno di un circuito intermedio in continua.

Nel primo caso sono costituiti da raddrizzatori (c.a. – c.c.) e da invertitori (c.c. – c.a.) e si dicono indiretti; nel secondo, da veri e propri convertitori (c.a. – c.a.) e si dicono diretti.

I convertitori statici di frequenza del tipo indiretto sono denominati:

- P.W.M. (Pulse Width Modulation);
- Sincroconvertitori

Quelli diretti, invece, sono denominati:

- Cicloconvertitori.

Il numero delle coppie polari del motore elettrico sarà tale da far operare l'elica al suo regime massimo anche in considerazione della tecnica utilizzata nei convertitori statici di frequenza.

## **2.2.1 Pro e Contro della propulsione in alternata**

### **Pro:**

- Un motore di propulsione AC è di semplice costruzione ed è senza spazzole;
- Con un sistema AC il fattore di potenza ( $\cos.\phi$ ) è alto ( $>0.94$ ) e costante, anche a bassa velocità, perciò devono essere installati meno kVA;
- L'efficienza di un sistema AC a bassa velocità non si riduce tanto come nei sistemi DC;

- A causa del raddrizzatore per la conversione AC-DC, il disturbo della sinusoide è minore confrontato con il sistema AC;
- Per mezzo dell'applicazione di un sistema AC a 12 impulsi, si ha un total harmonic distortion (THD) minore del 5% ed ogni singola armonica è distorta al 3%, cosa che può essere raggiunta senza l'uso di filtri costosi. Questo è anche in parte possibile per il sistema AC-DC.

### **Contro:**

- La temperatura dell'ambiente per l'inverter (convertitore DC-AC) non può superare i 45°C. Questo può essere risolto applicando un refrigerante aria/acqua;
- Un sistema AC-AC è più voluminoso e peso;
- Il livello sonoro nel range dell'alta frequenza del motore asincrono è maggiore rispetto a quello del motore in continua.

## **2.2.2 Convertitori indiretti**

### **2.2.2.1 Generalità**

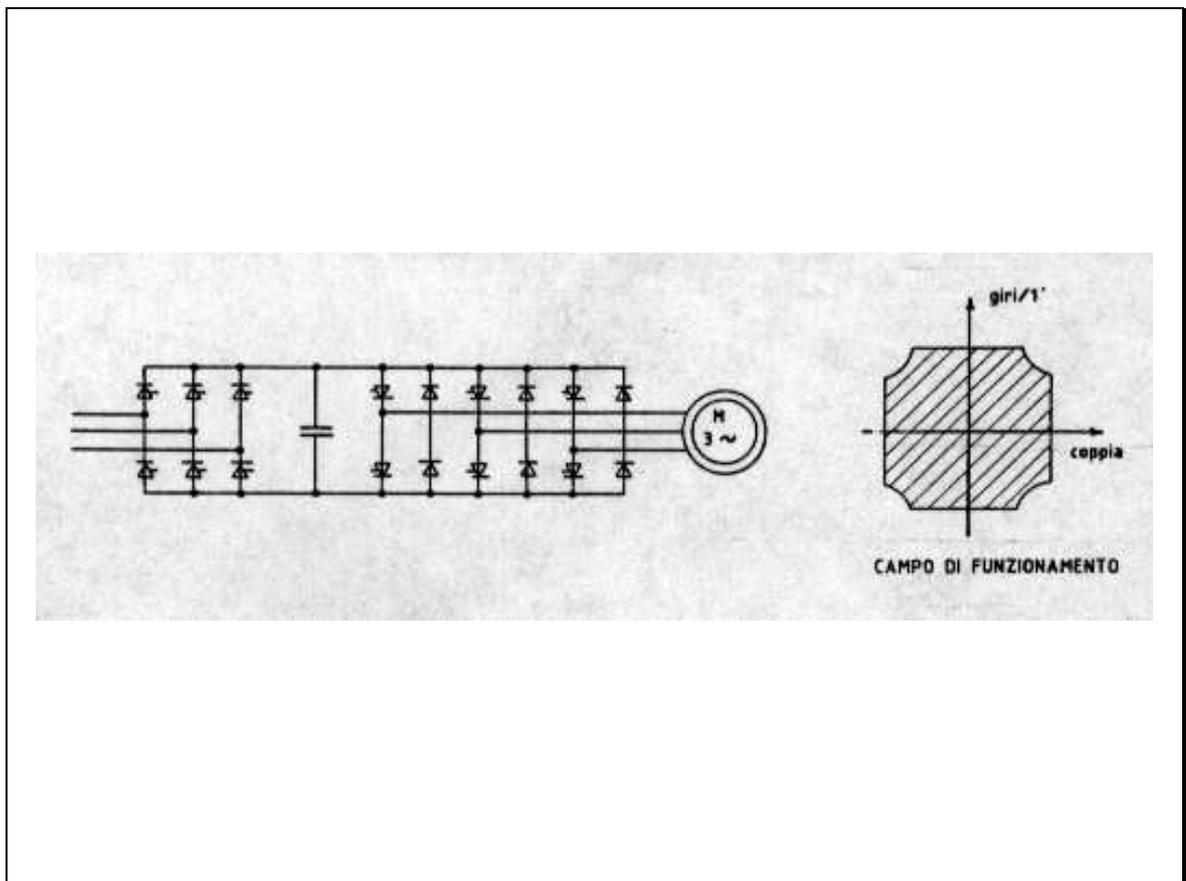
Tali convertitori producono una doppia conversione e ciò comporta uno stadio intermedio in corrente continua; essi hanno dunque in testa un raddrizzatore comandato o non, al centro uno stadio in corrente continua, e lato motore un inverter a commutazione forzata (P.W.M.) o naturale (Sincroconvertitore), a seconda che venga alimentato un motore asincrono o sincro, a tensione costante o a corrente costante.

Con tali convertitori si realizzano tre funzioni:

- variazione della frequenza;
- regolazione della tensione o della corrente;
- commutazione della corrente nell'avvolgimento del motore comandato.

## 2.2.2.2 P.W.M. (Pulse Width Modulation)

Questo sistema di regolazione richiede l'impiego di un ponte raddrizzatore c.a. – c.c., di un filtro c.c. e di un inverter c.c. – c.a., oltre ad una logica di controllo dei tiristori. Alle uscite trifase vengono presentati dei segnali impulsivi di ampiezza costante ma modulati con legge sinusoidale in modo da far circolare nel motore correnti sinusoidali a basso contenuto armonico.

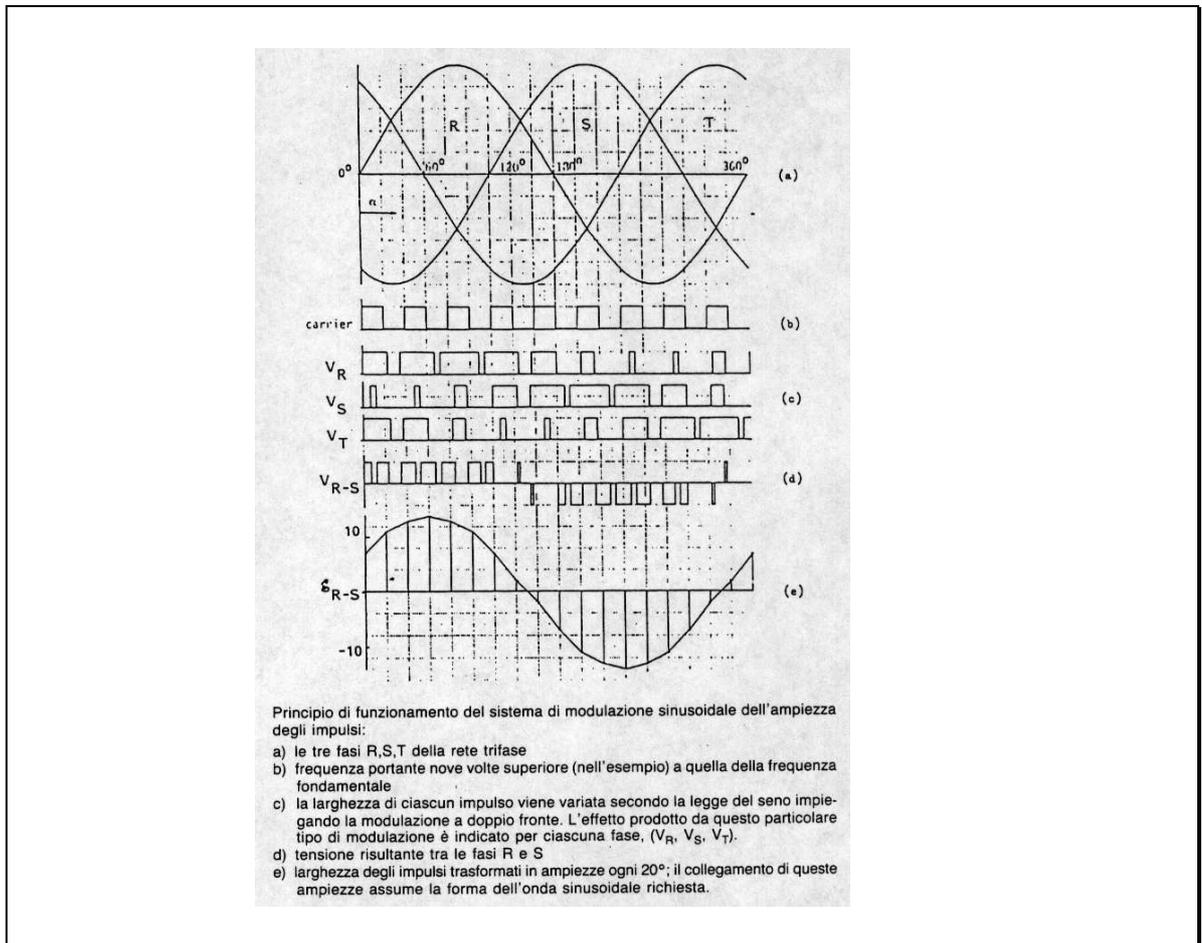


L'inverter è costituito da transistori pilotabili direttamente in accensione e spegnimento ed è pertanto il sistema che garantisce maggiore controllo a tutte le velocità, è però più complesso e richiede elevata specializzazione per la sua manutenzione.

Esso fornisce una serie di impulsi di tensione sia positivi che negativi per generare, in uscita, una forma d'onda che approssimi quella sinusoidale; variando il numero di impulsi e la loro ampiezza si modifica la frequenza.

All'aumentare della frequenza la forma d'onda tende a distorcersi.

Il principio di funzionamento viene descritto mediante i seguenti grafici



Nella fig.a vengono mostrati i segnali relativi alle tre fasi della rete.

Il segnale successivamente raddrizzato e filtrato viene presentato in ingresso all'inverter sotto forma di tensione continua.

Un sistema di controllo genera un segnale ad onde quadre detto portante (fig.b).

La portante, a sua volta, viene modulata in durata con tre segnali sinusoidali sfasati di  $120^\circ$  in modo da generare contemporaneamente tre segnali impulsivi del tipo di fig.c presentati alle uscite trifase dell'inverter.

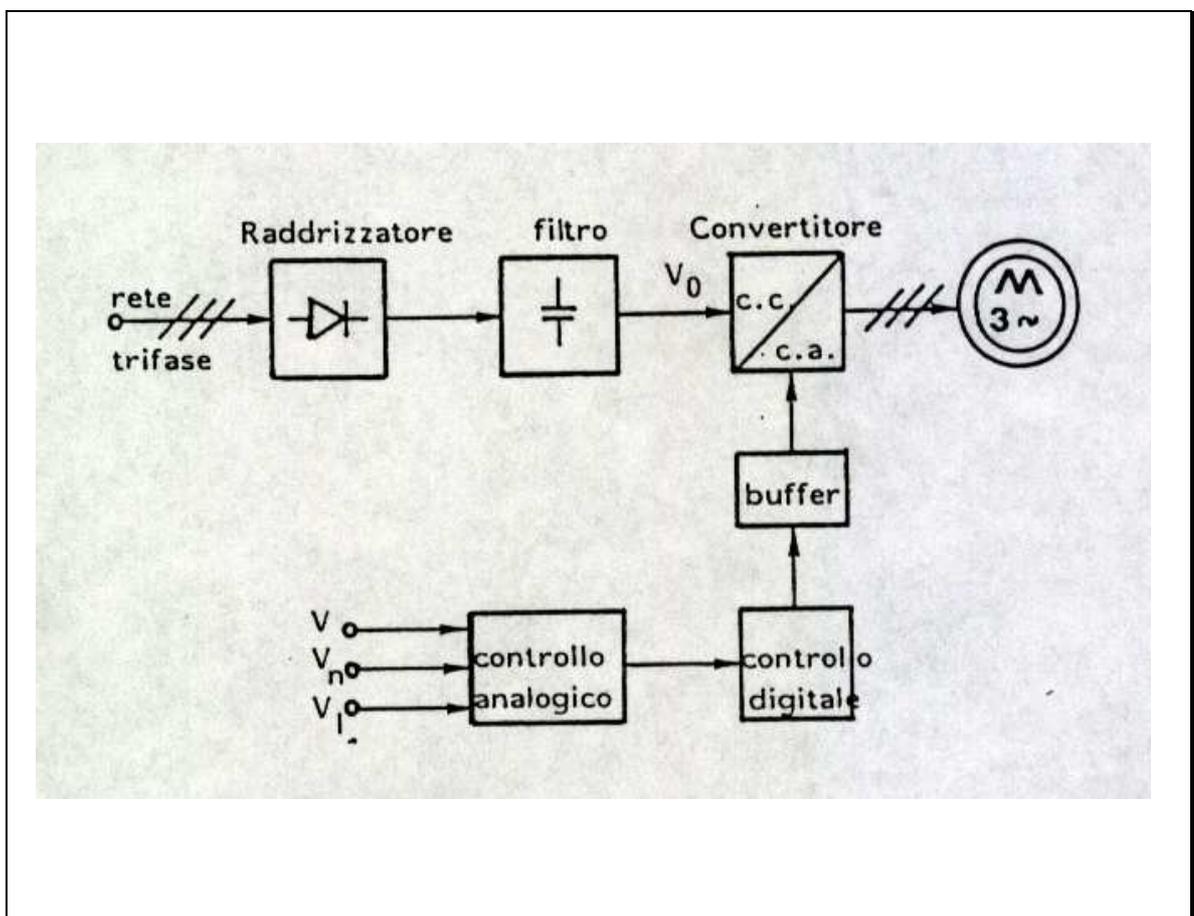
La tensione risultante tra le varie fasi è del tipo di fig.d in cui viene mostrato il segnale risultante  $V_{R-S}$  che, demodulato, origina la forma d'onda di fig.e.

Il filtraggio della tensione d'uscita viene parzialmente realizzato dall'induttanza del motore.

Per minimizzare le perdite del motore, dovute alle armoniche della portante, il rapporto tra la frequenza della portante e quella del motore viene mantenuto il più elevato possibile.

Tuttavia vi è da tener presente che l'aumento della frequenza provoca un aumento della perdita nell'inverter.

Nella prossima figura viene mostrata in maggiore dettaglio la struttura di un convertitore P.W.M. Lo schema può essere diviso in due sezioni: una di potenza e una di controllo.



La sezione di potenza è costituita da un raddrizzatore della tensione di rete, da un filtro di livellamento e da un inverter trifase.

La sezione di controllo determina le condizioni di funzionamento e genera gli opportuni segnali impulsivi che vanno a pilotare l'inverter.

C'è anche un amplificatore di impulsi che ha lo scopo di rendere i segnali impulsivi idonei a pilotare i tiristori.

Il fattore di potenza è pressoché unitario e di conseguenza il rendimento di questo sistema è notevolmente più elevato di quello che può essere realizzato da un altro tipo di sistema.

Con questo convertitore è possibile fornire al motore qualsiasi tensione regolata in valore e frequenza entro l'intervallo che va da zero ai valori massimi previsti che possono arrivare a 3 volte la velocità fissa caratteristica del motore.

Il valore e la frequenza della tensione alternata devono essere sempre regolati in modo da mantenere costante il valore del flusso per polo e di conseguenza mantenere costante la coppia nell'intero campo di variazione della velocità del motore.

Questo azionamento è adatto per normali motori asincroni con velocità intorno ai 1000 giri, di conseguenza è necessaria la presenza di un riduttore fra motore ed elica.

### **2.2.2.3 Sincroconvertitore**

Il sincroconvertitore è costituito da un trasformatore, un raddrizzatore, una reattanza di limitazione e da un inverter a commutazione naturale, in un ponte di Graets trifase, legati da uno stadio intermedio a corrente continua livellata mediante l'induttanza.

L'induttanza disaccoppia i due ponti e assicura l'indipendenza della frequenza di alimentazione del motore dalla frequenza di rete (fissa).

In questo sistema il motore sincrono opera, dal punto di vista elettromeccanico, come un motore in corrente continua, con un funzionamento possibile nei quattro quadranti di coppia – velocità.

Questo azionamento alimenta un motore sincrono, come indicato in figura:

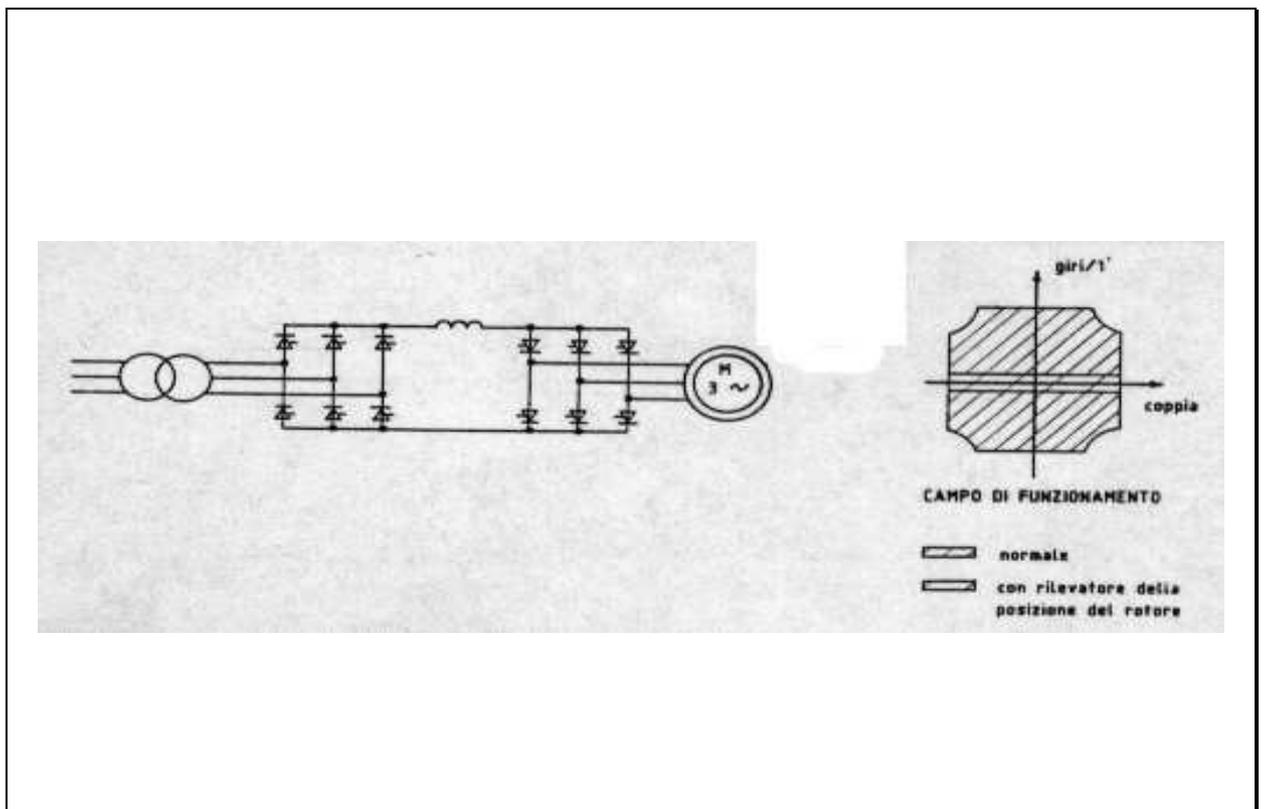


Fig. 2.1: Schema elettrico di un sincroconvertitore che alimenta un motore sincrono e campo di funzionamento del sincro

Durante il funzionamento del motore, il convertitore lato rete funziona come raddrizzatore e libera energia attiva al circuito intermedio a corrente continua.

Il convertitore lato motore sincrono è pilotato da questa e funziona come convertitore assistito: fornisce una tensione continua antagonista.

Esso prende la corrente continua e la commuta periodicamente da una fase del motore ad un'altra: è un commutatore di corrente che produce corrente trifase a frequenza variabile, di forma rettangolare e di durata pari a  $120^\circ$ , per fornire la coppia al motore.

La commutazione dell'inverter è assicurata dalla tensione ai bordi della macchina sincrona sovraeccitata in maniera da fornire l'energia reattiva necessaria alla commutazione.

I sincroconvertitori sono economici per qualsiasi potenza purché venga conservata la commutazione naturale.

La funzione del sincroconvertitore è di prelevare potenza, a tensione e frequenza costanti, dalla rete di alimentazione e di convertirla in potenza a tensione e frequenza variabili, allo scopo di regolare la velocità di rotazione del motore, che è funzione della frequenza con la quale viene alimentato.

Questa conversione viene effettuata dai due convertitori statici SRN e SRM, che regolano le grandezze in gioco, in modo che siano verificate le seguenti condizioni:

- $f_m$  = variabile da 0 alla frequenza nominale
- $\frac{V_m}{f_m} = \text{cost.}$ , dove  $V_m$  = tensione del motore e  $f_m$  = frequenza del motore

Il convertitore SRN è collegato tramite il trasformatore alle rete, la quale provvede a far commutare i tiristori.

Il convertitore SRM è collegato alla macchina e viene commutato dalla stessa.

In base a quanto sopra esposto, risulta evidente che i convertitori sono a commutazione naturale.

La potenza reattiva per la regolazione e la commutazione è fornita dalla rete per il convertitore SRN e dalla macchina per il convertitore SRM.

Per questo la macchina sincrona deve essere in sovraeccitazione: di conseguenza la commutazione con la tensione di macchina è possibile solo con le macchine sincrone.

In questo caso non è necessario prevedere apparecchiature per la commutazione forzata, di caratteristiche complesse, come richiesto per i motori asincroni a gabbia.

Quando la macchina sincrona funziona come motore, il convertitore lato rete SRN funziona come da raddrizzatore ed il convertitore lato macchina SRM da inverter, generando le tensioni continue  $V_{d1}$  e  $V_{d2}$ .

Un regolatore di corrente regola la tensione continua  $V_{d1}$  ad un valore maggiore di quello di  $V_{d2}$  (che è proporzionale alla velocità di rotazione ed all'eccitazione del motore sincrono) e la differenza  $V_{d1} - V_{d2}$  fa circolare la corrente richiesta, tramite la reattanza di smorzamento  $L$ , nello statore del motore sincrono.

I tiristori del convertitore fanno circolare ciclicamente corrente in due fasi dello statore.

Questo fatto crea un campo rotante passo-passo che ha la direzione e la frequenza desiderate.

Per quanto visto sopra, il funzionamento del convertitore SRM può essere assimilato a quello di un collettore di una macchina a corrente continua ed il sincrono ad un motore a corrente continua con le funzioni invertite tra statore e rotore.

Non è possibile la perdita di sincronismo, in quanto la commutazione del campo rotante dipende dalle tensioni della macchina.

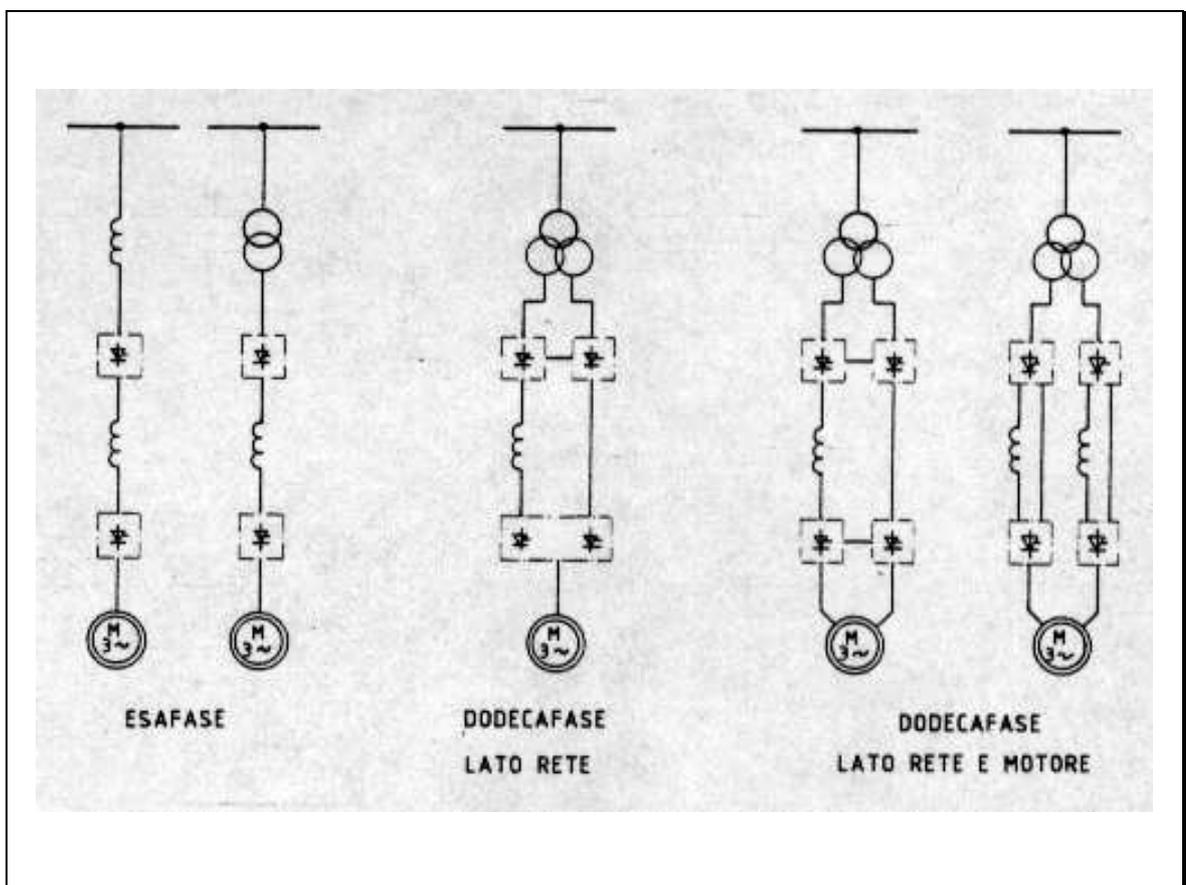
E' possibile invertire il funzionamento della macchina sincrona: il convertitore lato macchina SRM funziona in questo caso da raddrizzatore e quello lato rete SRN da inverter. L'energia cinetica della macchina sincrona si converte in energia elettrica e viene inviata in rete. Si può così invertire il flusso di energia, passando dal funzionamento come motore a quello come generatore, senza bisogno di alcuna operazione di commutazione, in quanto è sufficiente variare l'angolo di accensione del convertitore lato macchina, facendolo passare da inverter a raddrizzatore.

Le tensioni continue  $V_{d1}$  e  $V_{d2}$  cambieranno di segno e anche qui si potrà agire sulla corrente variando  $V_{d1}$ .

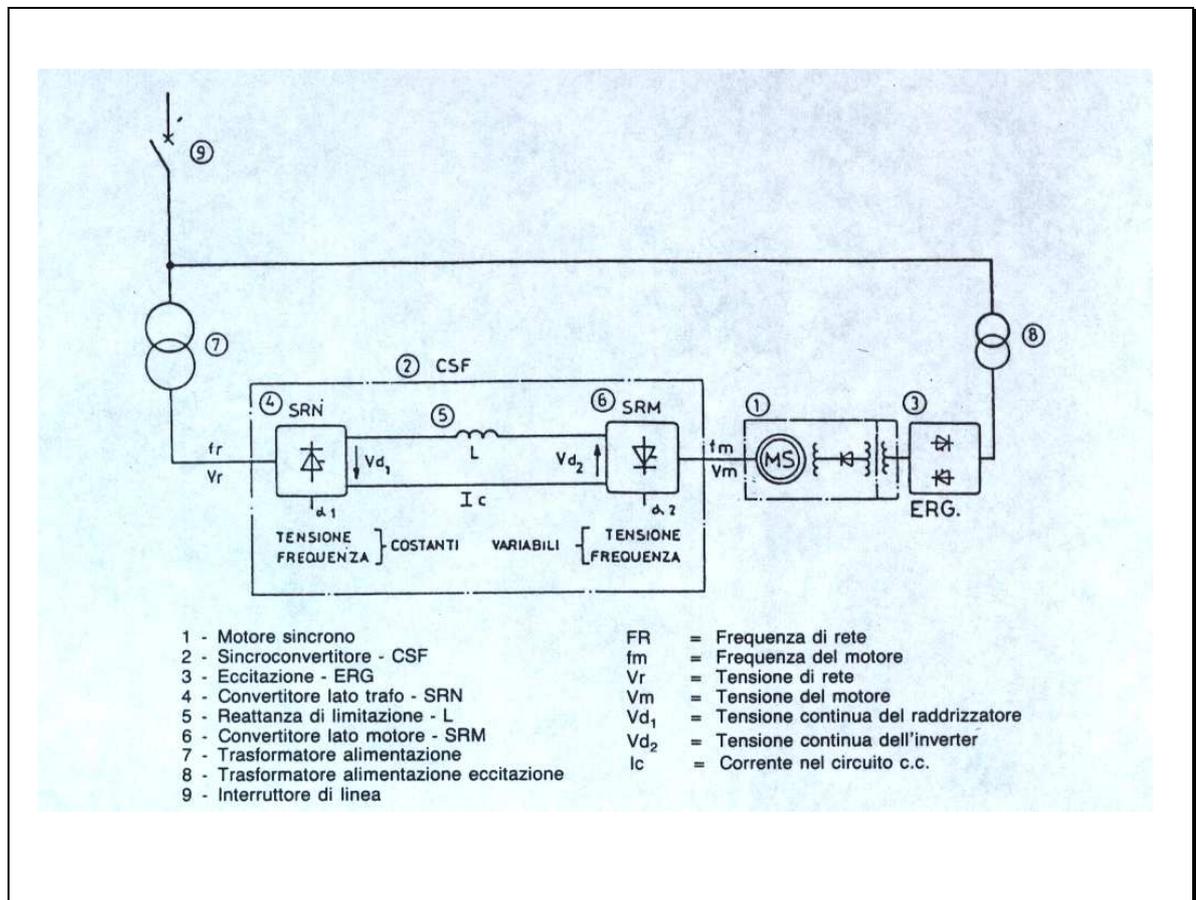
Il sincroconvertitore presenta un funzionamento critico attorno alla velocità 0 e pulsazioni di coppia con frequenza sei volte la propria di funzionamento.

Il sincroconvertitore può essere realizzato a seconda delle esigenze di installazione in esecuzione esafase, dodecafase lato rete o dodecafase lato rete e motore.

Nella esecuzione esafase è possibile collegare il sincroconvertitore alla rete mediante le reattanze di disaccoppiamento.



Come indicato nel seguente schema di principio, il sincroconvertitore ha due anelli di regolazione, di cui uno agisce sul convertitore lato rete e l'altro sull'eccitatrice del motore sincrono.



La configurazione del sistema di regolazione è molto simile a quella usata per gli azionamenti a corrente continua.

L'anello che agisce sul convertitore lato rete è costituito da un regolatore di velocità che pilota un regolatore di corrente in modo da poter controllare la corrente nel circuito a corrente continua.

Il convertitore lato rete alimenta, mediante quello lato motore, il sincrono, erogando una corrente funzione della coppia richiesta e della velocità impostata.

Il convertitore lato motore è pilotato dalla tensione del motore stesso.

Il limitatore di corrente mantiene la stessa entro i valori prefissati.

Il secondo anello di regolazione regola la tensione del sincro mediante un regolatore di corrente che pilota l'eccitatrice del sincro stesso.

Il segnale di velocità effettiva del motore, elaborato da un opportuno generatore di funzione, costituisce il riferimento del regolatore di tensione.

Il fattore di potenza a pieno carico è prossimo a 0.84 ma scende a 0.4 quando la potenza si dimezza.

L'efficienza globale di questo sistema (comprendente generatore, convertitore statico, trasformatore, motore) raggiunge il 92 ÷ 93 % .

E' utilizzabile per potenze fino a 30 MW.

## **2.2.3 Convertitori diretti**

### **2.2.3.1 Generalità**

Questi convertitori trasformano direttamente la tensione di rete in una tensione o in una corrente d'ampiezza e di frequenza variabili.

Essi sono generalmente a commutazione naturale e vengono denominati cicloconvertitori.

Questi dispositivi, se commutati dalla rete, hanno una frequenza di uscita  $f_u$  inferiore a quella di entrata  $f_a$  (generalmente  $f_u \leq \frac{f_a}{3}$ ) e sono adatti per alimentare motori sincroni ed asincroni.

Il principale vantaggio di questo sistema è un funzionamento più corretto e lineare alle velocità di rotazione molto basse.

I principali svantaggi sono una maggiore complessità circuitale e soprattutto il fatto che le frequenze delle armoniche generate variano secondo il regime di rotazione del motore, rendendo praticamente impossibile un efficace filtraggio delle stesse.

## 2.2.3.2 Cicloconvertitore

Il cicloconvertitore, a differenza delle altre tecniche, converte direttamente la frequenza della tensione di rete in una tensione o corrente a frequenza più bassa.

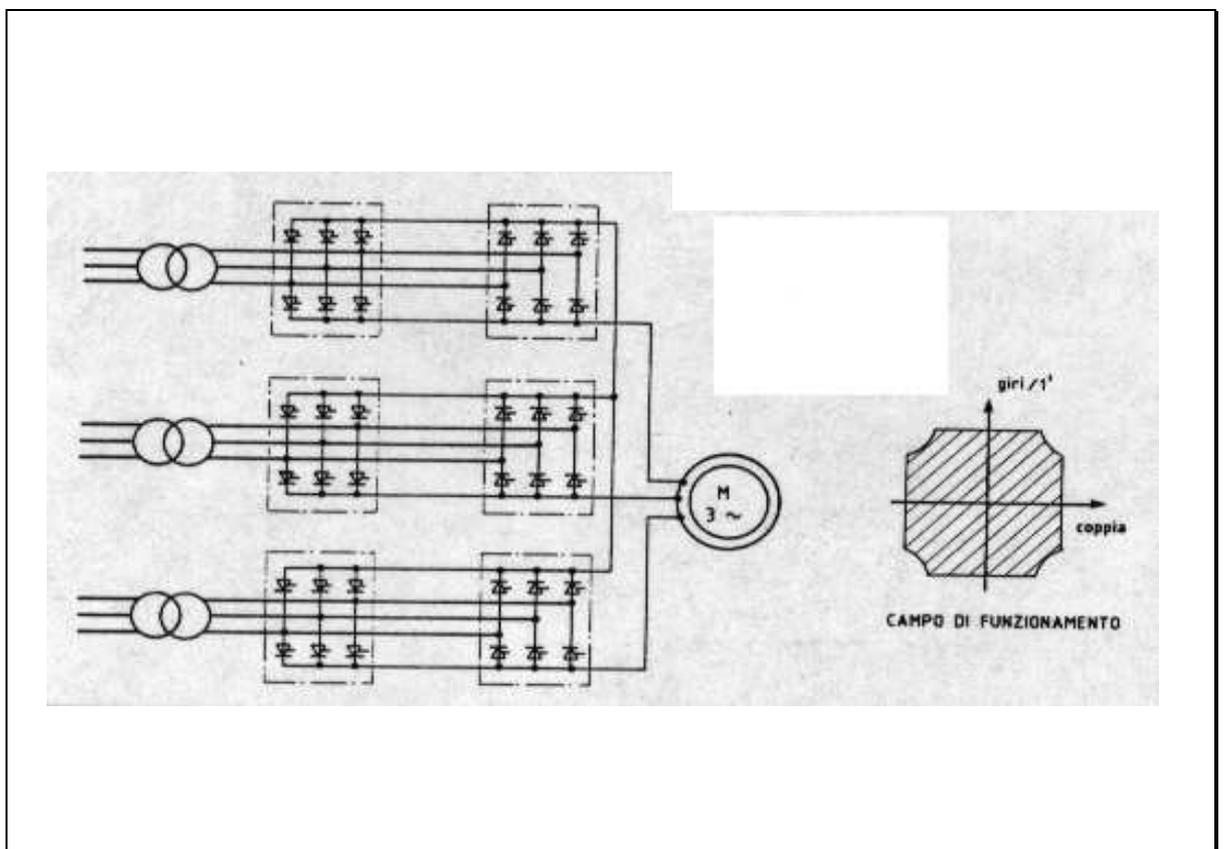
La seguente figura mostra lo schema di un cicloconvertitore costituito da sei gruppi di raddrizzatori a tiristori. Tre gruppi vengono indicati come <<positivi>> e i rimanenti tre come <<negativi>>.

La funzione dei gruppi positivi è di far circolare corrente quando in uscita è presente la semionda positiva della tensione, mentre i gruppi negativi fanno circolare corrente nei casi di tensione di uscita negativa.

Il principio su cui opera questa tecnica è indicato nella prossima figura, in cui si mette in evidenza la riduzione a  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$  della frequenza di rete per una sola fase.

Riferendoci ad una sola fase si tratta di comandare, in frequenza e per un tempo stabilito, dapprima l'innesco dei tiristori <<positivi>> e successivamente di quelli <<negativi>>.

La frequenza di uscita è determinata dal tempo in cui sono in conduzione i gruppi positivi e negativi.

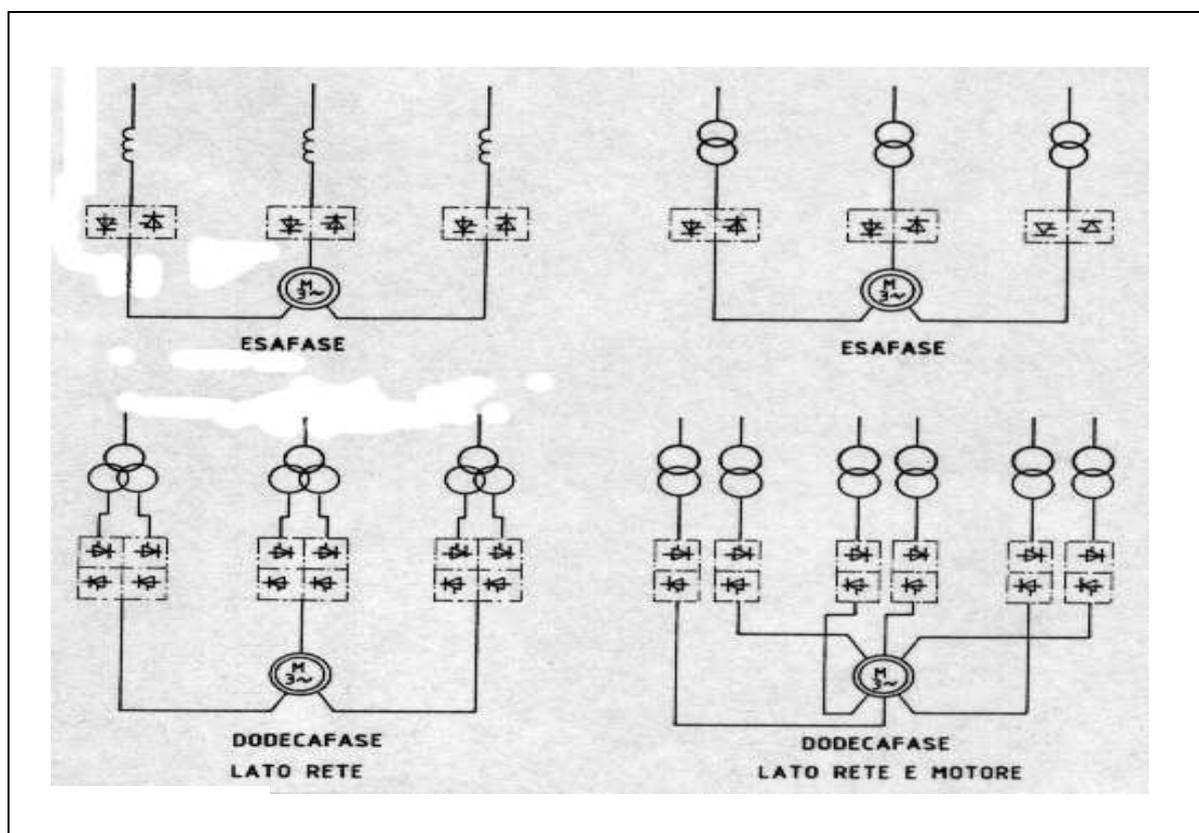


Esso può funzionare indifferentemente da motore o da generatore nei due sensi di rotazione. Il cicloconvertitore funziona regolarmente da 0 alla velocità nominale e presenta pulsazioni di coppia praticamente trascurabili.

Per tale motivo questo azionamento ha praticamente le stesse caratteristiche di un azionamento con motore a corrente continua, ma col vantaggio di poter utilizzare un motore avente una gamma di potenza più estesa e di costruzione più semplice.

Il cicloconvertitore può essere realizzato, secondo le esigenze di installazione, in esecuzione esafase, dodecafase lato rete e dodecafase lato rete e motore.

Nella esecuzione esafase è possibile collegare il cicloconvertitore alla rete mediante le reattanze di disaccoppiamento.



L'efficienza del sistema costituito da cicloconvertitore e motore sincrono è del 96% con un fattore di potenza dello 0.75 con la potenza di propulsione che varia tra il 50% ed il 100%. Il contenuto armonico generato è legato al numero di fasi del cicloconvertitore (esafase o dodecafase) e per frequenze superiori ai 20 Hz la forma d'onda risulta troppo distorta: per questo motivo tale convertitore si usa per basse velocità di rotazione (cioè per frequenze ridotte) con accoppiamento diretto dell'elica al MEP.

Sotto i 20 Hz genera onde di forma molto prossima a quella sinusoidale con conseguenti pulsazioni di coppia molto ridotte in uscita dal MEP.

Nel caso del cicloconvertitore le armoniche non sono filtrate perché lato linea non vi è la presenza del raddrizzatore, come nel caso di sincroconvertitore e PWM, quindi si ha distorsione della corrente di linea che causa problemi all'alimentazione degli ausiliari e del sistema di illuminazione.

Questi utilizzatori vengono perciò alimentati da un alternatore mosso da un motore elettrico attaccato alla linea: l'inerzia del sistema filtra il contenuto armonico e fornisce corrente non distorta.

Essendo alimentato dalla linea, consente di fornire al motore valori di coppia elevati fin dallo spunto ed è per questo adottato nel caso di navi rompighiaccio o navi DP (Dynamic Positioning). E' utilizzabile per potenze fino a 30 MW.

## **Volendo schematizzare il sistema di propulsione ottimo per i vari tipi di mezzi navali:**

	Motori in c.c.	Sincroconvertitore	Cicloconvertitore	Inverter PWM + motore asincrono
Rompighiaccio	*		***	
Navi da crociera		***	***	
Navi per studi	*	*	*	*
Navi a posiz. dinamico	**			***
Traghetti		**	**	**
Cargo		*	*	
Rimorchiatori	**			***
Sommergibili	***			
Vaporetta				***

\*\*\* = molto adatto

\*\* = adatto

\* = abbastanza adatto

**In conclusione in tabella II sono riportate le caratteristiche e le prestazioni delle differenti tipologie dei sistemi di conversione.**

**Tabella II**

	Vantaggi	Svantaggi
Cicloconvertitore	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ottimo controllo di velocità, anche a basse velocità</li> <li>- Coppia fornita più elevata rispetto al sincro e con profilo più regolare</li> <li>- Basso ripple di coppia e vibrazioni ridotte</li> <li>- Tensione in uscita dal ciclo presso pressoché sinusoidale</li> <li>- Ripartizione della potenza globale di propulsione su 3 o più rami di conversione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elettronica di controllo più complicata di quella del sincroconvertitore</li> <li>- Ingombro e peso superiori a quelli del sincro</li> <li>- Numero di dispositivi di commutazione superiori a quello del sincro ( 50 % in più )</li> <li>- Contenuto armonico più esteso anche se di minore entità ( subarmoniche di intermodulazione ) di quello del sincro</li> <li>- Elevata richiesta di potenza reattiva</li> <li>- Frequenza massima di uscita limitata ad 1/3 della frequenza di ingresso</li> </ul>
Sincroconvertitore	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Completa separazione tra lato rete e lato motore con l' induttanza di spianamento</li> <li>- Fattore di potenza abbastanza elevato, attorno a 0.85</li> <li>- Ridotto numero di tiristori lato rete</li> <li>- Elettronica di regolazione e regolazione più semplice</li> <li>- Spettro armonico limitato alle armoniche caratteristiche del convertitore. L' effetto sui generatori lato rete è un ammontare delle perdite di circa il 25 % inferiore</li> <li>- Nessuna limitazione teorica della frequenza di uscita in rapporto a quella di ingresso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peso ed ingombro dell' induttanza di spianamento del DC link</li> <li>- La corrente d' uscita ha forma d' onda ad andamento praticamente rettangolare e la tensione ai morsetti del motore risulta discontinua: la coppia all' albero ha perciò forti variazioni intorno al suo valore medio ed il motore presenta irregolarità del moto</li> <li>- Difficile regolazione della coppia soprattutto a basso numero di giri e all' avviamento</li> </ul>
Inverter PWM + motore asincrono	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fattore di potenza lato rete vicino all' unità, con grossi benefici nel dimensionamento dei generatori, dei trasformatori e dei cavi</li> <li>- Elevata controllabilità della forma d'onda di tensione applicata al motore che consente di regolare efficacemente coppia e velocità dello stesso. La forma d' onda di uscita migliora ulteriormente nel caso in cui vengano utilizzate configurazioni modulari</li> <li>- Basso inquinamento armonico della rete, al contrario dei convertitori a commutazione naturale</li> <li>- Possibilità di limitare a valori molto bassi la corrente assorbita dal motore nella partenza da fermo, tipicamente pari a 5-8 volte quella nominale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo leggermente superiore ai convertitori convenzionali a commutazione naturale</li> <li>- Limitazione di taglia nella scelta degli IGBT ( o GTO )</li> <li>- Limitazione della frequenza di uscita in rapporto alla frequenza di commutazione scelta per i componenti ( IGBT o GTO )</li> </ul>

## **2.3 Motori elettrici di propulsione (MEP) a c.a.**

### **2.3.1 Generalità**

I MEP vengono spesso alimentati dalla rete di bordo tramite trasformatori innalzatori e sempre controllati da convertitori.

In passato si utilizzavano motori a corrente continua regolati col sistema Ward Leonard che permetteva, agendo sulla corrente di eccitazione, variazioni di velocità molto precise. Queste macchine sono state abbandonate perché col crescere della potenza le loro dimensioni ed i loro pesi sono aumentati in maniera eccessiva e perché richiedono una manutenzione molto frequente.

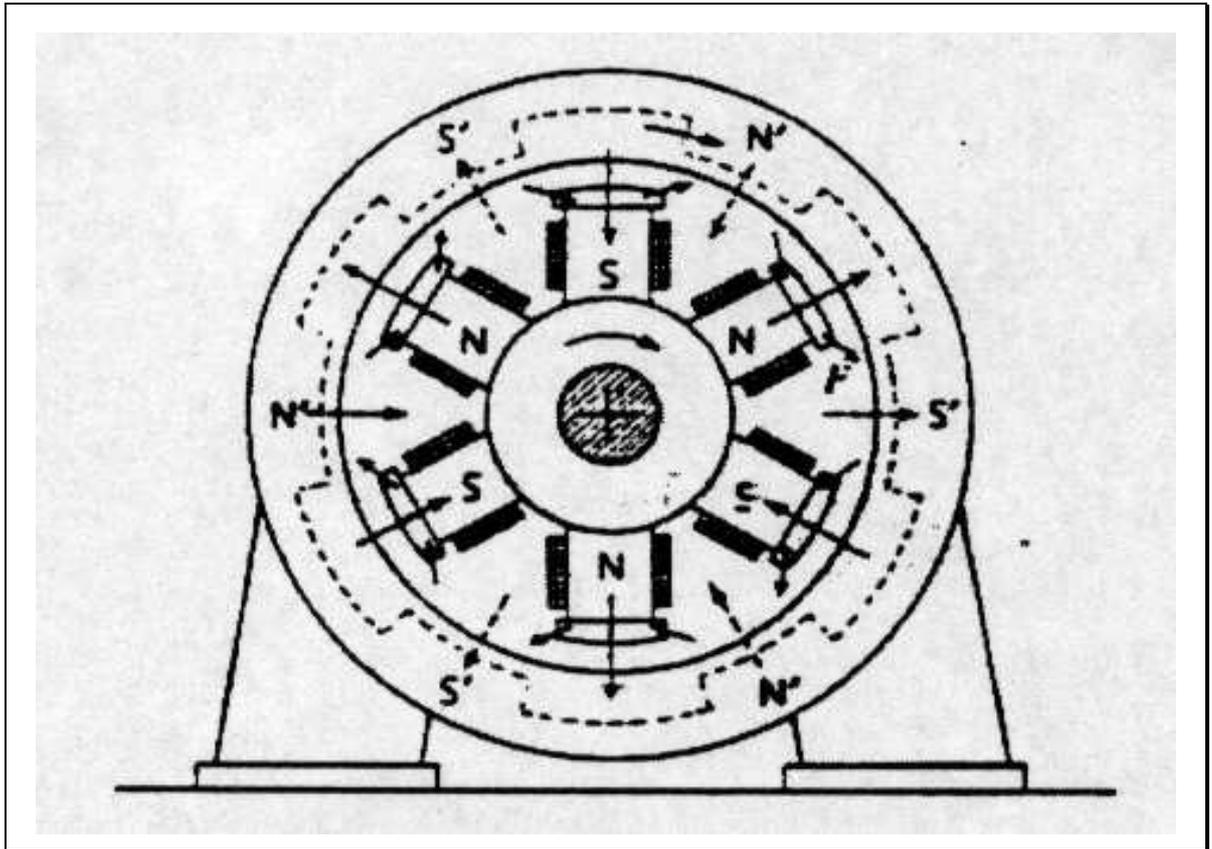
L'utilizzo della corrente alternata permette di ridurre notevolmente i pesi delle macchine e visto che i motori attuali, a volte, inglobano nella carcassa i convertitori, si ottiene un impianto molto compatto che necessita di manutenzione ridotta.

Tramite i convertitori si modifica, a monte dei MEP, la frequenza di alimentazione e quindi la velocità di rotazione dei motori stessi.

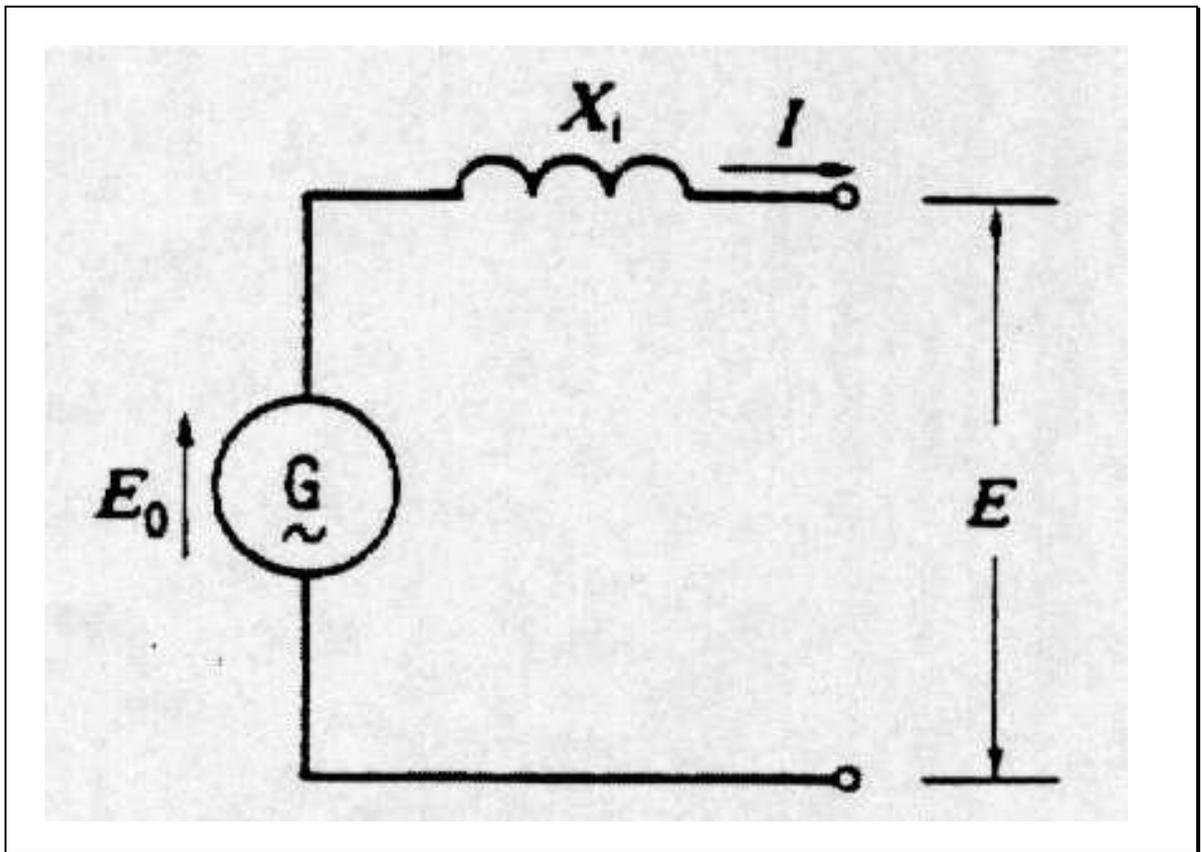
I motori elettrici di propulsione a c.a., in relazione alle potenze installate, sono motori sincroni e motori asincroni, entrambi trifasi.

#### **2.3.1.1 Motore sincro**

Il motore sincro è analogo ad un alternatore, con la differenza che le spire dello statore vengono alimentate con un sistema di tre generatori di corrente alternata disposti a stella: il campo magnetico rotante che si forma in questo modo allo statore interagisce con quello rotorico generando così una coppia motrice.



Il circuito equivalente di una macchina sincrona, relativo ad una sola fase, è costituito da un'induttanza, detta reattanza di reazione ( $X_i$ ), in serie ad un generatore ideale che eroghi la tensione a vuoto ( $E_0$ ) di alimentazione. La reattanza di reazione rappresenta la caduta di tensione che si verifica nel funzionamento a carico a causa della reazione di indotto.



La velocità dei motori sincroni è sempre  $f = \frac{n_0 \cdot p}{60}$  e la coppia motrice è

$$C = k_1 \cdot \Phi_s \cdot \Phi_r \cdot \sin \varphi$$

Dove:

$k_1$  è una costante,  $\Phi_s$  e  $\Phi_r$  sono i flussi statorico e rotorico, e  $\varphi$  è lo sfasamento fra i vettori  $\Phi_s$  e  $\Phi_r$ .

La variazione di velocità di un motore sincrono può avvenire:

- in maniera discontinua, variando il numero delle coppie polari;
- in maniera continua, variando continuamente la frequenza.

Il motore sincrono non è autoavviante, pertanto sia per l'avviamento sia per l'inversione di marcia bisognerà farlo funzionare come asincrono.

Il motore sincrono può lavorare con fattore di potenza unitario, facendo così diminuire la potenza effettiva sull'asse, con risparmio nell'installazione e nell'esercizio dell'impianto.

Per quanto concerne la regolazione della velocità in maniera continua, essa viene ottenuta introducendo i convertitori statici di frequenza.

### 2.3.1.2 Motore asincrono

Il motore asincrono non ha avvolgimenti rotorici alimentati da corrente continua bensì un sistema di spire disposte a formare un carico trifase a stella equilibrato.

Il campo magnetico rotante generato allo statore, come nel caso della macchina sincrona, si concatena con le spire rotoriche e la variazione di questo flusso crea una forza elettromotrice indotta nelle spire stesse che, a sua volta, genera un sistema di forze nei conduttori: tali forze si oppongono alla causa che le ha generate e cioè alle correnti rotoriche.

La differenza sostanziale di funzionamento, dunque, del motore asincrono rispetto a quello sincrono sta nel fatto che, mentre il rotore di quest'ultimo tende a seguire il campo rotante, ruotando con esso in sincronismo, nel motore asincrono il rotore non ruota in sincronismo ma assume un valore 'n' tanto minore di 'n<sub>0</sub>' quanto più grande è la coppia resistente.

Si definisce scorrimento (s) la variazione relativa di velocità del rotore rispetto al campo rotante statorico:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

e quindi:

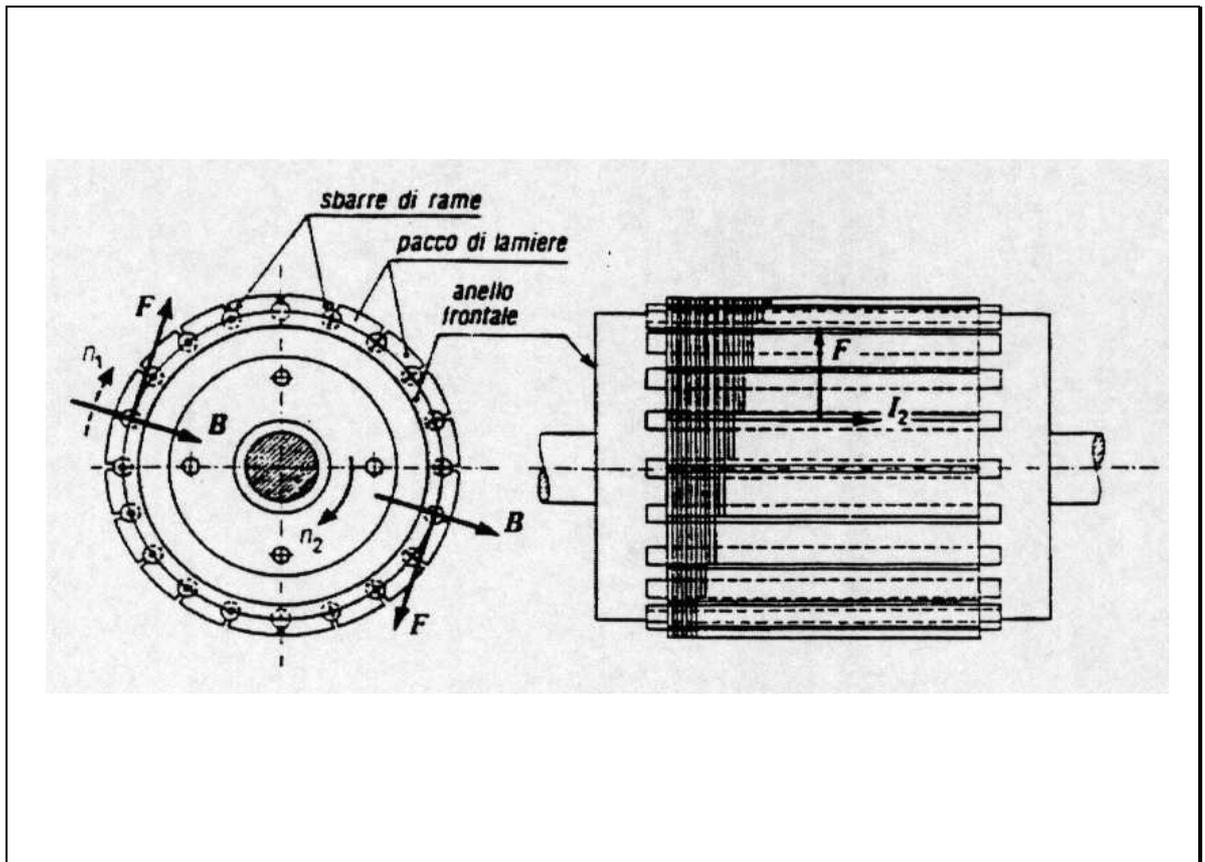
$$n = n_0 \cdot (1 - s)$$

Nella realtà lo scorrimento è piccolo e quindi la velocità di rotazione del motore n non si scosta molto da quella di sincronismo n<sub>0</sub>.

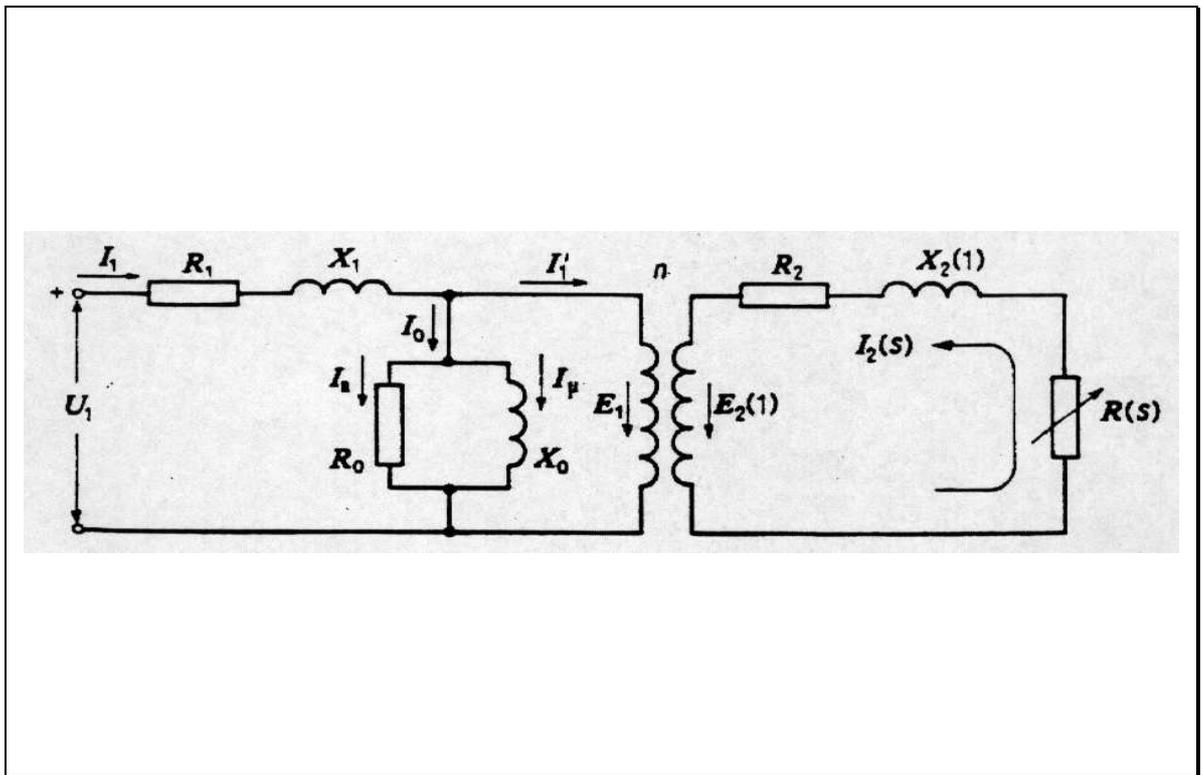
Il difetto maggiore del motore asincrono è quello di avere un fattore di potenza inferiore ad 1.

L'inversione del campo rotante e quindi del senso di marcia del motore asincrono trifase, a rotore fermo, viene ottenuta invertendo due delle tre fasi di alimentazione mediante TRIAC e quindi staticamente.

Esistono due tipi di motori asincroni usati in campo navale: il motore ad anelli e quello a gabbia. La differenza consiste nella disposizione delle bobine: nel motore ad anelli le bobine sono disposte trasversalmente e bloccate da longitudinali saldati alla superficie delle bobine stesse, mentre nel motore a gabbia le bobine sono disposte longitudinalmente e cortocircuitate alle estremità da due anelli trasversali.



Il funzionamento del motore asincrono è rappresentato dal suo circuito equivalente.



Con riferimento ad una singola fase statorica e rotorica del motore, il circuito è caratterizzato dalla presenza delle resistenze ohmiche  $R_1$  e  $R_2$  degli avvolgimenti, delle induttanze  $X_1$  e  $X_2$  che tengono conto del flusso disperso rispettivamente allo statore e al rotore, dell'induttanza  $X_0$  che tiene conto della corrente magnetizzante, della resistenza  $R_0$  che tiene conto delle perdite nel ferro ed infine della resistenza  $R(s)$  del carico.

Nonostante il motore sincrono abbia rendimento più elevato, necessita di un circuito di eccitazione esterna che alimenti il rotore. Questo comporta aumento di peso e maggiore complessità costruttiva e perciò per certi aspetti è più conveniente il motore asincrono.

## **3 Vantaggi della propulsione elettrica**

La P.E. consente di:

- ridurre le dimensioni del locale apparato motore
- diminuire la potenza installata
- diminuire i costi di esercizio e manutenzione
- ridurre il livello vibratorio trasmesso alle strutture e in mare
- accrescere la flessibilità di manovra
- aumentare la disponibilità e la sicurezza delle apparecchiature.

Si esaminano nel seguito i singoli punti.

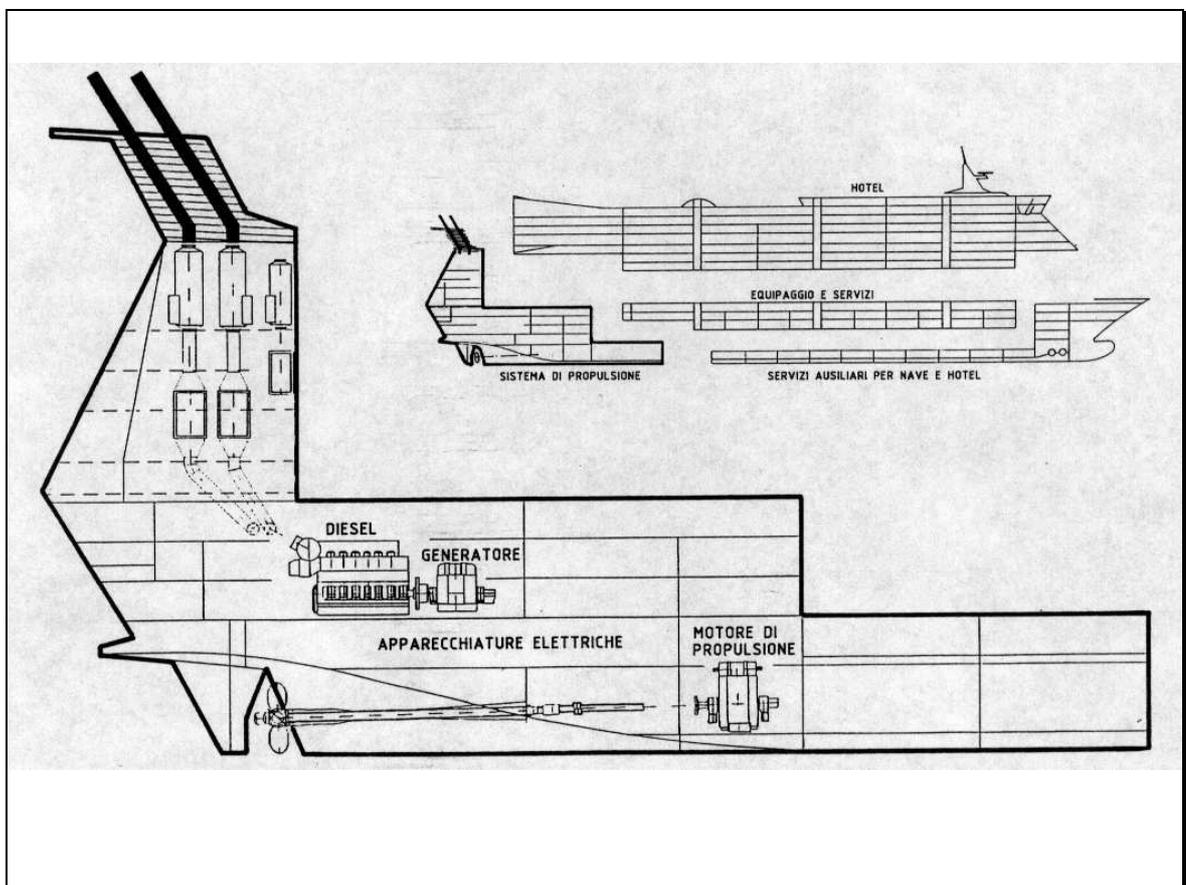
### **3.1 Riduzione delle dimensioni del locale apparato motore**

Nella soluzione diesel-elettrica non sono più le sale macchina che determinano la disposizione generale della nave. Tale disposizione viene invece determinata da altre esigenze, in modo particolare dalla ottimizzazione della sistemazione delle cabine, del flusso dei passeggeri e delle aree dei servizi.

- La lunghezza delle linee d'assi viene notevolmente ridotta in quanto le dimensioni contenute del MEP consentono di collocarlo ad estrema poppa.
- La posizione dei gruppi elettrogeni è libera da vincoli meccanici: il collegamento tra i generatori elettrici ed i MEP avviene per mezzo di cavi elettrici senza la necessità di avere una connessione meccanica che obbligherebbe a porre tali macchine sullo stesso asse del motore di propulsione. Ciò consente di ottimizzare gli ingombri della sala macchine a vantaggio degli altri locali della nave. Si possono infatti porre i gruppi elettrogeni sui ponti superiori, sopra il locale MEP, con il vantaggio di poterli collocare verso poppa assieme agli ausiliari ed alle condotte dei gas di scarico, liberando così la parte centrale dello scafo da adibire al trasporto di carico pagante (merci o passeggeri).

- Non vi è la necessità di installare un riduttore: il MEP, unito al convertitore, consente un'ottima regolazione della velocità di rotazione ed il collegamento con l'elica è diretto.
- Le dimensioni dei motori elettrici in corrente alternata sono contenute.

Questi aspetti si traducono in elevata densità di potenza in dimensioni ridotte, caratteristiche che rendono la propulsione Diesel-elettrica ideale per essere adottata su catamarani, SWATH (Small Waterplane Twin Hulls) ed in generale su tutte le imbarcazioni che hanno a disposizione spazi limitati da adibire a locale apparato motore.



## **3.2 Diminuzione della potenza installata**

- Il sistema di potenza può essere ridotto di qualche motore rispetto al caso di propulsione meccanica in cui la potenza viene fornita sia dai motori Diesel di propulsione che dagli elettrogeni. Nel caso di propulsione Diesel-elettrica la potenza è fornita solo dagli elettrogeni. Combinando così la potenza destinata alla propulsione con quella per gli ausiliari e i servizi di bordo, è più facile adattare la potenza fornita a quella richiesta, con un risparmio di potenza installata fino al 15%.

## **3.3 Diminuzione dei costi di esercizio e manutenzione**

- I Diesel generatori ruotano a velocità costante (le variazioni di velocità si attuano mediante il convertitore, a valle del Diesel).
- Il frazionamento su più motori primi della potenza da generare consente l'impiego di questi ultimi sempre in condizioni di massimo rendimento (si utilizzano solo quelli necessari a garantire la potenza richiesta e si fanno funzionare a pieno carico) a qualsiasi velocità richiesta.
- Adottando motori primi medio-veloci, quindi di dimensioni contenute, si ottiene maggiore facilità nelle riparazioni e nella movimentazione degli stessi e dei pezzi di ricambio, oltre ad un costo inferiore delle macchine.

Queste caratteristiche di modularità dell'impianto di generazione dell'energia consentono una gestione più efficiente della nave, dal momento che in molti casi le maggiori perdite nella trasmissione della potenza dovute alla presenza di una doppia conversione di energia, da meccanica ad elettrica e poi da elettrica a meccanica, possono essere compensate o addirittura superate dal miglior accordo tra la potenza generata e quella richiesta.

Inoltre ho una diminuzione dei costi di manutenzione dei motori Diesel ed emissioni ridotte di ossido d'azoto; le macchine elettriche a corrente alternata necessitano di manutenzione minima.

## **3.4 Riduzione del livello vibratorio trasmesso alle strutture**

Le moderne navi da crociera e i megayacht sono destinati ad una utenza molto esigente e pertanto devono corrispondere ad alti standard di comfort, soprattutto per quanto riguarda il rumore, la climatizzazione e le vibrazioni. La P.E. ha i seguenti vantaggi a riguardo:

- Lo spettro di frequenza è ridotto in ampiezza grazie alla velocità di rotazione costante dei Diesel.
- Lo spettro di frequenza è maggiormente concentrato grazie all'assenza delle lunghe linee d'assi e dei riduttori.
- Si possono adottare supporti elastici per ridurre il trasferimento delle vibrazioni dai motori primi alle strutture (navi militari e da crociera).
- Il motore elettrico ha un funzionamento quasi esente da vibrazioni.

La propulsione diesel-elettrica permette di raggiungere livelli di rumore e vibrazioni molto contenute, in quanto i trasformatori ed i convertitori sono componenti statici ed i gruppi diesel-generatori possono dare convenienti prestazioni se ben progettati e ben bilanciati. Inoltre i gruppi diesel-alternatori vengono montati in appositi ambienti che hanno il compito di filtrare il rumore strutturale indotto alla struttura della nave. Per contenere il rumore aereo, tali gruppi vengono isolati acusticamente dagli ambienti adiacenti.

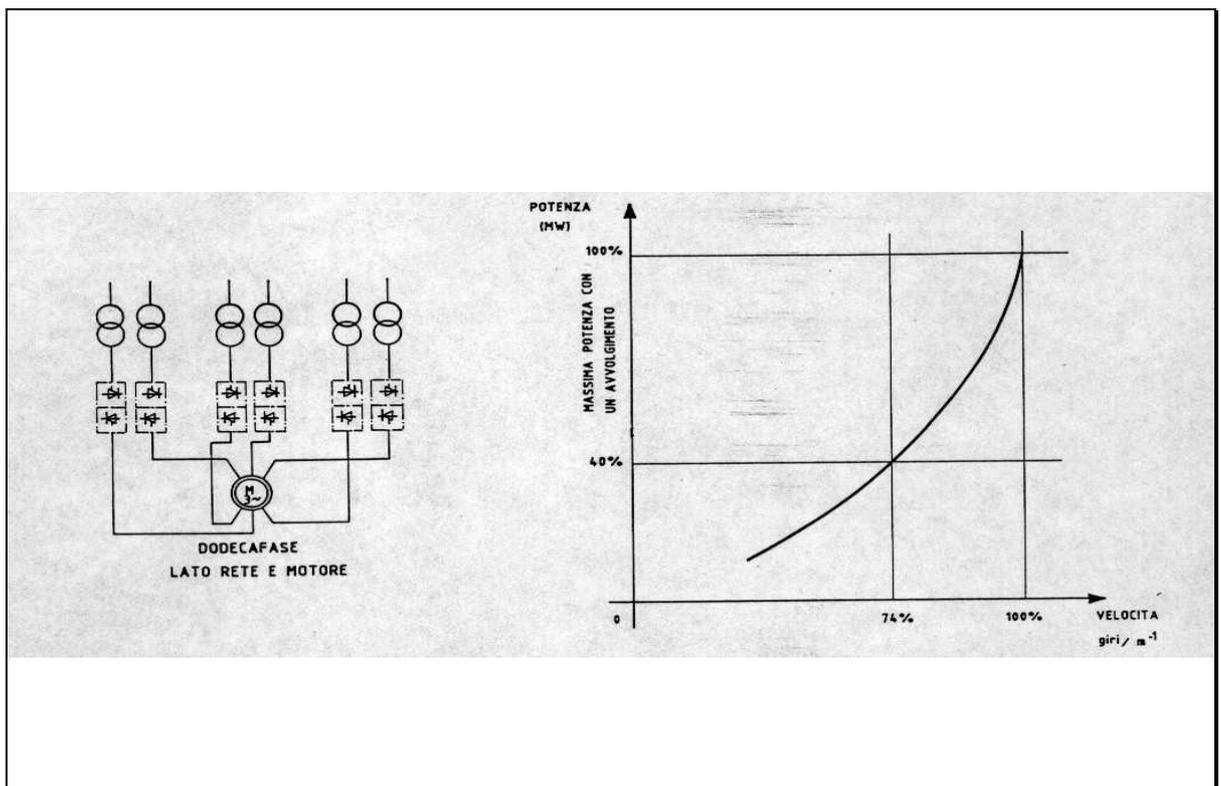
Con la propulsione elettrica è possibile eliminare riduttori, fonte di notevoli rumori; i motori elettrici accoppiati direttamente all'elica hanno regimi di rotazione molto bassi dell'ordine di 140÷150 giri al minuto, e quindi se ben progettati ed alimentati da un conveniente sistema di alimentazione presentano vibrazioni praticamente trascurabili.

### 3.5 Accresciuta flessibilità di manovra

- Il controllo preciso e progressivo della velocità nei due sensi di rotazione, grazie all'azione dei convertitori, consente l'utilizzo di eliche a pale fisse anziché quelle a pale orientabili, con risparmio in termini di costo e con miglior rendimento poiché queste funzionano sempre nelle condizioni di progetto.

Il motore elettrico gira bene e può erogare la massima coppia in ambedue le direzioni ed inoltre consente la manovra di inversione del verso di rotazione in tempo molto limitato.

- Il MEP è in grado di sviluppare la coppia massima su tutto l'arco delle velocità ammissibili (da 0 al 100%), in entrambe i versi di rotazione, contrariamente al motore Diesel che sviluppa coppia utile solo a partire dal 40% della sua velocità nominale. Questo significa avere una maggiore flessibilità di impiego e risposte del sistema adeguate alle esigenze operative.



## 3.6 Grande affidabilità e sicurezza delle apparecchiature

La centrale diesel-elettrica, dato il numero e la potenza dei gruppi installati, presenta un'alta ridondanza non solo per i sistemi della nave, come ad esempio l'impianto di condizionamento aria, le cucine, il sistema di navigazione etc., ma anche per l'alimentazione del sistema di propulsione. Inoltre:

- Il frazionamento della potenza permette di non perdere la mobilità della nave in seguito all'avaria di un gruppo o alla sua manutenzione.
- Si può ridondare il MEP.

Le macchine elettriche possono essere dotate di due o più terne di avvolgimenti e i convertitori statici di rami ridondanti in parallelo, provvisti chiaramente di un'opportuna elettronica di supervisione e controllo.

- L'indipendenza del locale in cui è installato il MEP da quello in cui risiedono gli elettrogeni (generalmente al di sopra del piano di galleggiamento di progetto) consente di non danneggiare completamente l'impianto in caso di allagamento. Spesso, sempre per motivi di sicurezza, i Diesel generatori sono posti in locali separati così come i MEP se presenti in numero maggiore di uno.

Inoltre il maggior grado (tra l'altro sempre crescente) di affidabilità dei dispositivi elettronici, il più regolare uso dei motori primi, l'eliminazione di componenti meccaniche quali i riduttori, consentono un aumento decisivo della affidabilità globale del sistema.

Nel campo dell'affidabilità e della ridondanza fanno comunque fede le norme **R.I.Na** che regolano in modo univoco quella che è la progettazione, la costruzione e l'installazione degli impianti elettrici e degli impianti di propulsione elettrica a bordo di navi.

A titolo riassuntivo si riportano in tabella II le possibili applicazioni in base alle prestazioni richieste.

**Tabella II**

	Prestaz e requisiti di coppia	Manovrab e flessib. operativa	Variab utenze di bordo	Ottimizz Spazi Interni	Minori consumi	Minore inquinamento da gas di scarico	Comfor t	Funz. in assenza di ossigeno	Minori vibrazioni trasmesse all'esterno	Vulne - rabilit à
Rompi- ghiaccio	***	**	-	-	-	-	-	-	-	-
Navi per studi e per ricerche	-	**	***	***	*	*	***	-	-	-
Navi da crociera	*	*	-	-	-	*	**	-	*	-
Navi a posiz. dinamico	**	***	**	-	*	-	-	-	-	-
Navi militari	*	*	*	*	-	-	-	-	-	***
Traghet ti	*	**	-	***	-	*	*	-	-	-
Cargo	-	-	**	*	-	-	-	-	-	-

Grado di importanza: \*\*\* = massimo

\*\* = medio

\* = minimo

- = nullo

## 4 Propulsione diesel elettrica integrata per mega yachts

### 4.1 Generalità

I sistemi a propulsione Diesel-elettrica sono i più flessibili ed efficienti attualmente disponibili.

Come abbiamo già evidenziato nel precedente capitolo, ci sono due tipi di corrente elettrica: AC, o corrente alternata, e DC, o corrente continua. Un motore AC opera ad una velocità costante determinata dalla frequenza. La velocità di un motore DC, invece, varia con la tensione applicata.

Un raddrizzatore controlla la conversione della potenza AC in potenza DC così che una tensione DC variabile possa essere ottenuta dalla tensione AC costante.

Questo fornisce un semplice modo per controllare la velocità di un motore DC.

Uno yacht a doppia elica convenzionale può avere quattro o cinque motori diesel con un motore dedicato a ciascuna elica e gli altri dedicati alla potenza di servizio della nave.

Per uno yacht diesel elettrico l'utilizzo di un bus di potenza ha molti vantaggi:

- Tutte le funzioni della nave possono essere approvvigionate da uno o più gruppi elettrogeni che alimentano questo bus comune;
- Il bus comune alimenta il pannello di controllo dei servizi della nave ed anche i raddrizzatori da dove i motori elettrici a velocità variabile ruotano le eliche usando entrambe le linee d'asse convenzionali, sia con eliche a passo fisso o a passo variabile sia con propulsori (thrusters) Z-drive.
- La velocità può essere precisamente controllata da zero al valore massimo attraverso il proprio ponte raddrizzatore. La frase "da velocità zero" è importante. Con un azionamento meccanico standard i minimi giri al minuto delle eliche sono determinati dalla minima velocità del motore.
- I gruppi elettrogeni possono essere messi in linea o rimossi a seconda del bisogno del carico totale, senza interrompere alcun carico operativo. Questo parametro permette la conservazione del carburante quando non è richiesta la piena potenza.
- La manutenzione dei motori a bordo può essere effettuata senza fermare la nave o perdere alcuna funzione del sistema.

- Non è possibile sovraccaricare un motore, anche se le valvole d'immissione sono aperte, con solo un motore funzionante. Questa caratteristica è fornita da un circuito limitato in potenza che compara la potenza resa disponibile dal(i) generatore(i) che sta(stanno) funzionando con la potenza totale che è usata da tutti i carichi quando questi raggiungono il 95% della capacità disponibile, e limita di conseguenza i carichi alimentati dall'SCR per prevenire il sovraccaricamento del(i) motore(i).

Invece di avere un motore riservato al carico, i gruppi elettrogeni ora incanalizzano la loro potenza in una riserva comune, il bus di potenza prima menzionato.

La potenza serve sia per far girare l'elica sia per provvedere ai carichi della nave.

Tale potenza è trasportata dal bus ed è fornita al bowthruster, alla cucina di bordo, ai motori per il condizionamento dell'aria o ad altri carichi elettrici.

Un esteso sistema di gestione della potenza ed un sistema di distribuzione del carico regoleranno tutto questo.

Con uno o più motori fuori uso, il motore usato sarà operante ad un carico più alto.

Perciò, essi sono più efficienti ed usano meno carburante per HP/h sviluppati.

Il risultato è che la nave Diesel-elettrica userà meno carburante di una nave con azionamento diretto per compiere la stessa missione dove sono richiesti meno HP del massimo possibile. Questo è uno dei grandi vantaggi di un azionamento elettrico.

Anche quando solo un motore è in funzione, possiamo ancora far operare entrambe le eliche in avanti o in retromarcia in tutte le combinazioni di velocità con la capacità di un solo motore e provvedere allo stesso tempo alle richieste di potenza degli ausiliari della nave. Nuovamente il macchinista deve stare attento a non sovraccaricare il motore.

Elenchiamo altri vantaggi dell'azionamento elettrico:

- Il motore opera sempre fra il 50% e il 100% del carico;
- Il motore opera sempre a velocità costante e perciò accetta cambiamenti di carico molto più veloci;
- Il motore produce minore fumo nero e altri inquinanti quando muove le eliche;
- Uso più economico del carburante per il motore;

- La velocità delle eliche può essere variata più velocemente;
- L'inversione di marcia è più veloce;
- Il motore di propulsione elettrica e il bowthruster possono essere adoperati all'1% della velocità senza alcun tempo limite superiore ed anche oltre la velocità massima;
- Le scatole del cambio di velocità sono semplici unità di riduzione senza inversioni od innesti;
- Il lay-out della sala macchine è più flessibile.

## **4.2 Riassunto dei benefici della propulsione diesel elettrica convenzionale**

- Possibilità di funzionare con un motore primo, che serve sia le eliche sia gli ausiliari di bordo allo stesso tempo.
- Con uno o più motori staccati, il motore (o i motori) in funzione opererà sempre tra il 50 e il 100% del carico, cosa che promuove una lunga vita del motore stesso.
- Il back up di tre motori di propulsione.
- Minore fumo e altri inquinanti.
- I motori di propulsione e i motori bowthruster possono essere precisamente controllati da zero alla massima velocità.
- Non è possibile sovraccaricare alcun motore.
- La velocità delle eliche può essere cambiata più velocemente.
- Uso più economico del carburante che alimenta i motori.
- Lay-out della sala macchine più flessibile.
- Livello di rumore estremamente basso dentro e fuori la sala motori.
- Bassa temperatura nella sala motori.
- Elevata manovrabilità, particolarmente a bassa velocità.

## 4.3 Propulsione diesel-elettrica non convenzionale

La propulsione diesel-elettrica non convenzionale consiste nell'avere, al posto del classico motore elettrico dentro l'imbarcazione collegato all'elica tramite un asta e rotismi, un motore elettrico (Azipod) contenuto in un guscio che sta immerso nell'acqua.

### 4.3.1 Benefici del propulsore Azipod

I motori Azipod negli anni hanno assunto una importanza sempre maggiore nell'installazione sulle più svariate imbarcazioni. Essi portavano già nella loro prima tipologia di costruzione numerosi vantaggi tra cui i più importanti erano :

- Flessibilità impianto energia elettrica, questo mi dà consumo basso del combustibile, ridotto costo di manutenzione, minori emissioni e ridondanza adeguata con meno potenza installata
- Alto fattore di potenza
- Efficienza della trasmissione e della idrodinamica
- Raffreddamento efficiente
- Diminuzione di rumore, importantissima per le navi oceanografiche
- Diminuzione di spazio a bordo occupato anche nel caso della propulsione diesel-elettrica convenzionale dai motori elettrici e dagli ingranaggi
- Eliminazione del timone poiché l'Azipod è in grado di fornire un'uguale spinta in tutte le direzioni
- Disponibilità immediata di spinta in tutte le direzioni
- Elevata manovrabilità anche nelle situazioni più critiche
- Miglior studio e fattibilità della zona di poppa. Questo mi porta, a parità di potenza installata, a ottenere una velocità maggiore oppure ho una riduzione di potenza installata a parità di velocità richiesta.

I primi motori Azipod avevano dimensioni notevoli in confronto a quelli attuali, basti pensare che prima vi si poteva introdurre dentro una persona per la manutenzione o

l'eventuale riparazione con quindi la possibilità di operare in mare aperto a differenza degli attuali che per le eventuali riparazioni bisogna ricorrere al cantiere.

Questo inconveniente è un problema limitato vista l'elevata robustezza e affidabilità dei motori sincroni e anche in considerazione che comunque le imbarcazioni devono andare in cantiere periodicamente per altri motivi.

La vecchia generazione di motori Azipod avevano bisogno di un raffreddamento forzato vista la distanza che intercorreva tra il guscio del motore e il motore stesso mentre negli attuali il raffreddamento del motore è affidato all'acqua del mare in cui è immerso.

Nella figura seguente possiamo osservare le varie parti che compongono il motore Azipod.

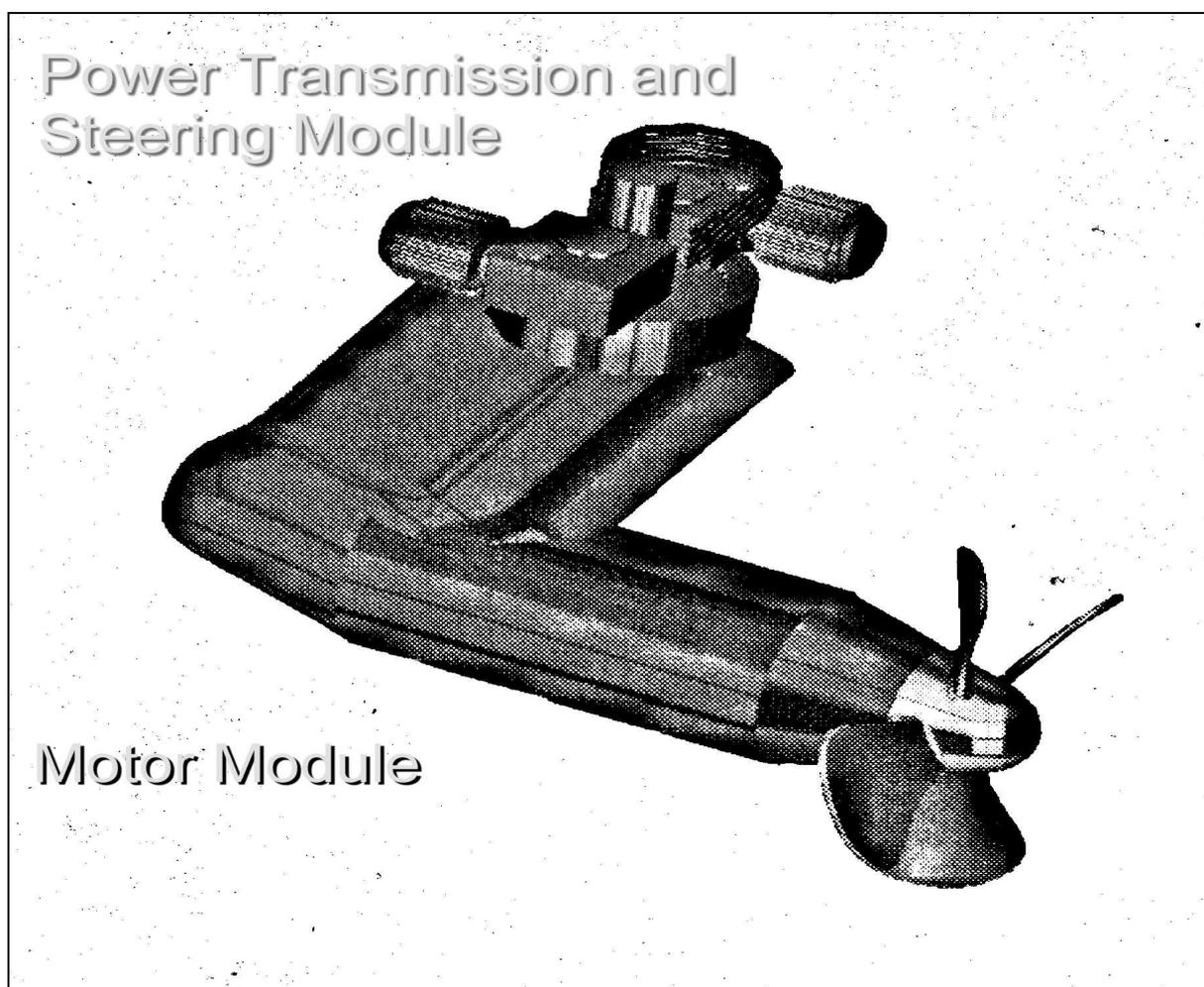


Figura 4.1 : Motore Azipod

Le due figure seguenti ci mostrano le differenze di spazi occupati a bordo di una nave da crociera nel caso che si utilizzi una propulsione Diesel-Elettrica convenzionale (figura 4.2.1) o con sistema Azipod (figura 4.2.2).

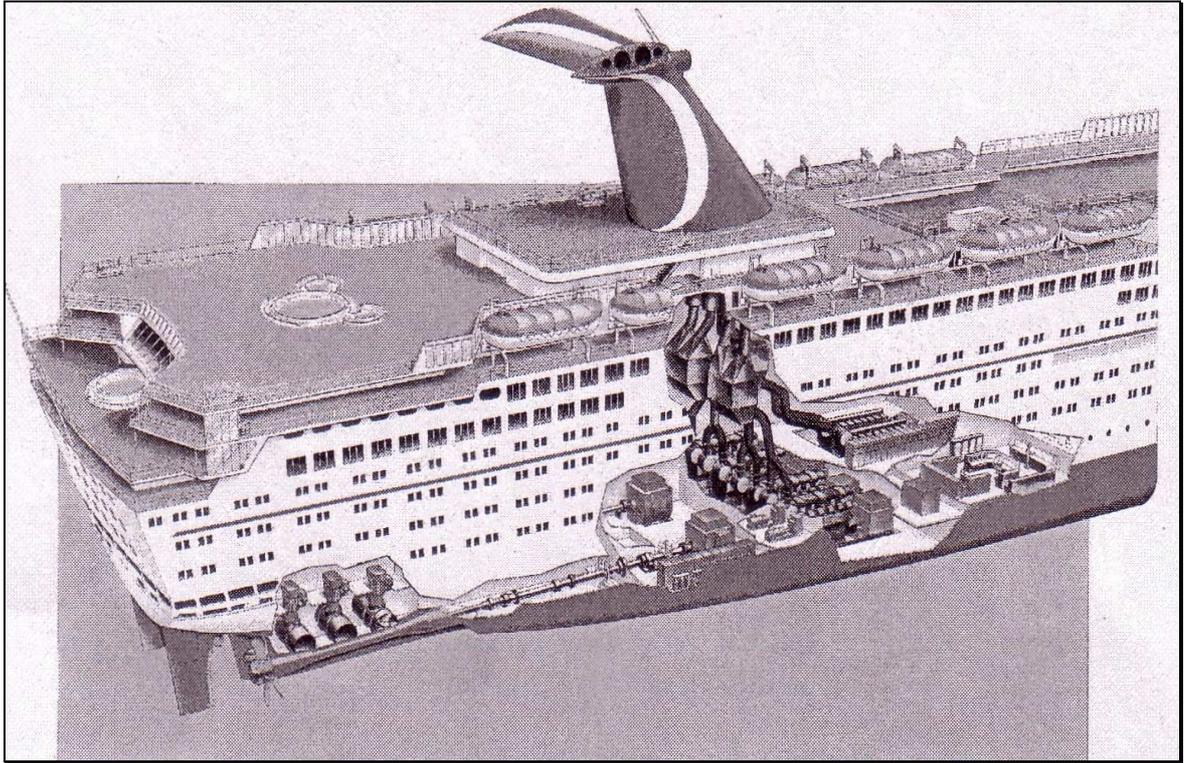


figura 4.2 : nave a propulsione diedel-elettrica convenzionale

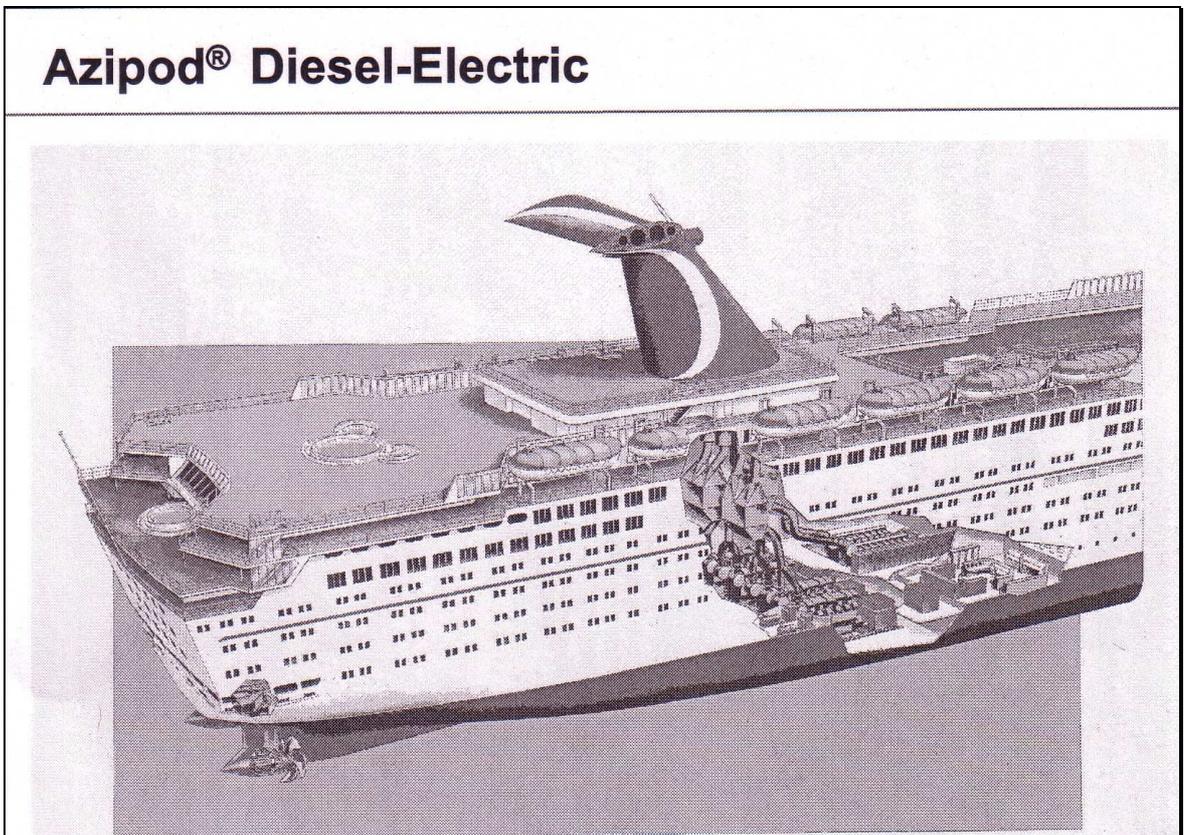


figura 4.3 : nave a propulsione diesel-elettrica con motore Azipod

## 5 Analisi del sistema di una nave esistente

In questo capitolo si vuole particolareggiare il sistema “65M Yacht” in quelli che sono i componenti principali dell’impianto di generazione e di propulsione.

### 5.1 Schema della nave considerata

Il sistema del Megayacht è costituito da una sbarra principale a cui sono collegati :

- 4 generatori sincroni
- 2 convertitori che alimentano i due motori di propulsione
- 1 bow thruster
- 2 trasformatori

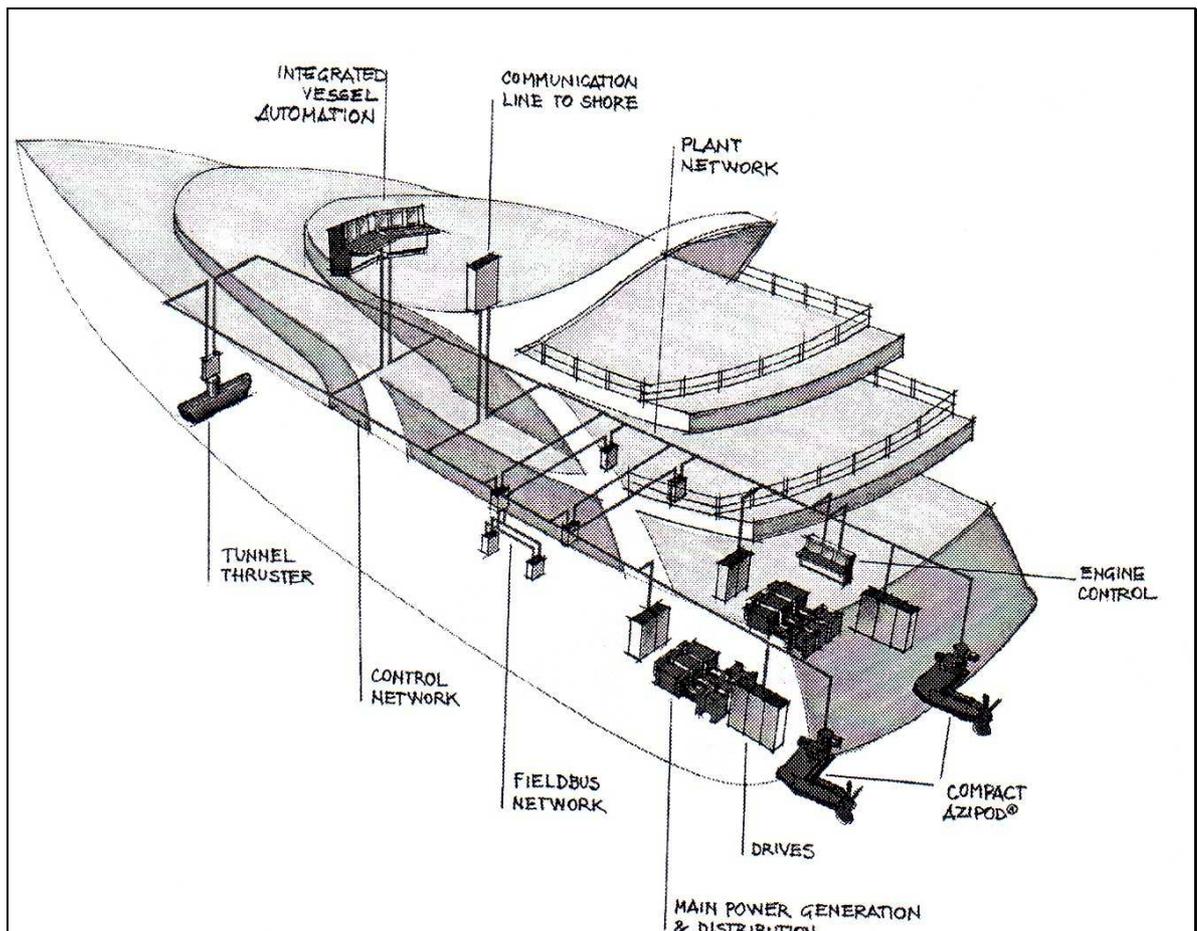


Figura 5.1 : rappresentazione dell’installazione a bordo dei vari componenti

La sbarra principale è a 690 V ed alla frequenza di 50 Hz ,attraverso un interruttore è possibile dividere poi la sbarra principale in due semisbarre indipendenti, ognuna delle quali alimentata da due generatori, in questo modo se avessi dei problemi su una semisbarra posso staccarla, senza avere alcuna interruzione nella navigazione, e provvedere ad eliminare il guasto.

I quattro generatori sincroni sono collegati alla sbarra principale attraverso un interruttore che mi permette di staccarli ove fosse necessario rendendo il mio sistema flessibile dal punto di vista della potenza richiesta e anche di effettuarvi degli interventi di riparazione in caso di guasto.

Il sistema del Megayacht, oltre ad avere una sbarra principale alla tensione di 690V, ha una sbarra secondaria alla tensione di 400V che alimentata le molteplici utenze presenti a bordo.

La sbarra secondaria è collegata alla sbarra principale attraverso i due trasformatori sopra elencati, anch'essa è divisa in due parti sempre per il discorso che in caso di guasto da una parte posso staccare solo essa e far funzionare regolarmente l'altra parte.

Alla sbarra secondaria sono collegati, uno a una semisbarra e l'altro all'altra semisbarra, due filtri armonici resi necessari dal fatto che l'utenze collegate alla sbarra secondaria mal sopportano o addirittura non funzionano in presenza di armoniche.

### **5.1.1 Generatori sincroni**

La potenza a bordo è garantita da quattro generatori sincroni a due a due uguali (tipo LEROY SOMMER LSA49.1S4 375kVA , LEROY SOMMER LSA 52.2L70 1500kVA) le cui caratteristiche principali sono descritte nelle tabelle seguenti

### LEROY SOMMER LSA49.1S4 375kVA

Frequenza [ Hz ]	50
Velocità [ rpm ]	1500
Potenza [ kVA ]	375
Tensione [ V ]	690
Corrente [ A ]	313.8
Fattore di potenza	0,8
Reattanza subtransitoria [ % ]	7

### LEROY SOMMER LSA 52.2L70 1500kVA

Frequenza [ Hz ]	50
Velocità [ rpm ]	1500
Potenza [ kVA ]	1500
Tensione [ V ]	690
Corrente [ A ]	1255
Fattore di potenza	0,8
Reattanza subtransitoria [ % ]	9.8

## **5.1.2 Convertitori**

I due convertitori di frequenza montati sul megayacht sono del tipo ACS600W Marine Drive a sei impulsi raffreddati ad acqua.

Questi convertitori sono costituiti da una prima parte di raddrizzamento costituita da un ponte trifase semi-controllato e da un ponte inverter, essi sono collegati da un'induttanza di spianamento che disaccoppia i due ponti e assicura l'indipendenza della frequenza di alimentazione del motore dalla frequenza di rete (fissa).

I due convertitori di frequenza hanno una potenza di 1150kW necessari per alimentare l'Azipod che ha bisogno alla massima potenza di 1080kW.

La scelta di utilizzare un raddrizzatore trifase semi-controllato e non un total-controllato deriva dal fatto che non avendo la necessità di invertire il flusso di potenza ho dei circuiti di controllo per dare gli impulsi di accensione ai tiristori più semplici ed ho un risparmio economico dal punto di vista dei componenti utilizzati.

Non è scelto un raddrizzatore trifase non controllato e quindi composto da soli diodi in quanto avrei avuto bisogno, prima di alimentare l'inverter, di una struttura composta da un commutatore e una resistenza che prima faceva caricare le capacità in ingresso all'inverter e poi collegava lo stadio di raddrizzamento con l'inverter.

Con il raddrizzatore trifase semi-controllato non ho bisogno di tale struttura ma basta che il segnale di accensione dei tiristori venga dato con un angolo di ritardo pari a  $10^\circ$

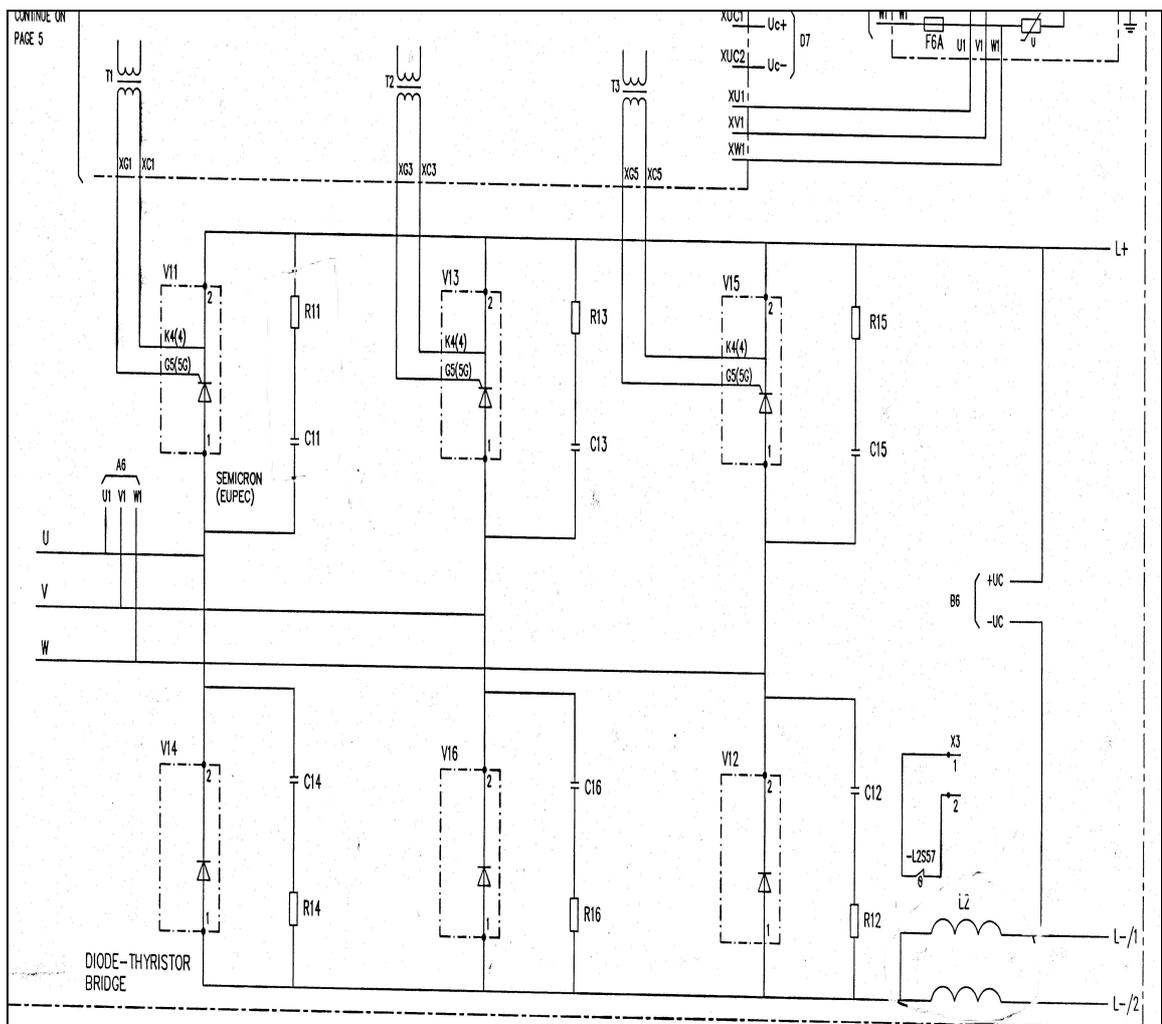


Figura 5.2 : schema del raddrizzatore con gli snubber

### 5.1.3 Bow thruster

Il bow thruster è un motore di tipo azimutale installato nella zona di prora che viene utilizzato solo in porto per le operazioni di ormeggio alla banchina; esso ha una potenza di 300kW ed è collegato direttamente alla sbarra principale.

### 5.1.4 Trasformatori

I due trasformatori, installati sul megayacht, sono collegati ognuno con una diversa semisbarra principale lato primario e lato secondario con una diversa semisbarra secondaria. I loro principali dati tecnici sono indicati in tabella

Dimensioni [ mm ]	1350 x 840 x 1350
Peso [ Kg ]	1310
Potenza [ kVA ]	315
Frequenza [ Hz ]	50
Tensione primario [ V ]	690
Tensione secondario [ V ]	400
$V_{cc}$ [ % ]	4.8
Tipo avvolgimenti	D y <sub>n</sub> 11

## 5.2 La simulazione

Lo scopo finale dello studio è stato effettuare una simulazione al calcolatore della rete elettrica di propulsione del megayacht “**65M Yacht**” , per poi analizzare la distorsione armonica della tensione alla sbarra principale a 690 V .

La simulazione è stata effettuata con l’uso del programma Matlab.

## 5.3 Schema elettrico

Si riporta di seguito lo schema elettrico generale del megayacht “65M Yacht”

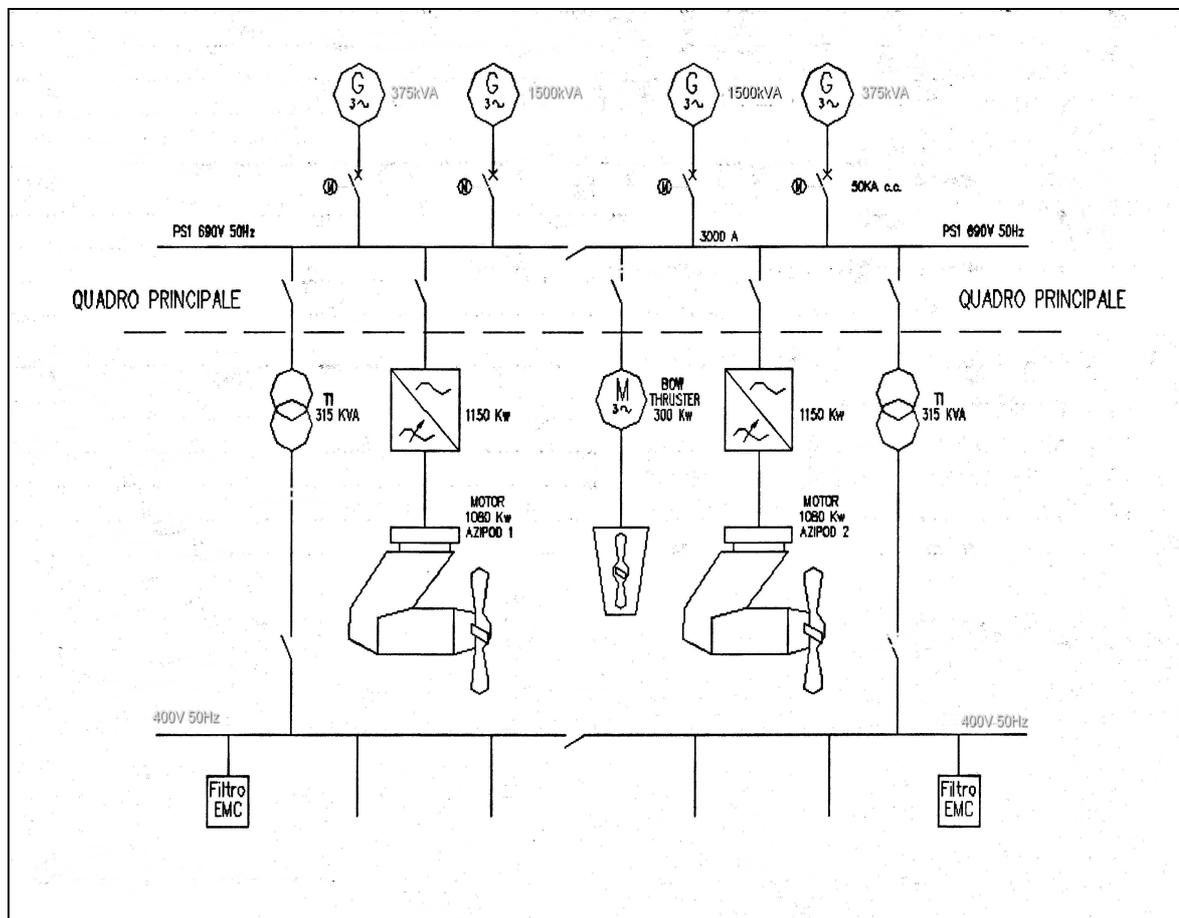


Figura 6.1 schema elettrico del megayacht “65M Yacht”

Si riporta di seguito il grafico delle potenze installate sul megayacht “65M Yacht”

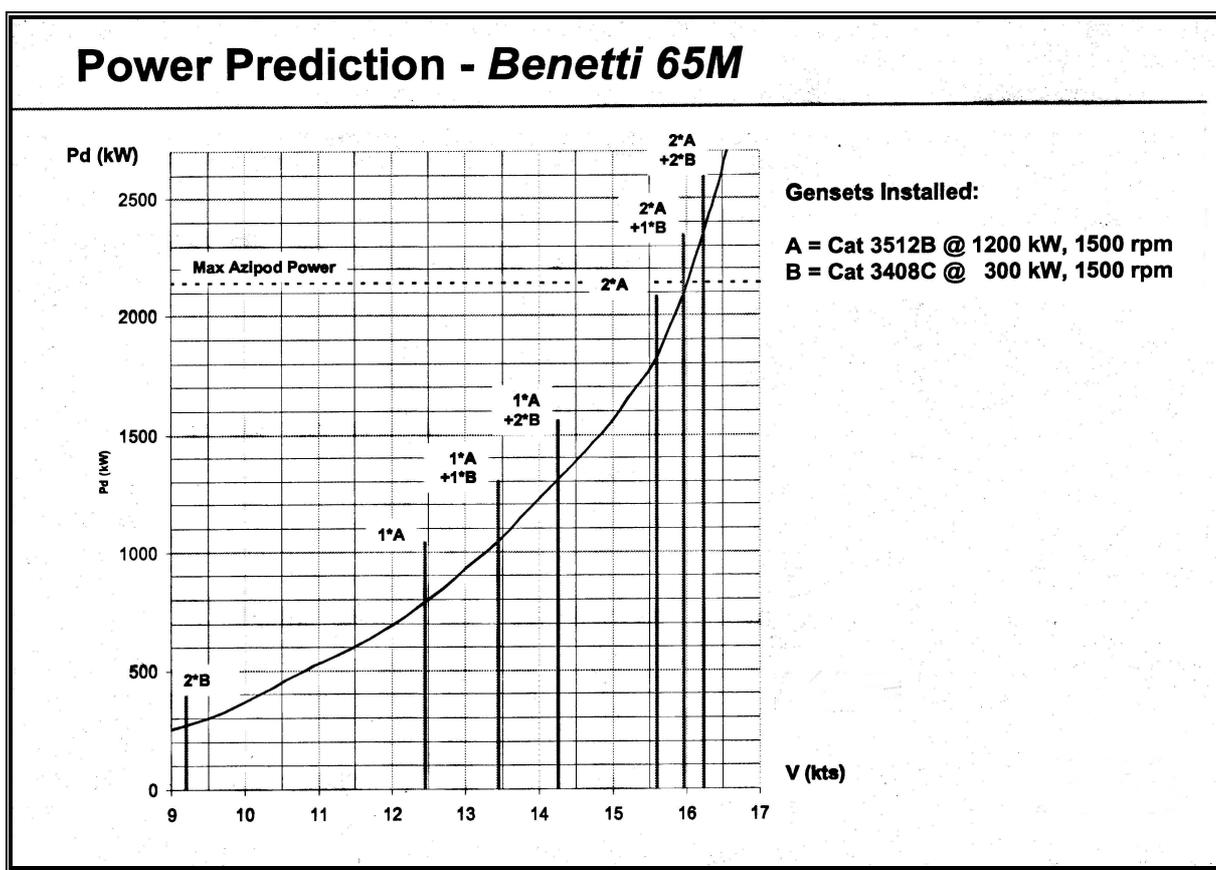


Figura 6.2 : grafico delle potenze installate su “65M Yacht”

## 5.4 Modellazione dello schema

La simulazione è stata basata sulla modellizzazione dello schema a blocchi generale di pagina precedente.

Lo studio è stato effettuato per gradi : si è partiti dalla realizzazione dei generatori sincroni, del ponte raddrizzatore trifase semi-controllato con il suo generatore di impulsi, del carico in bassa tensione e dalla modellizzazione del motore sincrono Azipod mentre non è stato realizzato l’inverter per la mancanza di informazioni sul suo controllo.

Una volta completato si è passati alla simulazione in varie condizioni di carico e successivamente è stato progettato un filtro affinché il sistema rispettasse le normative vigenti.

## 5.5 Simulazioni effettuate

Le simulazioni sono state effettuate per fornire un'ulteriore conferma (rispetto agli studi fatti da ABB) del fatto che il sistema propulsivo del megayacht **“65M Yacht”** risulti conforme alle normative del **“Lloyd’s Register of Shipping”** per quanto riguarda le armoniche di tensione sulla sbarra principale.

Le simulazioni effettuate non vogliono descrivere il reale funzionamento del sistema installato sul megayacht **“65M Yacht”** in quanto, non avendo avuto a disposizione il funzionamento dell'inverter montato sul megayacht, si è dovuto effettuare una schematizzazione brutale del sistema costituito dall'inverter e dal propulsore.

Le simulazioni svolte vogliono andare a studiare il sistema quando esso è a regime.

Nella prima simulazione sono stati utilizzati tutti i parametri forniti da ABB, si è visto che utilizzando tali parametri il motore, nel transitorio iniziale, per la condizione in cui lo vedeva a metà servizio non funzionava.

Andando a studiare il perché di tale fenomeno ci siamo accorti che il carico in uscita dal raddrizzatore aveva una frequenza di risonanza ( $f_r=215$  Hz) troppo vicina alla frequenza di esercizio ( $f_o=300$  Hz), quindi si sceglieva di aumentare il valore dell'induttanza, situata dopo il raddrizzatore, di otto volte.

Così facendo la frequenza di risonanza del circuito diventava ( $f_r= 76$ Hz) abbastanza lontana da quella di esercizio ( $f_o=300$  Hz).

$$f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$$

In figura 6.3.1 è riportata la corrente, nel transitorio iniziale, in uscita dal raddrizzatore con  $f_r=215$  Hz e in figura 6.3.2 con  $f_r= 76$ Hz, la condizione di funzionamento è con un generatore da 1500kVA e con soltanto un motore di propulsione a metà servizio

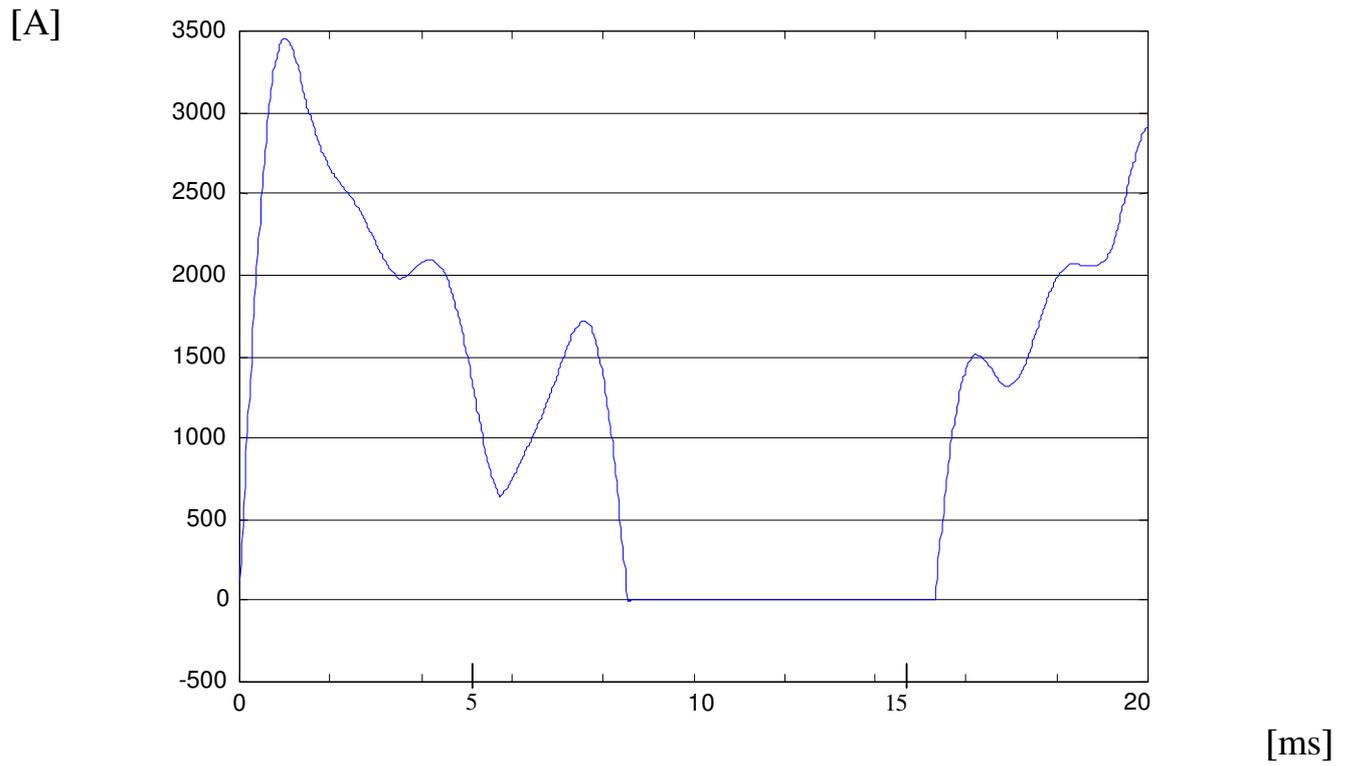


Figura 6.3 : corrente, nel transitorio iniziale, in uscita dal raddrizzatore con  $f_r = 215$  Hz

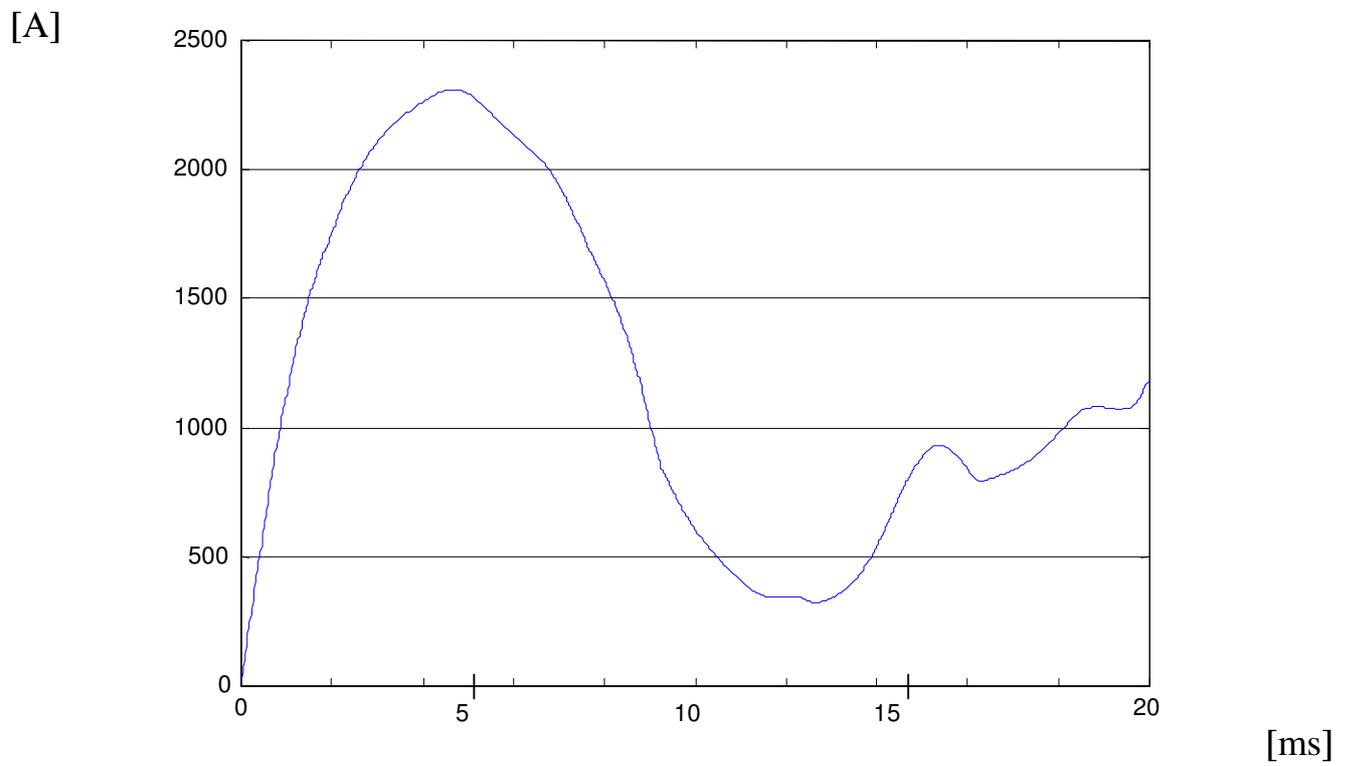


Figura 6.4 : corrente, nel transitorio iniziale, in uscita dal raddrizzatore con  $f_r = 76$  Hz

Le simulazioni successive saranno effettuate, nelle varie condizioni di carico, con il valore dell'induttanza tale che  $f_r = 76\text{Hz}$ .

### 5.5.1 Possibili configurazioni di funzionamento

Sul megayacht sono installati quattro generatori che sono uguali a due a due, le loro potenze e le rispettive reattanze subtransitorie sono riportate nella tabella 6.1 e in tabella 6.2 le configurazioni di funzionamento.

	X'' (%)	Power (kW)
Generatore A	9.8	1200
Generatore B	7	300

Tabella 6.1 : caratteristiche de generatori

N°gen.A	-	1	1	1	2	2	2
N°gen.B	2	-	1	2	-	1	2
Pd (kW)	540	1080	1350	1620	2160	2430	2700
V (nodi)	9.25	12.5	13.5	14.25	15.6	16	16.5
N°Azipod	1	1-2	2	2	2	2	2

Tabella 6.2 : configurazioni di funzionamento

Nel capitolo successivo, facendo l'analisi dello spettro armonico delle curve, ottenuto eseguendo la trasformata di Fourier, si evidenzieranno le diverse percentuali di distorsione armonica presenti alla sbarra principale.

## 5.6 Analisi delle armoniche nelle simulazioni effettuate

In questo capitolo si vogliono analizzare i risultati ottenuti dalle simulazioni per quanto riguarda il THD (total harmonic distortion) alla sbarra principale.

La formula utilizzata per calcolare il grado di disturbo sulla tensione è la seguente:

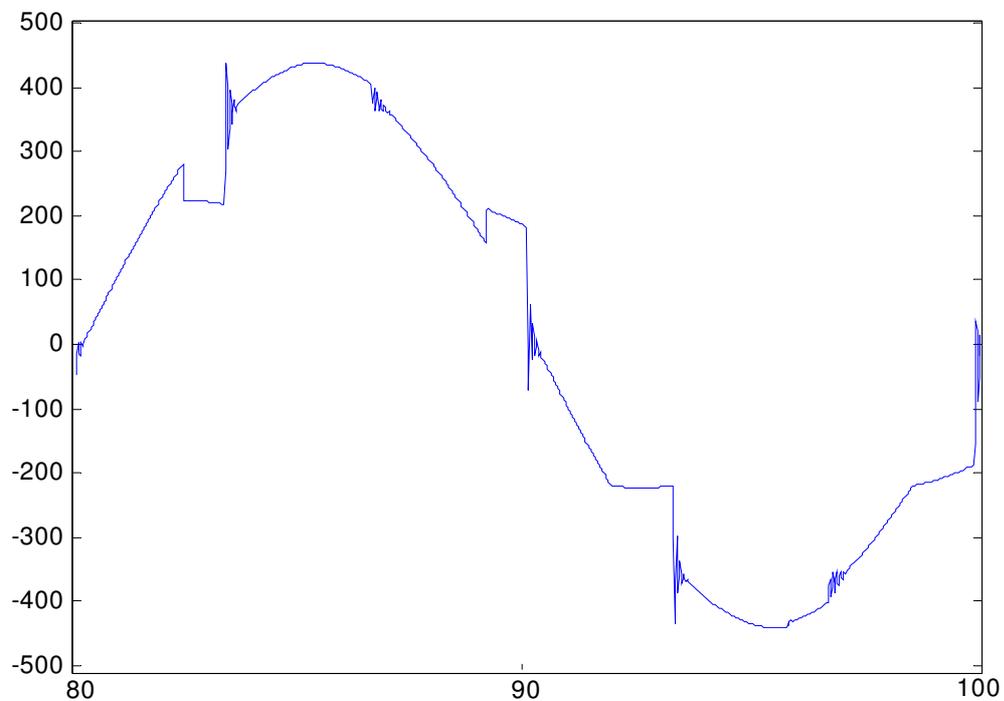
$$\text{THD } \% = \frac{V_{\text{dis}}}{V_1} * 100$$

$$\text{dove } V_{\text{dis}} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}$$

Per effettuare il calcolo è quindi necessaria un'analisi armonica delle tensioni alla sbarra che è automaticamente fatta da un'apposita applicazione presente nel programma di simulazione Matlab, in pratica un analizzatore di spettro che utilizza la trasformata di Fourier.

### 5.6.1 Forma d'onda e THD della tensione alla sbarra principale con un generatore da 1500kVA e un propulsore a piena potenza alla frequenza di 50Hz senza filtro

La forma d'onda della tensione alla sbarra principale (figura 6.5) e il calcolo del THD sono stati effettuati per la condizione di sistema a regime.



[ms]

Figura 6.5 : tensione alla sbarra principale senza filtro, installati un generatore da 1500KVA e un motore di propulsione in linea alimentato a piena potenza

In tabella 6.1 sono riportati i valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.5).

<b>COMPONENTE ARMONICA</b>	<b>VALORE TENSIONE EFFICACE [ Va ]</b>
Fondamentale	415.2
2 <sup>a</sup>	4.43
4 <sup>a</sup>	2.64
5 <sup>a</sup>	54.35
7 <sup>a</sup>	28.76
8 <sup>a</sup>	3.90
10 <sup>a</sup>	4.38
11 <sup>a</sup>	17.21
13 <sup>a</sup>	16.36
14 <sup>a</sup>	0.96
16 <sup>a</sup>	0.51
17 <sup>a</sup>	9.99
19 <sup>a</sup>	8.52
20 <sup>a</sup>	3.66
22 <sup>a</sup>	3.29
23 <sup>a</sup>	8.84
25 <sup>a</sup>	7.75
26 <sup>a</sup>	1.41
28 <sup>a</sup>	2.26
29 <sup>a</sup>	6.23
31 <sup>a</sup>	6.50
32 <sup>a</sup>	2.03

Tabella 6.1 : valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.5).

[V]

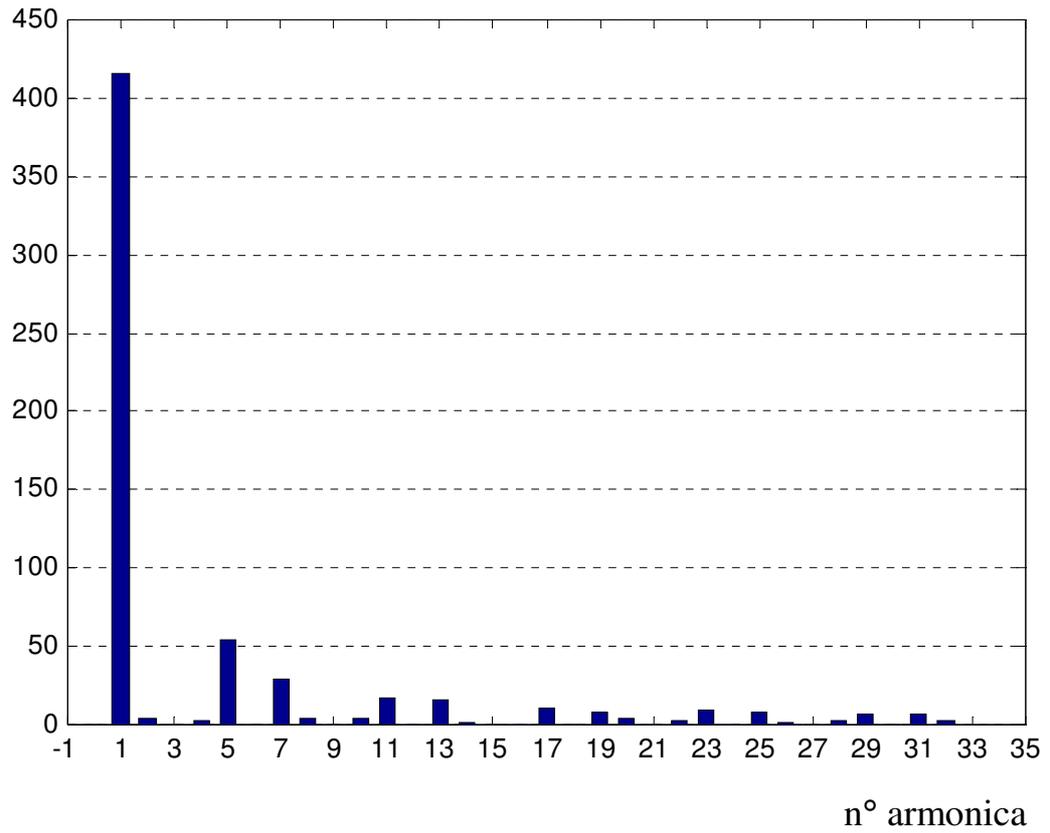


Figura 6.6 : istogramma relativo alla tabella 6.1

Dai calcoli si ottiene che

$$\text{THD \%} = 16.74 \%$$

## 5.6.2 Forma d'onda e THD con un generatore da 1500kVA e un propulsore a piena potenza alla frequenza di 50Hz con filtro

La forma d'onda della tensione alla sbarra principale (figura 6.7) e il calcolo del THD sono stati effettuati per la condizione di sistema a regime.

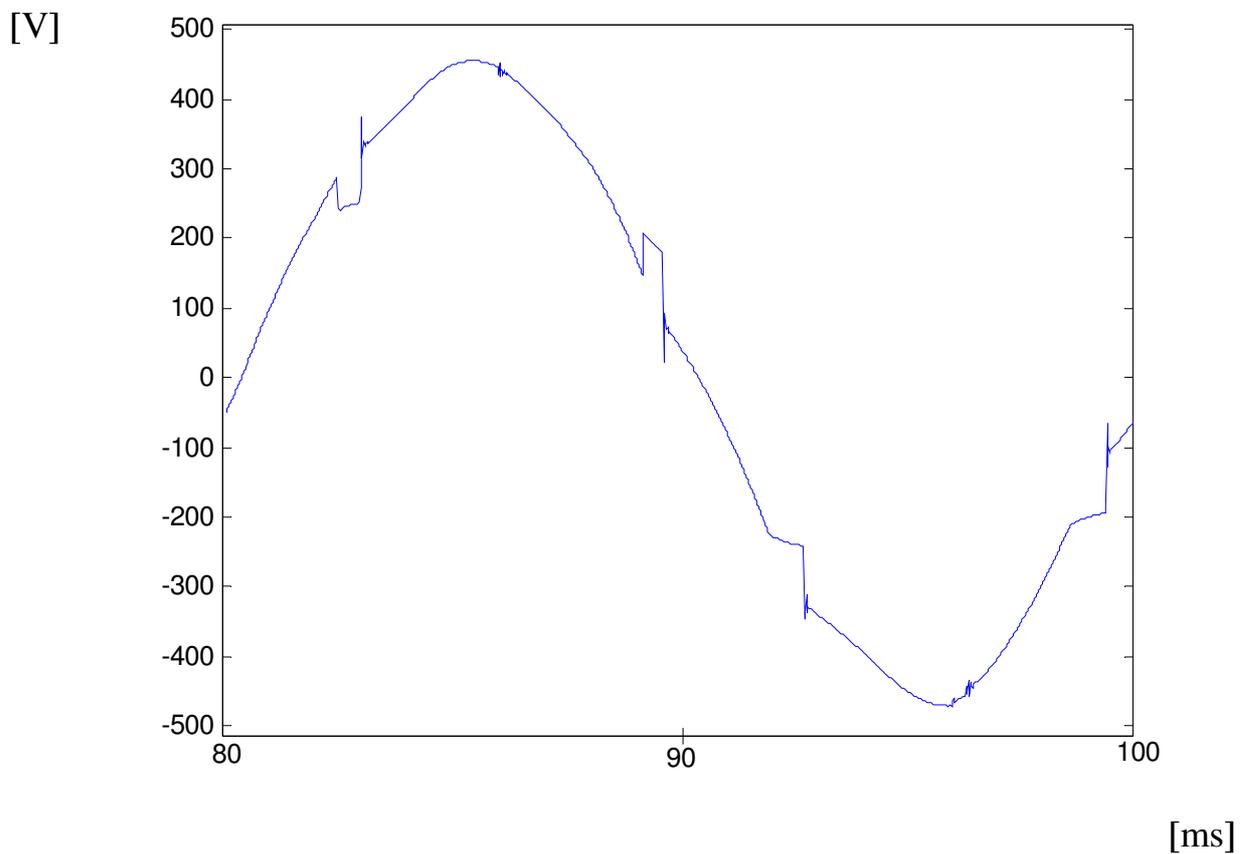


Figura 6.7 : tensione alla sbarra principale con il filtro, installati un generatore da 1500kVA e un motore di propulsione in linea alimentato a piena potenza

In tabella 6.2 sono riportati i valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.7).

<b>COMPONENTE ARMONICA</b>	<b>VALORE TENSIONE EFFICACE [ Va ]</b>
Fondamentale	440.18
2 <sup>a</sup>	9.40
3 <sup>a</sup>	7.00
4 <sup>a</sup>	2.74
5 <sup>a</sup>	9.97
6 <sup>a</sup>	6.21
7 <sup>a</sup>	3.31
8 <sup>a</sup>	0.80
9 <sup>a</sup>	0.49
10 <sup>a</sup>	3.88
11 <sup>a</sup>	9.99
12 <sup>a</sup>	0.84
13 <sup>a</sup>	8.66
14 <sup>a</sup>	6.66
15 <sup>a</sup>	1.00
16 <sup>a</sup>	6.18
17 <sup>a</sup>	7.62
18 <sup>a</sup>	0.80
19 <sup>a</sup>	5.12
20 <sup>a</sup>	5.64
21 <sup>a</sup>	1.09
22 <sup>a</sup>	4.54
23 <sup>a</sup>	4.51
24 <sup>a</sup>	0.58
25 <sup>a</sup>	2.75
26 <sup>a</sup>	3.09
27 <sup>a</sup>	0.90
28 <sup>a</sup>	2.60
29 <sup>a</sup>	2.37
30 <sup>a</sup>	0.22
31 <sup>a</sup>	1.50
32 <sup>a</sup>	2.38

Tabella 6.2 : valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.7).

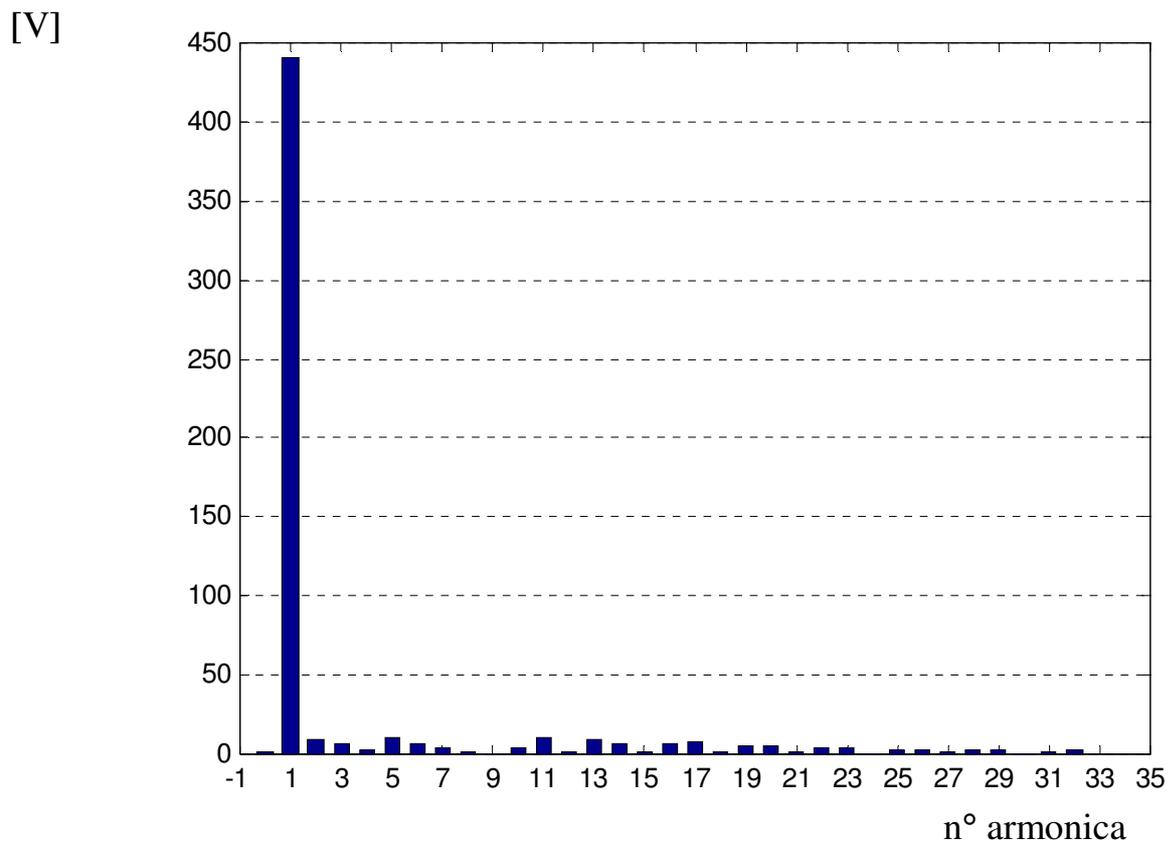


Figura 6.8 : istogramma relativo alla tabella 6.2

Dai calcoli si ottiene che

$$\text{THD \%} = 6.28 \%$$

### 5.6.3 Forma d'onda e THD con un generatore da 1500kVA e un propulsore a piena potenza alla frequenza di 52Hz con filtro

Questa simulazione è stata effettuata alla frequenza di 52Hz in quanto volevamo verificare che la progettazione del filtro fosse corretta per un grado di statismo dei generatori pari al 4%. La forma d'onda della tensione alla sbarra principale (figura 6.7) e il calcolo del THD sono stati effettuati per la condizione di sistema a regime.

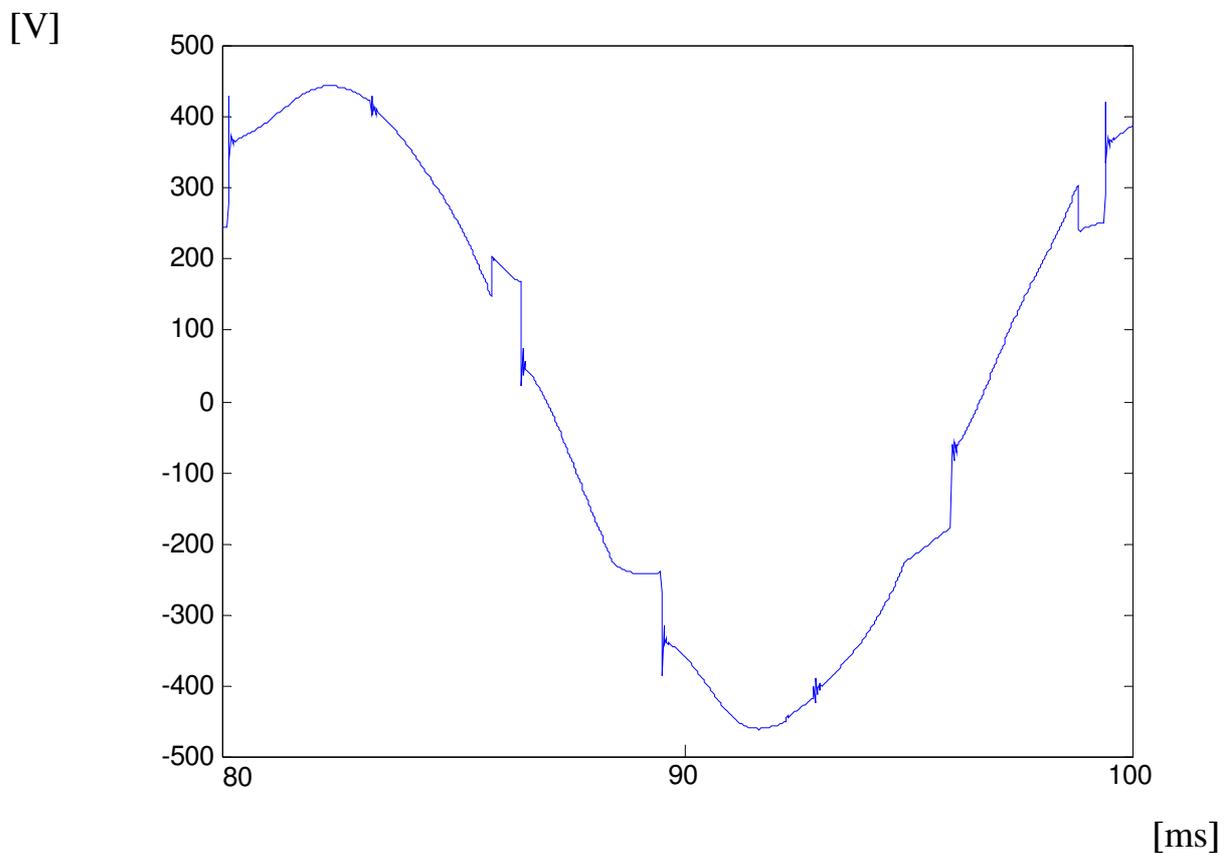


Figura 6.9 : tensione alla sbarra principale a 52Hz con il filtro, installati un generatore da 1500kVA e un motore di propulsione in linea alimentato a piena potenza

In tabella 6.3 sono riportati i valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale con filtro (graficata in figura 6.9).

<b>COMPONENTE ARMONICA</b>	<b>VALORE TENSIONE EFFICACE [ Va ]</b>
Fondamentale	441.12
2 <sup>a</sup>	19.52
3 <sup>a</sup>	8.51
4 <sup>a</sup>	6.57
5 <sup>a</sup>	11.73
6 <sup>a</sup>	7.93
7 <sup>a</sup>	5.14
8 <sup>a</sup>	4.88
9 <sup>a</sup>	1.91
10 <sup>a</sup>	2.43
11 <sup>a</sup>	5.17
12 <sup>a</sup>	7.62
13 <sup>a</sup>	6.92
14 <sup>a</sup>	6.00
15 <sup>a</sup>	5.02
16 <sup>a</sup>	3.91
17 <sup>a</sup>	4.00
18 <sup>a</sup>	8.41
19 <sup>a</sup>	4.59
20 <sup>a</sup>	4.86
21 <sup>a</sup>	4.89
22 <sup>a</sup>	3.07
23 <sup>a</sup>	3.28
24 <sup>a</sup>	6.14
25 <sup>a</sup>	1.61
26 <sup>a</sup>	3.23
27 <sup>a</sup>	2.09
28 <sup>a</sup>	1.47
29 <sup>a</sup>	1.67
30 <sup>a</sup>	2.42
31 <sup>a</sup>	1.18
32 <sup>a</sup>	0.92

Tabella 6.3 : valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale con filtro (graficata in figura 6.9)

[V]

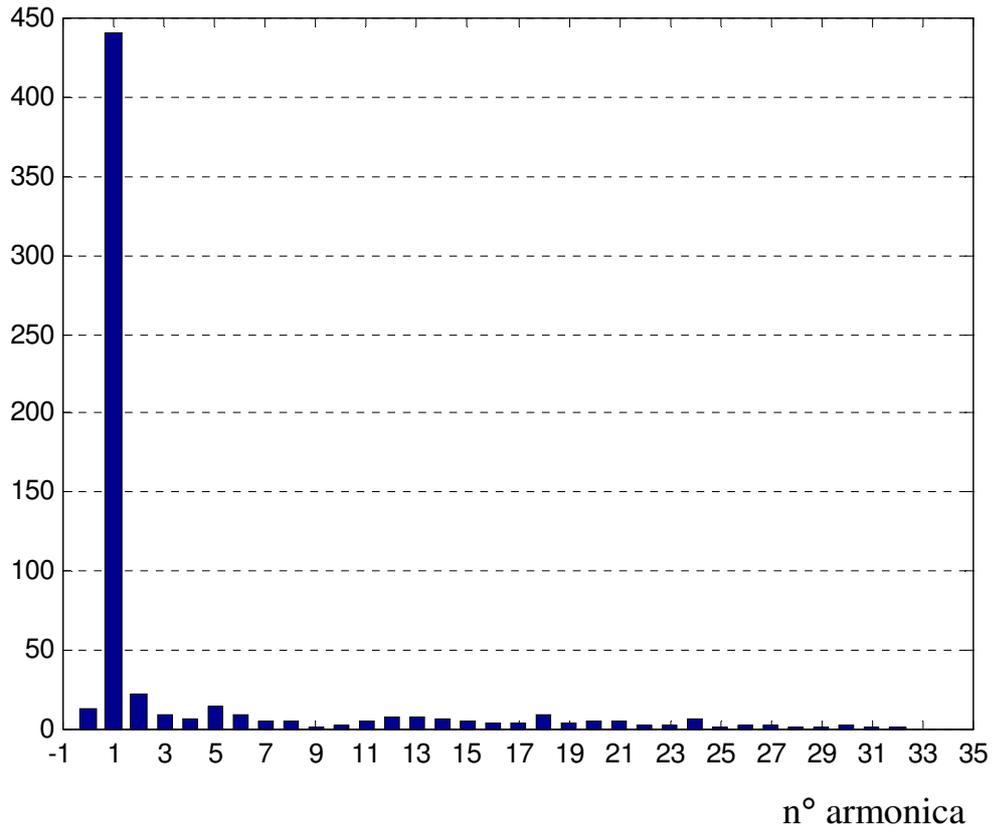


Figura 6.10 : istogramma relativo alla tabella 6.3

Dai calcoli si ottiene che

$$\text{THD \%} = 7.89 \%$$

## 5.6.4 Forma d'onda e THD con un generatore da 1500kVA e due propulsori a metà potenza alla frequenza di 50Hz con filtro

La forma d'onda della tensione alla sbarra principale (figura 6.11) e il calcolo del THD sono stati effettuati per la condizione di sistema a regime.

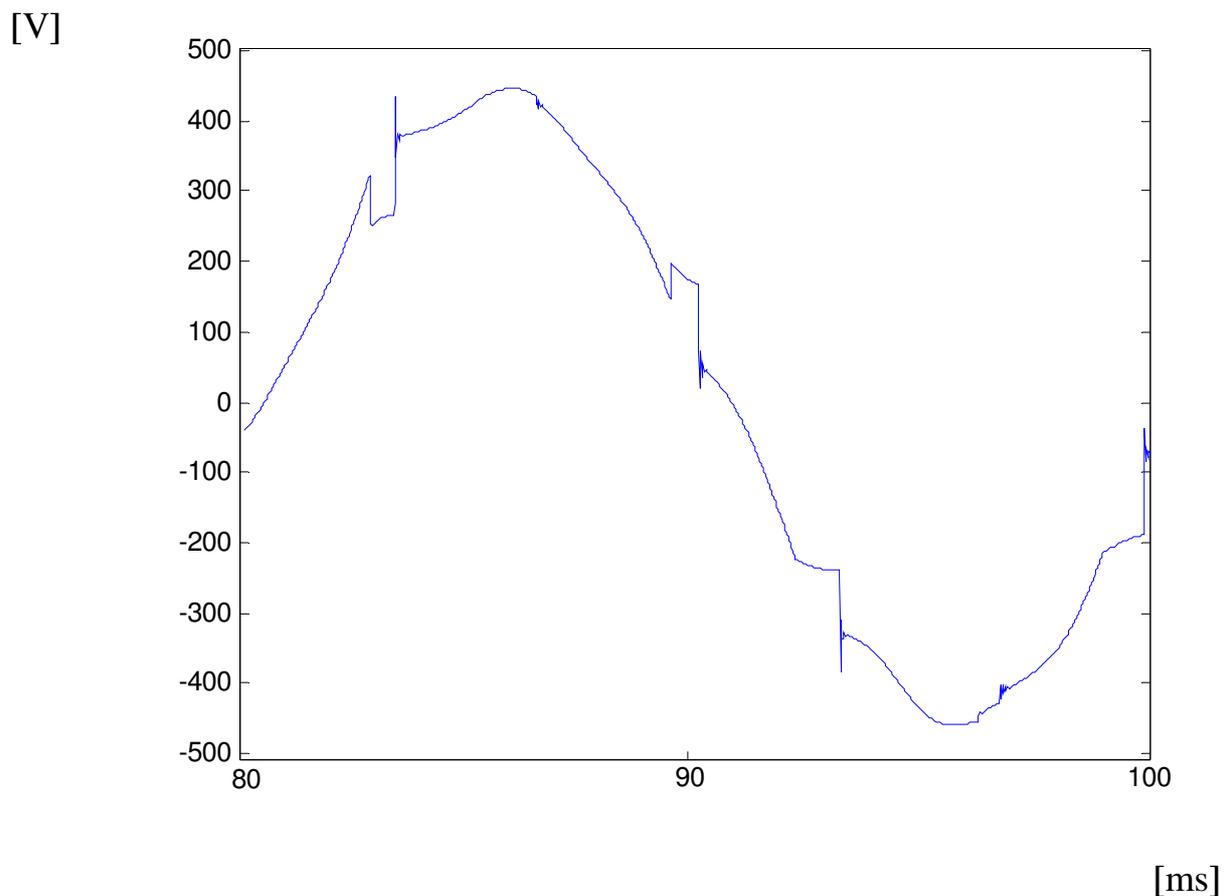
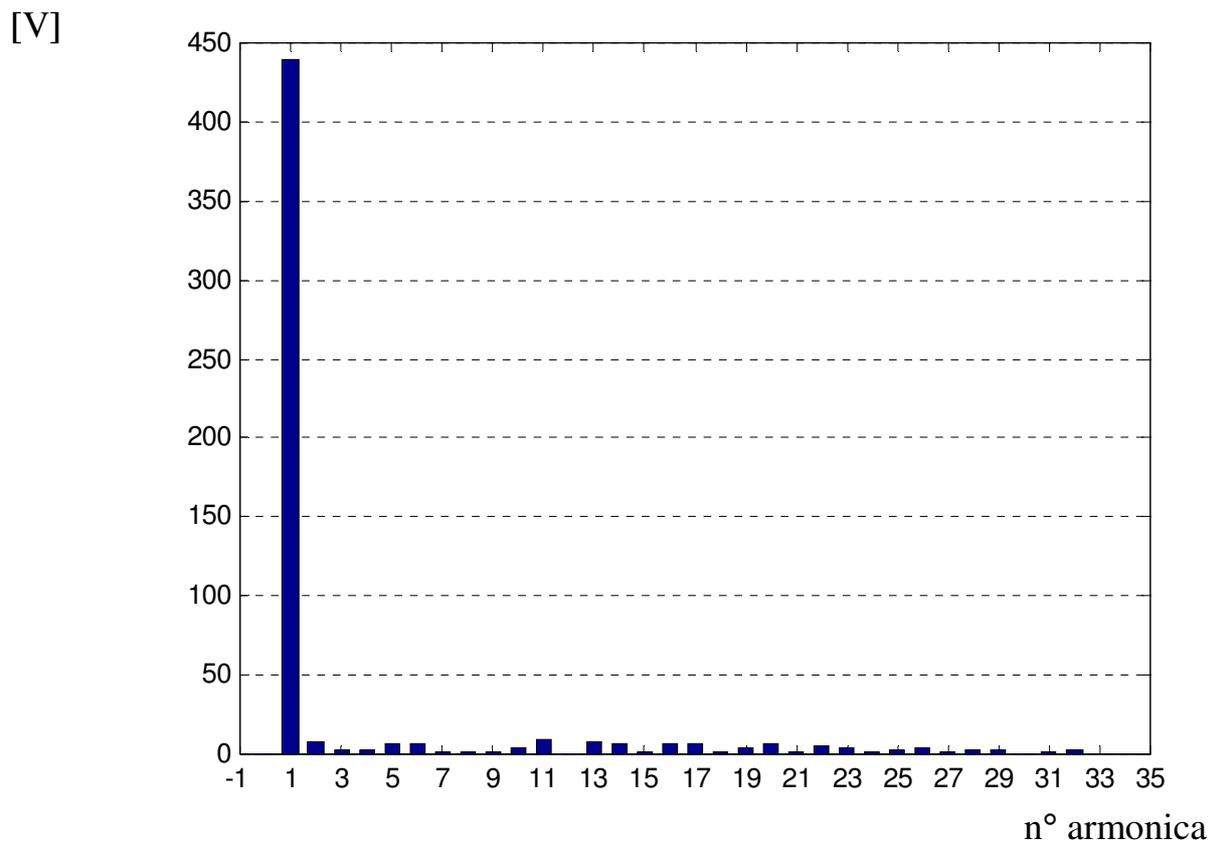


Figura 6.11 : tensione alla sbarra principale con il filtro, installati un generatore da 1500kVA e due motori di propulsione in linea alimentati a metà potenza

In tabella 6.4 sono riportati i valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.11).

<b>COMPONENTE ARMONICA</b>	<b>VALORE TENSIONE EFFICACE [ Va ]</b>
Fondamentale	439.79
2 <sup>a</sup>	7.91
3 <sup>a</sup>	2.78
4 <sup>a</sup>	2.40
5 <sup>a</sup>	6.60
6 <sup>a</sup>	7.07
7 <sup>a</sup>	1.53
8 <sup>a</sup>	1.36
9 <sup>a</sup>	0.87
10 <sup>a</sup>	4.16
11 <sup>a</sup>	9.81
12 <sup>a</sup>	0.64
13 <sup>a</sup>	7.89
14 <sup>a</sup>	7.19
15 <sup>a</sup>	0.80
16 <sup>a</sup>	6.82
17 <sup>a</sup>	7.06
18 <sup>a</sup>	0.70
19 <sup>a</sup>	4.59
20 <sup>a</sup>	6.30
21 <sup>a</sup>	0.82
22 <sup>a</sup>	5.40
23 <sup>a</sup>	4.14
24 <sup>a</sup>	0.66
25 <sup>a</sup>	2.56
26 <sup>a</sup>	3.87
27 <sup>a</sup>	0.90
28 <sup>a</sup>	3.29
29 <sup>a</sup>	2.23
30 <sup>a</sup>	0.53
31 <sup>a</sup>	1.51
32 <sup>a</sup>	2.61

Tabella 6.4 : valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.11)



In figura 6.12 : istogramma relativo alla tabella 6.4

Dai calcoli si ottiene che

$$\text{THD \%} = 5.82 \%$$

## 5.6.5 Forma d'onda e THD con due generatori da 375kVA e un propulsore a metà potenza alla frequenza di 50Hz con filtro

La forma d'onda della tensione alla sbarra principale (figura 6.13) e il calcolo del THD sono stati effettuati per la condizione di sistema a regime.

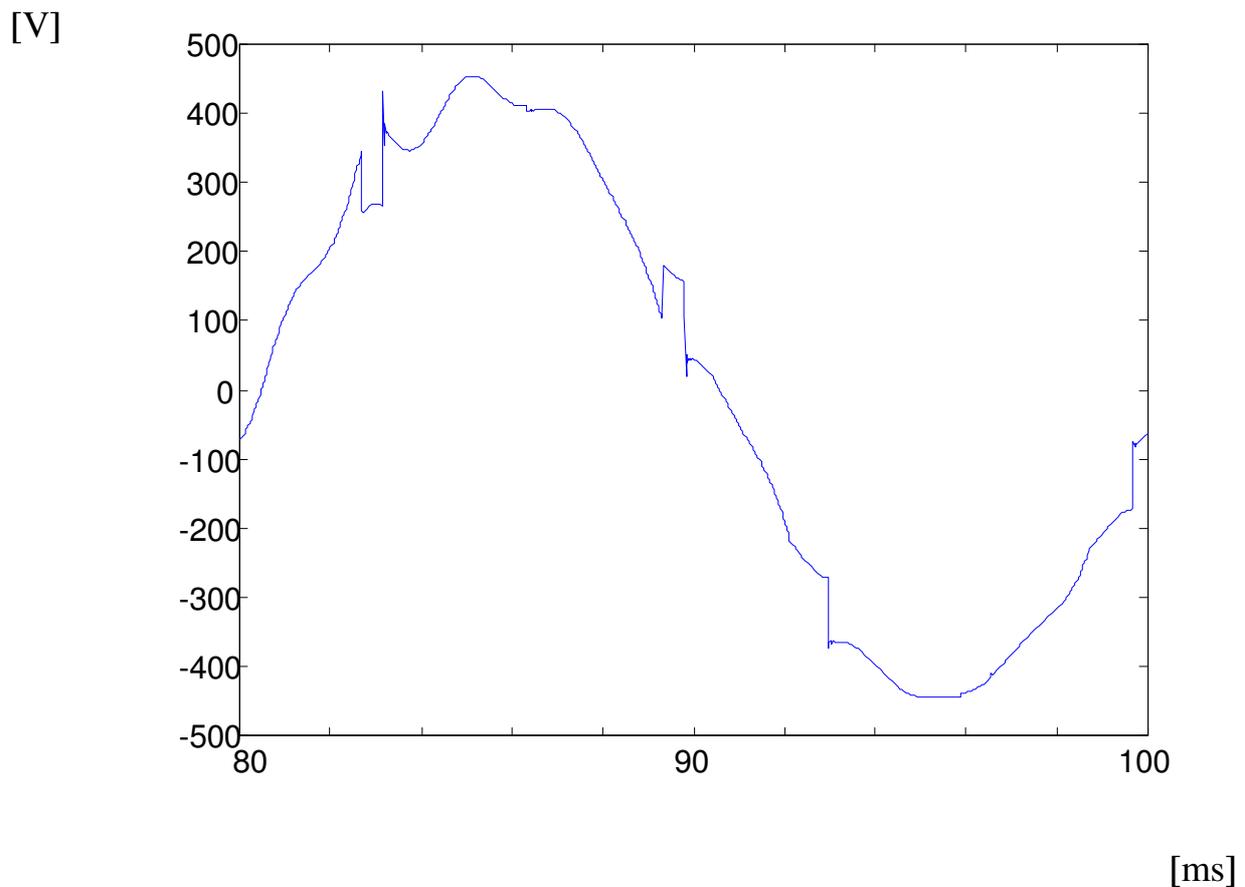


Figura 6.13 : tensione alla sbarra principale con il filtro, installati due generatori da 375kVA e un motore di propulsione in linea alimentato a metà potenza

In tabella 6.5 sono riportati i valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.13).

<b>COMPONENTE ARMONICA</b>	<b>VALORE TENSIONE EFFICACE [ Va ]</b>
Fondamentale	439.8
2 <sup>a</sup>	7.91
3 <sup>a</sup>	2.78
4 <sup>a</sup>	2.40
5 <sup>a</sup>	6.60
6 <sup>a</sup>	7.07
7 <sup>a</sup>	1.53
8 <sup>a</sup>	1.36
9 <sup>a</sup>	0.86
10 <sup>a</sup>	4.16
11 <sup>a</sup>	9.81
12 <sup>a</sup>	0.63
13 <sup>a</sup>	7.89
14 <sup>a</sup>	7.19
15 <sup>a</sup>	0.80
16 <sup>a</sup>	6.81
17 <sup>a</sup>	7.05
18 <sup>a</sup>	0.70
19 <sup>a</sup>	4.59
20 <sup>a</sup>	6.30
21 <sup>a</sup>	0.82
22 <sup>a</sup>	5.40
23 <sup>a</sup>	4.13
24 <sup>a</sup>	0.66
25 <sup>a</sup>	2.56
26 <sup>a</sup>	3.87
27 <sup>a</sup>	0.90
28 <sup>a</sup>	3.29
29 <sup>a</sup>	2.23
30 <sup>a</sup>	0.52
31 <sup>a</sup>	1.50
32 <sup>a</sup>	2.61

Tabella 6.5 : valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.13)

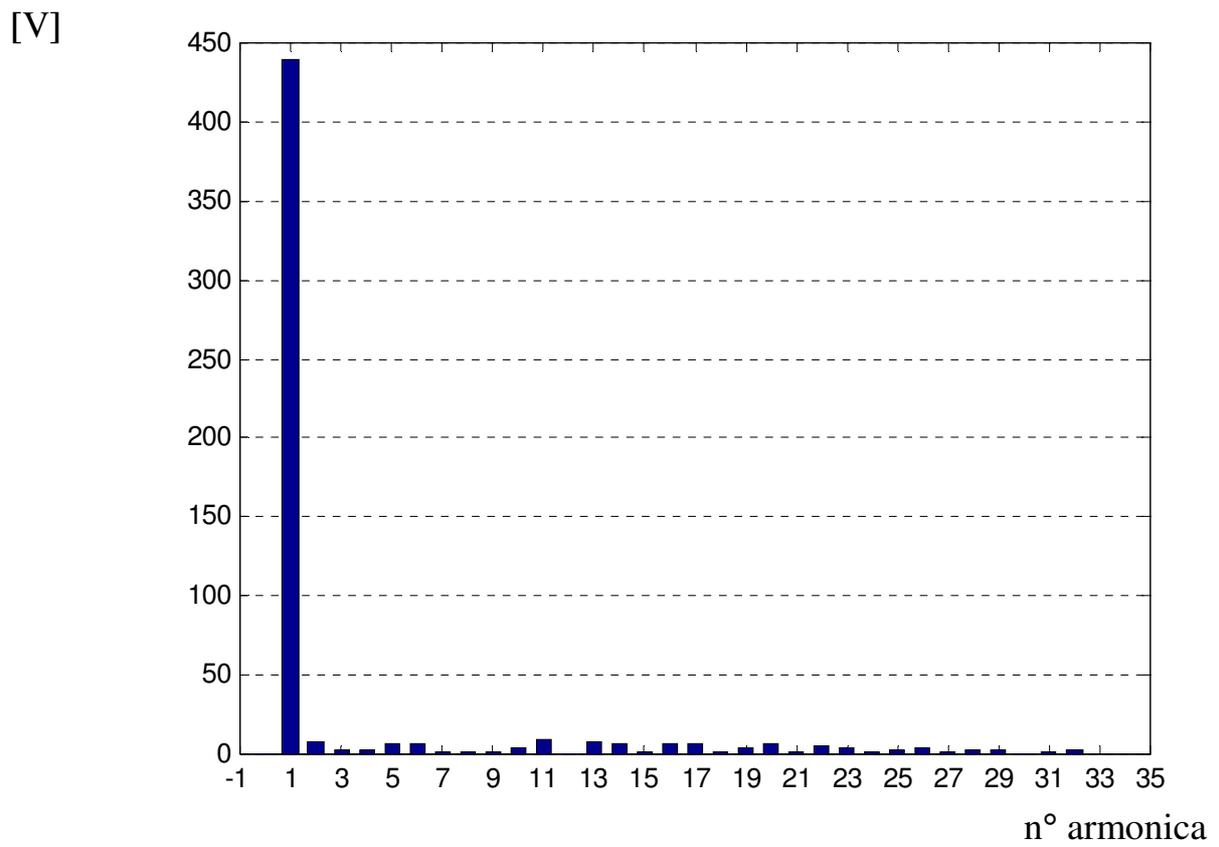


Figura 6.14 : istogramma relativo alla tabella 6.5

Dai calcoli si ottiene che

$$\text{THD \%} = 5.81 \%$$

### 5.6.6 Forma d'onda e THD con un generatore da 375kVA e uno da 1500kVA e due propulsori al 62.5% di potenza alla frequenza di 50Hz con filtro

La forma d'onda della tensione alla sbarra principale (figura 6.15) e il calcolo del THD sono stati effettuati per la condizione di sistema a regime.

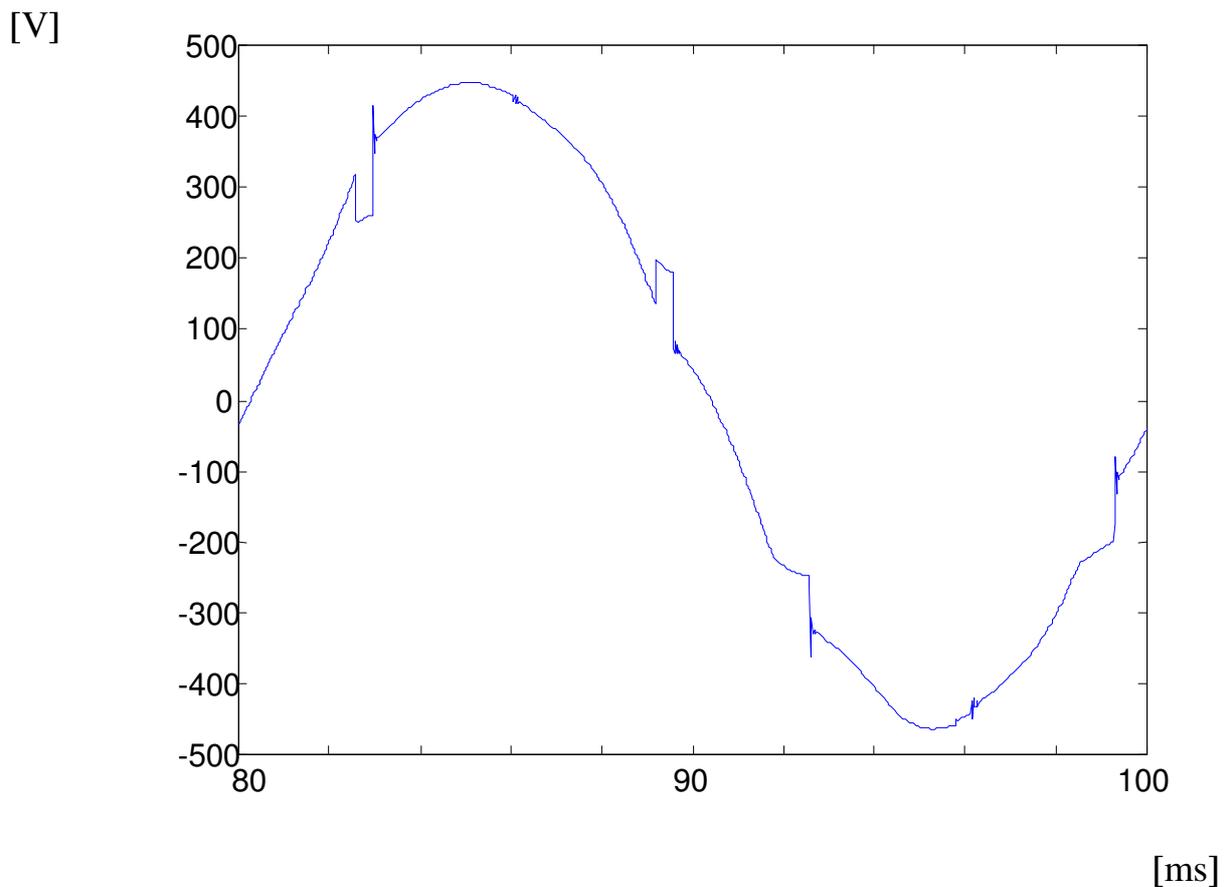


Figura 6.15 : tensione alla sbarra principale con il filtro, installati un generatore da 1500kVA e uno da 375kVA e un motore di propulsione in linea alimentato a metà potenza

In tabella 6.6 sono riportati i valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.15).

<b>COMPONENTE ARMONICA</b>	<b>VALORE TENSIONE EFFICACE [ Va ]</b>
Fondamentale	451.25
2 <sup>a</sup>	4.07
3 <sup>a</sup>	2.88
4 <sup>a</sup>	3.92
5 <sup>a</sup>	3.76
6 <sup>a</sup>	5.58
7 <sup>a</sup>	0.06
8 <sup>a</sup>	0.69
9 <sup>a</sup>	0.46
10 <sup>a</sup>	3.37
11 <sup>a</sup>	5.60
12 <sup>a</sup>	0.73
13 <sup>a</sup>	4.77
14 <sup>a</sup>	5.94
15 <sup>a</sup>	0.90
16 <sup>a</sup>	5.97
17 <sup>a</sup>	3.93
18 <sup>a</sup>	0.57
19 <sup>a</sup>	2.40
20 <sup>a</sup>	6.35
21 <sup>a</sup>	1.21
22 <sup>a</sup>	5.70
23 <sup>a</sup>	2.72
24 <sup>a</sup>	0.41
25 <sup>a</sup>	1.12
26 <sup>a</sup>	5.19
27 <sup>a</sup>	1.26
28 <sup>a</sup>	4.37
29 <sup>a</sup>	2.55
30 <sup>a</sup>	0.51
31 <sup>a</sup>	1.06
32 <sup>a</sup>	4.02

Tabella 6.6 : valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.15)

[V]

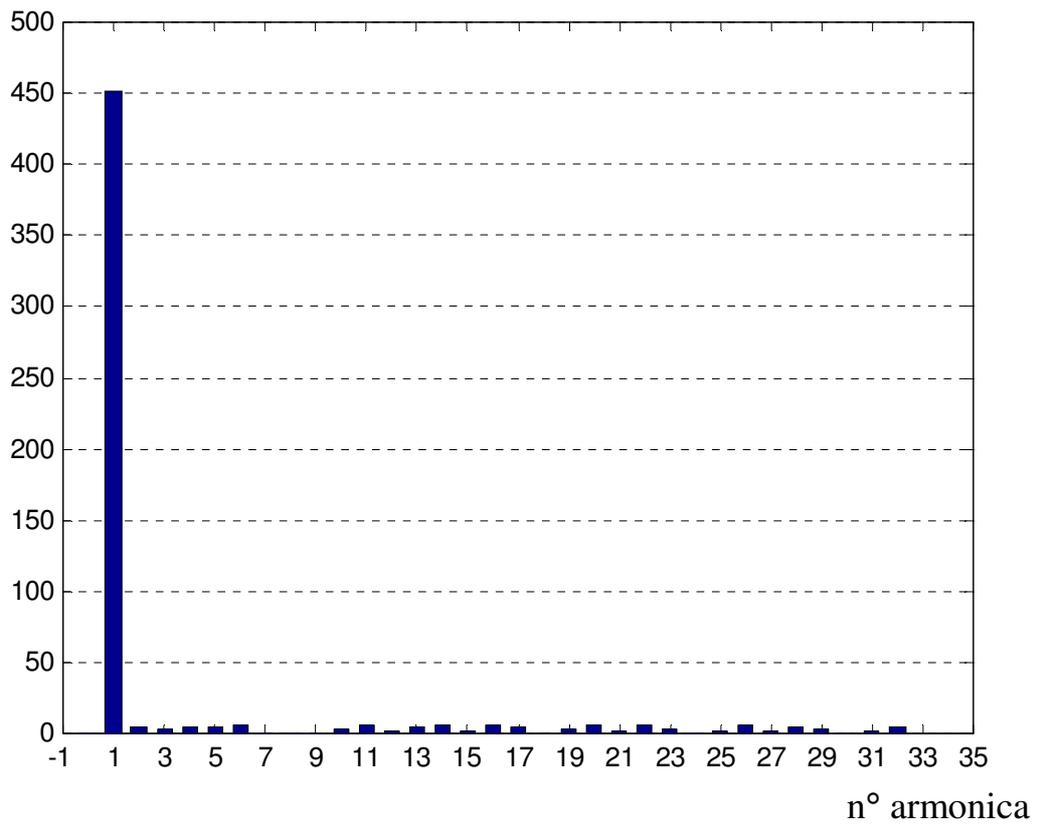


Figura 6.16 : istogramma relativo alla tabella 6.6

Dai calcoli si ottiene che

$$\text{THD \%} = 4.43 \%$$

### 5.6.7 Forma d'onda e THD con un generatore da 1500kVA e due generatori da 375kVA e due propulsori al 75 % di potenza alla frequenza di 50Hz con filtro

La forma d'onda della tensione alla sbarra principale (figura 6.17) e il calcolo del THD sono stati effettuati per la condizione di sistema a regime.

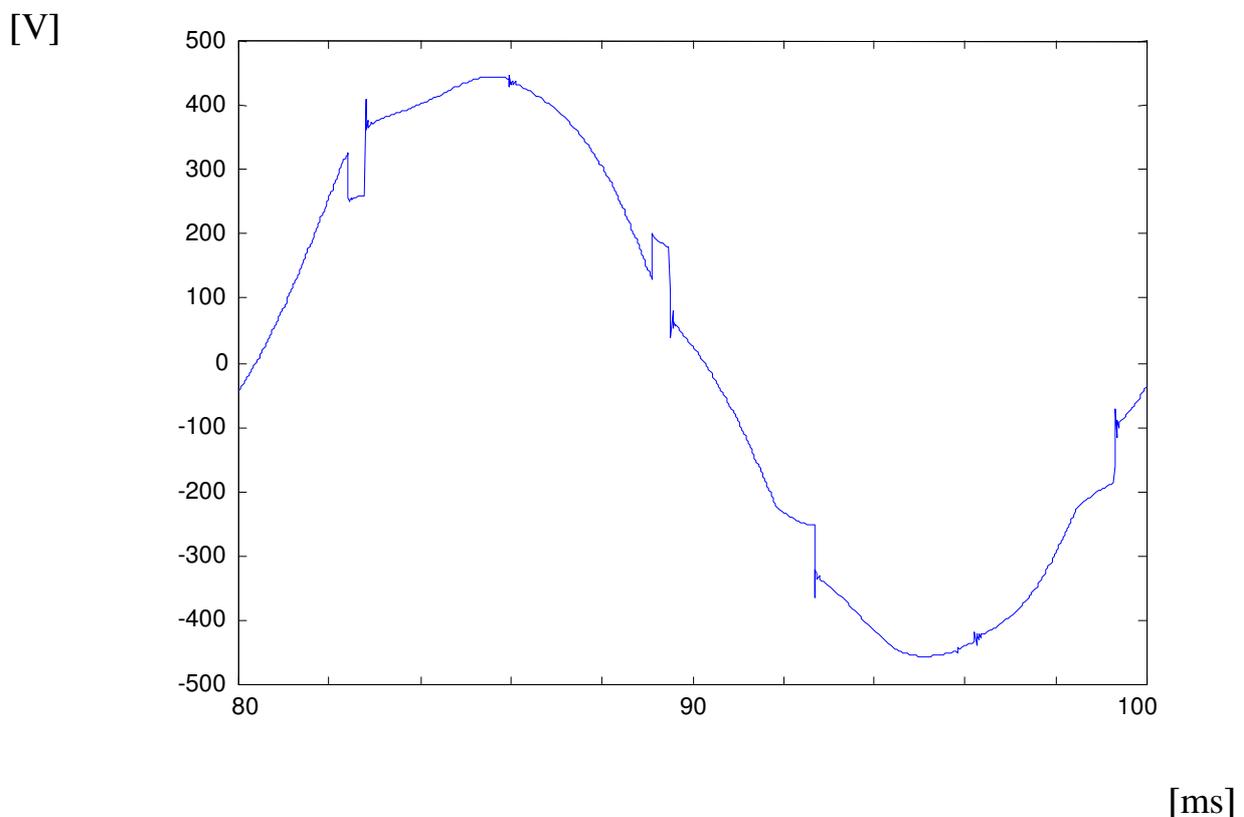


Figura 6.17 : tensione alla sbarra principale, installati due generatori da 375kVA e un motore di propulsione in linea alimentato a metà potenza con il filtro

In tabella 6.7 sono riportati i valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale con un (graficata in figura 6.17).

<b>COMPONENTE ARMONICA</b>	<b>VALORE TENSIONE EFFICACE [ Va ]</b>
Fondamentale	450.06
2 <sup>a</sup>	3.43
3 <sup>a</sup>	1.45
4 <sup>a</sup>	8.76
5 <sup>a</sup>	7.10
6 <sup>a</sup>	3.98
7 <sup>a</sup>	0.61
8 <sup>a</sup>	0.20
9 <sup>a</sup>	0.24
10 <sup>a</sup>	3.57
11 <sup>a</sup>	7.74
12 <sup>a</sup>	0.49
13 <sup>a</sup>	7.06
14 <sup>a</sup>	5.96
15 <sup>a</sup>	0.23
16 <sup>a</sup>	5.63
17 <sup>a</sup>	5.60
18 <sup>a</sup>	0.52
19 <sup>a</sup>	4.65
20 <sup>a</sup>	5.70
21 <sup>a</sup>	0.39
22 <sup>a</sup>	4.87
23 <sup>a</sup>	3.58
24 <sup>a</sup>	0.35
25 <sup>a</sup>	3.04
26 <sup>a</sup>	3.79
27 <sup>a</sup>	0.58
28 <sup>a</sup>	3.17
29 <sup>a</sup>	2.58
30 <sup>a</sup>	0.21
31 <sup>a</sup>	2.23
32 <sup>a</sup>	2.32

Tabella 6.7 : valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.17)

[V]

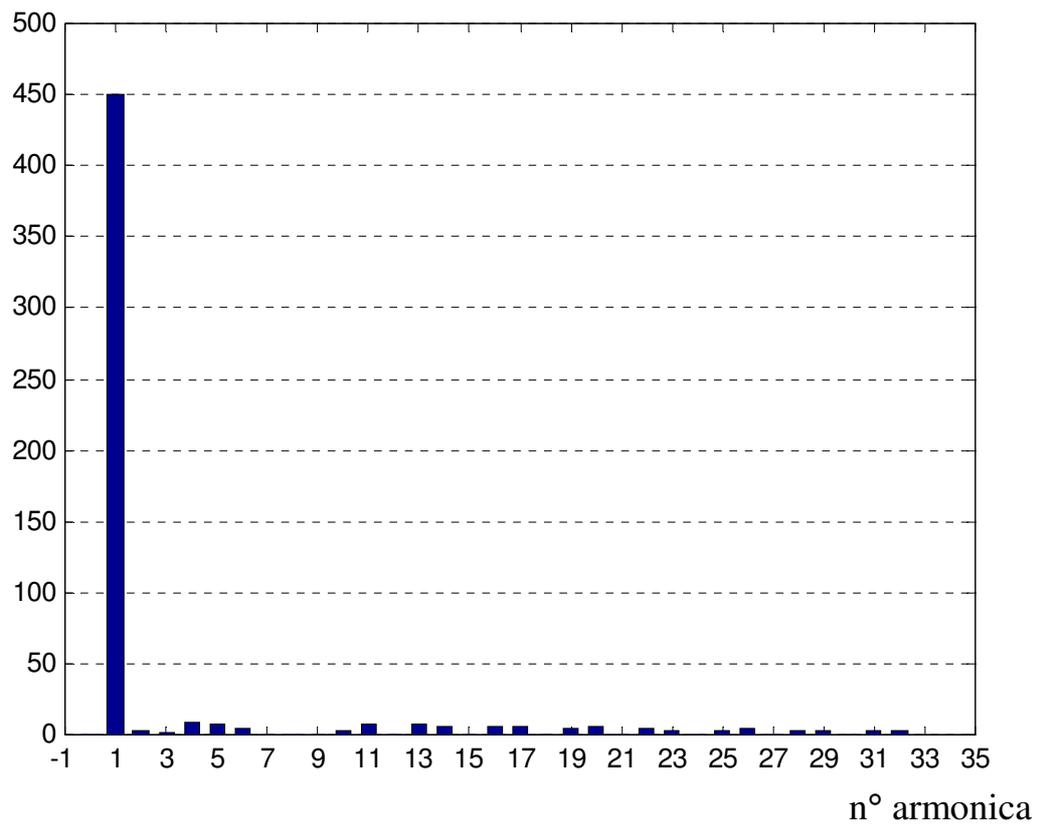


Figura 6.18 : istogramma relativo alla tabella 6.7

Dai calcoli si ottiene che

$$\text{THD \%} = 5.07 \%$$

### 5.6.8 Forma d'onda e THD con un generatore da

## 375kVA e due generatori da 1500kVA e due propulsori a piena potenza alla frequenza di 50Hz con filtro

La forma d'onda della tensione alla sbarra principale (figura 6.19) e il calcolo del THD sono stati effettuati per la condizione di sistema a regime.

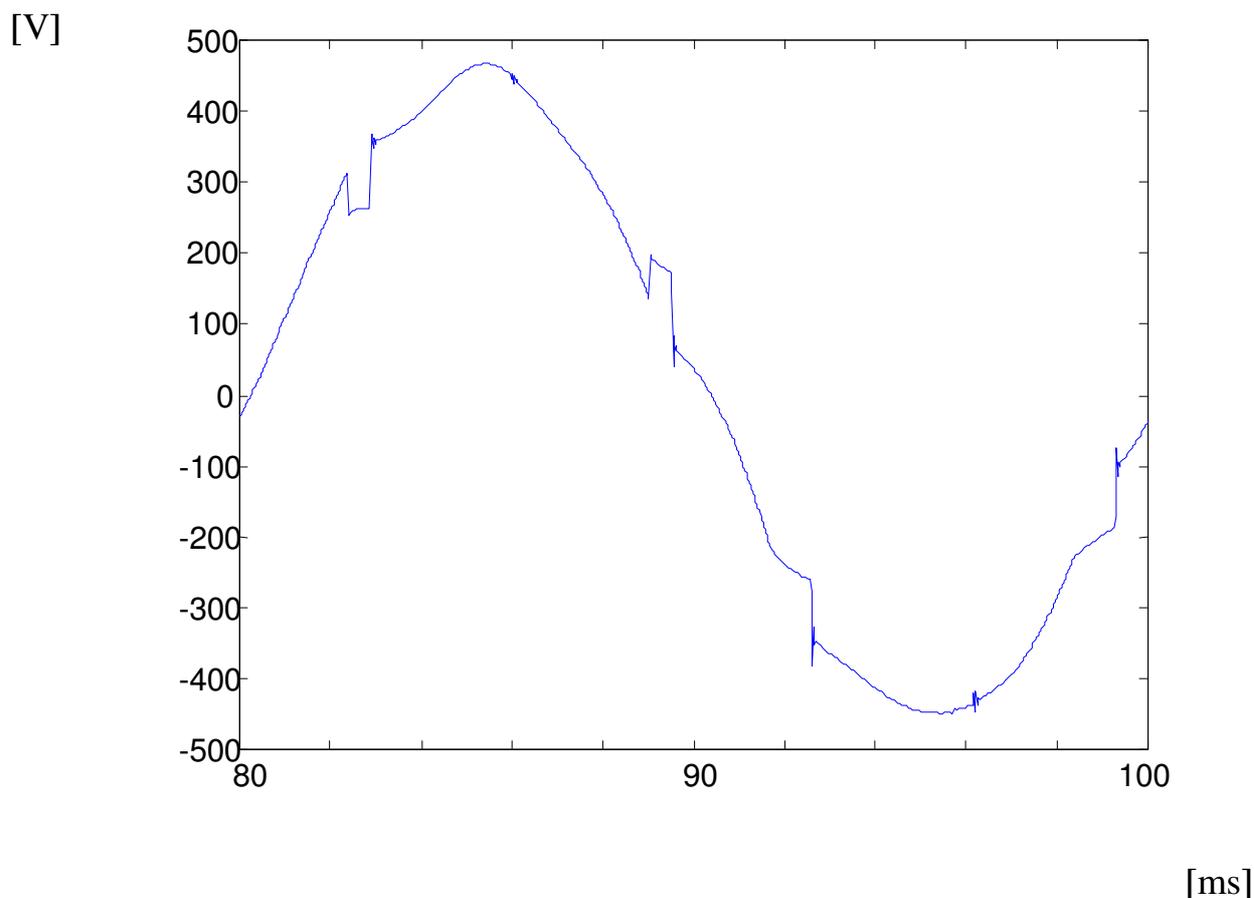


Figura 6.19 : tensione alla sbarra principale, installati due generatori da 375kVA e un motore di propulsione in linea alimentato a metà potenza con il filtro

In tabella 6.8 sono riportati i valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.19).

<b>COMPONENTE ARMONICA</b>	<b>VALORE TENSIONE EFFICACE [ Va ]</b>
Fondamentale	450.69
2 <sup>a</sup>	3.10
3 <sup>a</sup>	1.43
4 <sup>a</sup>	7.06
5 <sup>a</sup>	4.33
6 <sup>a</sup>	3.97
7 <sup>a</sup>	0.90
8 <sup>a</sup>	0.72
9 <sup>a</sup>	0.42
10 <sup>a</sup>	2.87
11 <sup>a</sup>	7.52
12 <sup>a</sup>	0.91
13 <sup>a</sup>	6.87
14 <sup>a</sup>	4.41
15 <sup>a</sup>	0.37
16 <sup>a</sup>	4.79
17 <sup>a</sup>	6.57
18 <sup>a</sup>	0.86
19 <sup>a</sup>	5.83
20 <sup>a</sup>	4.43
21 <sup>a</sup>	0.67
22 <sup>a</sup>	4.72
23 <sup>a</sup>	4.64
24 <sup>a</sup>	0.72
25 <sup>a</sup>	4.62
26 <sup>a</sup>	3.49
27 <sup>a</sup>	0.84
28 <sup>a</sup>	3.86
29 <sup>a</sup>	3.64
30 <sup>a</sup>	0.80
31 <sup>a</sup>	3.84
32 <sup>a</sup>	2.36

Tabella 6.8 : valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.19)

[V]

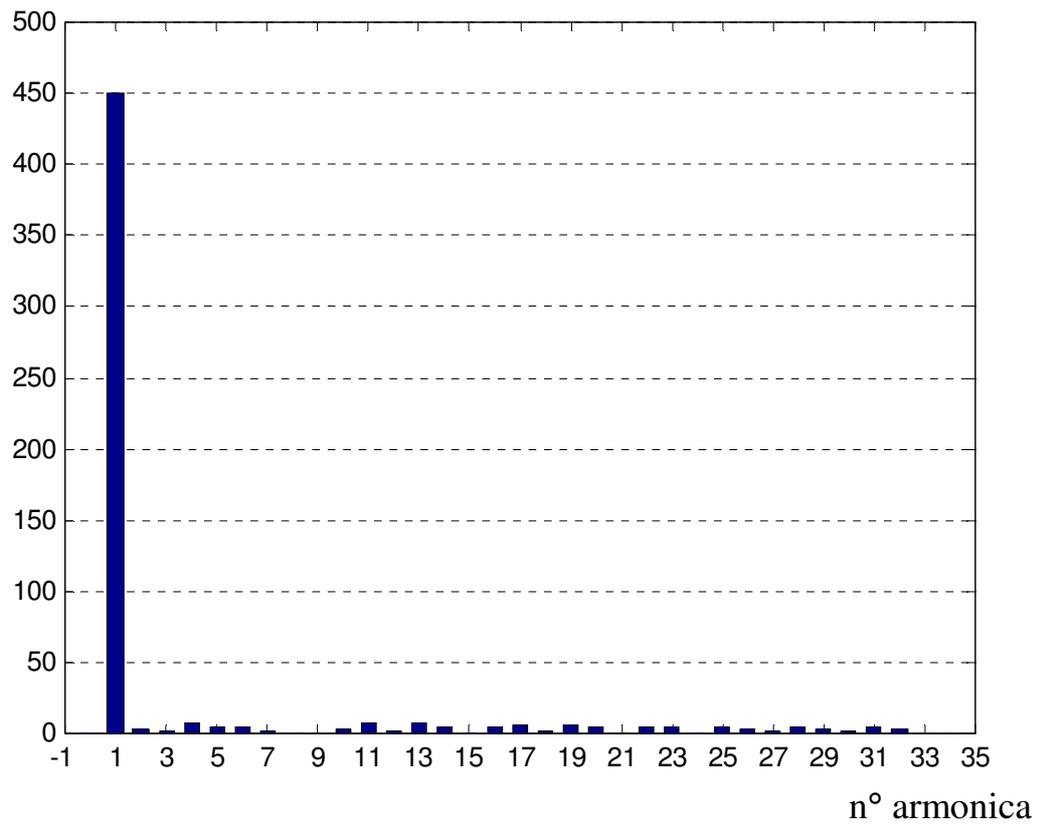


Figura 6.20 : istogramma relativo alla tabella 6.8

Dai calcoli si ottiene che

$$\text{THD \%} = 4.85 \%$$

### 5.6.9 Forma d'onda e THD con due generatore da 1500kVA e due generatori da 375kVA e due propulsori a piena potenza alla frequenza di 50Hz con filtro

La forma d'onda della tensione alla sbarra principale (figura 6.21) e il calcolo del THD sono stati effettuati per la condizione di sistema a regime.

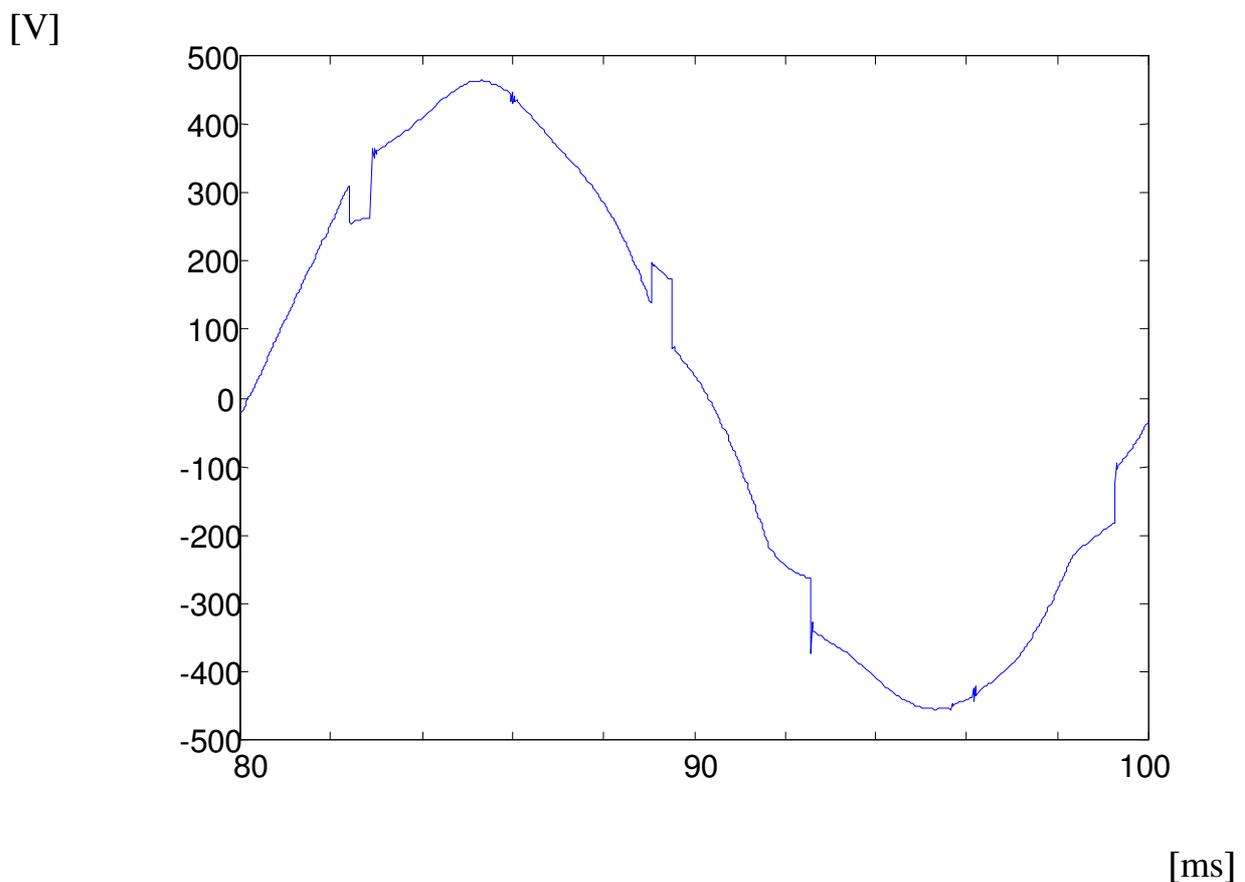


Figura 6.21 : tensione alla sbarra principale con il filtro, installati due generatori da 1500kVA e uno da 375kVA e un motore di propulsione in linea alimentato a metà potenza

In tabella 6.9 sono riportati i valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.21).

<b>COMPONENTE ARMONICA</b>	<b>VALORE TENSIONE EFFICACE [ Va ]</b>
Fondamentale	449.68
2 <sup>a</sup>	3.27
3 <sup>a</sup>	0.90
4 <sup>a</sup>	5.92
5 <sup>a</sup>	7.12
6 <sup>a</sup>	2.54
7 <sup>a</sup>	0.28
8 <sup>a</sup>	0.81
9 <sup>a</sup>	0.46
10 <sup>a</sup>	3.73
11 <sup>a</sup>	6.83
12 <sup>a</sup>	0.77
13 <sup>a</sup>	6.03
14 <sup>a</sup>	6.22
15 <sup>a</sup>	0.43
16 <sup>a</sup>	5.91
17 <sup>a</sup>	4.74
18 <sup>a</sup>	0.61
19 <sup>a</sup>	3.58
20 <sup>a</sup>	5.94
21 <sup>a</sup>	0.75
22 <sup>a</sup>	5.11
23 <sup>a</sup>	3.29
24 <sup>a</sup>	0.41
25 <sup>a</sup>	2.39
26 <sup>a</sup>	4.16
27 <sup>a</sup>	0.86
28 <sup>a</sup>	3.52
29 <sup>a</sup>	2.55
30 <sup>a</sup>	0.34
31 <sup>a</sup>	1.80
32 <sup>a</sup>	2.84

Tabella 6.9 : valori delle prime 32 armoniche di tensione alla sbarra principale (graficata in figura 6.21)

In figura 6.4.18 si riporta l'istogramma relativo alla tabella 6.4.17

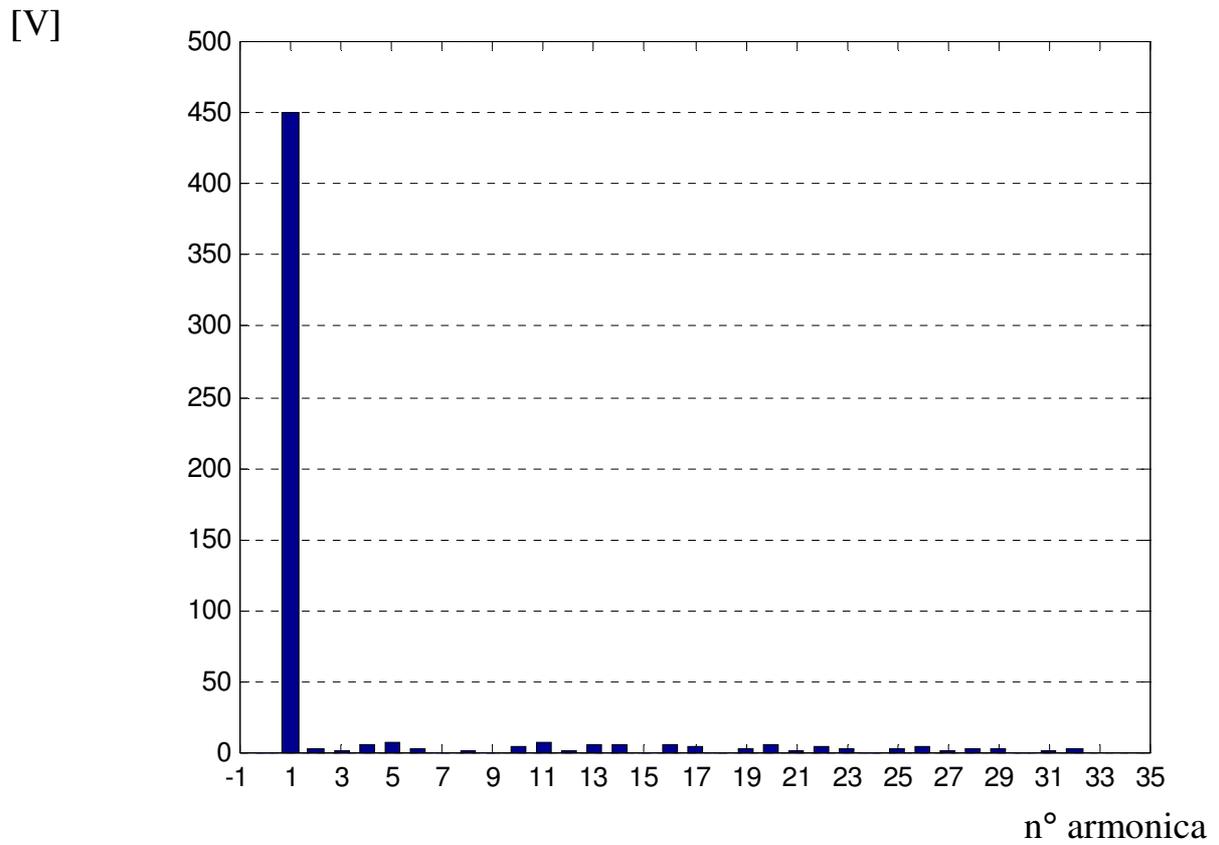


Figura 6.22 : istogramma relativo alla tabella 6.9

Dai calcoli si ottiene che

$$\text{THD \%} = 4.65 \%$$

## 5.7 Commento dei risultati e conclusioni

Per meglio commentare i risultati si riportano in tabella 6.10 i valori dei THD ottenuti in ciascun caso esaminato e i valori della 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> armonica di interesse dell'armatore.

CASO ESAMINATO	THD %	VALORE 11 <sup>a</sup> ARMONICA	VALORE 13 <sup>a</sup> ARMONICA
1 generatore da 1500KVA 1 propulsore (100 % di potenza) senza filtro, f = 50 Hz	16.74	17.21 V = 4,15%	16.36 V = 3.94%
1 generatore da 1500KVA 1 propulsore (100 % di potenza) con filtro, f = 50 Hz	6.28	9.99 V = 2.27%	8.66 V = 1.97%
1 generatore da 1500KVA 1 propulsore (100 % di potenza) con filtro, f = 52 Hz	7.89	5.17 V = 1.17%	6.92 V = 1.57%
1 generatore da 1500KVA 2 propulsore (50 % di potenza) con filtro, f = 50 Hz	5.82	9.81 V = 2.23%	7.89 V = 1.79%
2 generatore da 375KVA 1 propulsore (50 % di potenza) con filtro, f = 50 Hz	5.81	9,81 V = 2.23%	7.89 V = 1.78%
1 generatore da 1500KVA 1 generatore da 375KVA 1 propulsore (62.5 % di potenza) con filtro, f = 50 Hz	4.43	5.60 V = 1.24%	4.77 V = 1.06%
1 generatore da 1500KVA 2 generatore da 375KVA 1 propulsore (75 % di potenza) con filtro, f = 50 Hz	5.07	7,74 V = 1.72%	7,06 V = 1.57%
2 generatore da 1500KVA 1 generatore da 375KVA 1 propulsore (100 % di potenza) con filtro, f = 50 Hz	4.85	7.52 V = 1.67%	6.87 V = 1.52%
2 generatore da 1500KVA 2 generatore da 375KVA 1 propulsore (100 % di potenza) con filtro, f = 50 Hz	4.65	6,83 V = 1.52%	6,03 V = 1.34%

Tabella 6.10 : valori dei THD ottenuti in ciascun caso esaminato e i valori della 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> armonica di interesse dell'armatore

Si può notare come il THD stia in ogni caso sotto la soglia del 8%, anche nel caso di funzionamento più critico con i generatori che funzionano alla frequenza di 52Hz.

Inoltre, ad eccezione del caso di funzionamento più critico e dei casi in cui i propulsori in funzione sono fatti funzionare al più al 50%, si nota che il THD è contenuto dentro il 5% e quindi ben al di sotto dell' 8% richiesto a dimostrazione del buon calcolo effettuato per il filtro.

A conclusione dello studio effettuato, si può quindi affermare che il sistema elettrico del megayacht "**65M Yacht**" risulta conforme alle normative del "Lloyd's Register of Shipping" per quanto riguarda le armoniche di tensione sulla sbarra principale.

# Appendice

## Ponte di Graetz Semicontrollato

Questa appendice ha il compito di voler spiegare il funzionamento del ponte di Graetz semicontrollato in quanto in letteratura non sono stati trovati testi esaustivi sul suo funzionamento. Per descrivere tale funzionamento ci serviremo del programma Matlab, grazie al quale svolgeremo delle simulazioni ottenendo delle forme d'onda che andremo ad analizzare. Lo schema del ponte di Graetz semicontrollato è rappresentato in fig. 1.

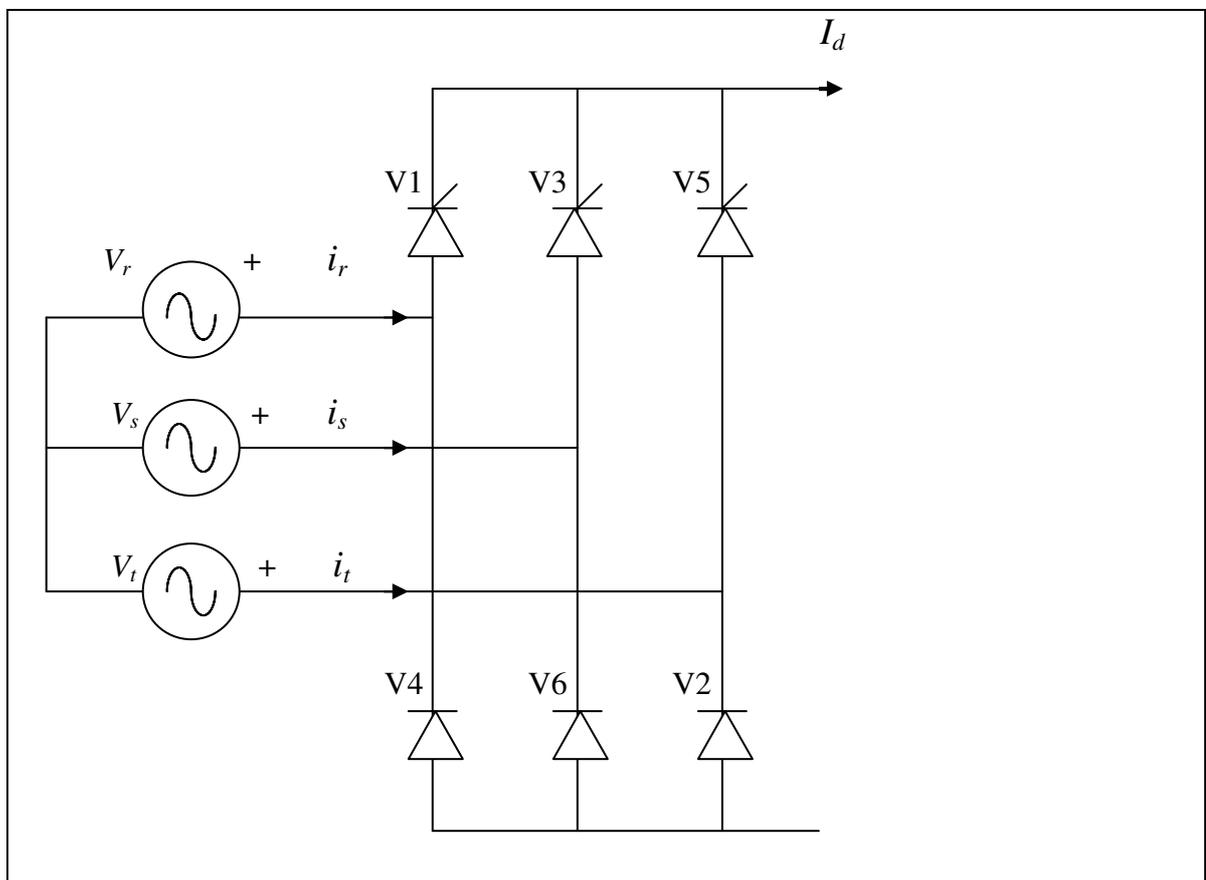


Fig. 1 : Schema di ponte di Graetz con alimentazione ideale.

Lo schema del ponte di Graetz semicontrollato differisce dallo schema del ponte di Graetz non controllato in quanto i tre diodi con catodo in comune sono stati sostituiti con tre tiristori (in modo da avere un punto comune per i circuiti di accensione), inoltre necessita di un sistema che sia in grado di dare gli impulsi di accensione ai tiristori in quanto essi non conducono più spontaneamente come avviene per i diodi appena vi è applicata la tensione. Gli impulsi per i tre tiristori sono calibrati sulle tensioni concatenate della rete di alimentazione e si susseguono ciclicamente ad ogni periodo in modo che i rispettivi tempi di conduzione e di blocco si avvicendino con lo stesso ritmo che caratterizza il funzionamento del ponte non controllato. I tre impulsi forniti sono sfasati di  $120^\circ$  per ogni periodo. Lo studio del ponte di Graetz semicontrollato è fatto in un primo momento per funzionamento idealizzato. Per funzionamento idealizzato intendiamo il funzionamento sotto le seguenti ipotesi:

1. l'alimentazione del ponte è costituita da un sistema simmetrico di sequenza diretta di forze elettromotrici;
2. le valvole (diodi o tiristori) hanno un comportamento ideale: accensione istantanea allorché la tensione anodo-catodo diviene positiva (diodi) o viene inviato l'impulso di gate (tiristori), spegnimento istantaneo allorché la corrente diviene negativa, tensione diretta in fase di conduzione nulla, corrente inversa in fase di interdizione nulla;
3. la deionizzazione dei tiristori è istantanea, nel senso che dopo lo spegnimento per tensione inversa, può essere immediatamente applicata una tensione diretta senza che il tiristore riprenda la conduzione.

Di queste ipotesi, quelle che comportano approssimazioni più consistenti sono la 1 e la 3. Per quanto riguarda la 2, essa è accettabile anche per conti di notevole precisione, salvo la parte riguardante lo spegnimento in quanto esso avviene dopo che la corrente inversa ha raggiunto un valore non infinitesimo  $I_{rr}$ , il che ha conseguenze sul dimensionamento degli elementi del convertitore e sulle forme d'onda, come sarà visto in seguito. Sotto queste ipotesi, e con la terminologia rappresentata nella fig. 1, il funzionamento del ponte (con angolo di accensione  $\alpha=0$ ) è rappresentato in fig. 2.

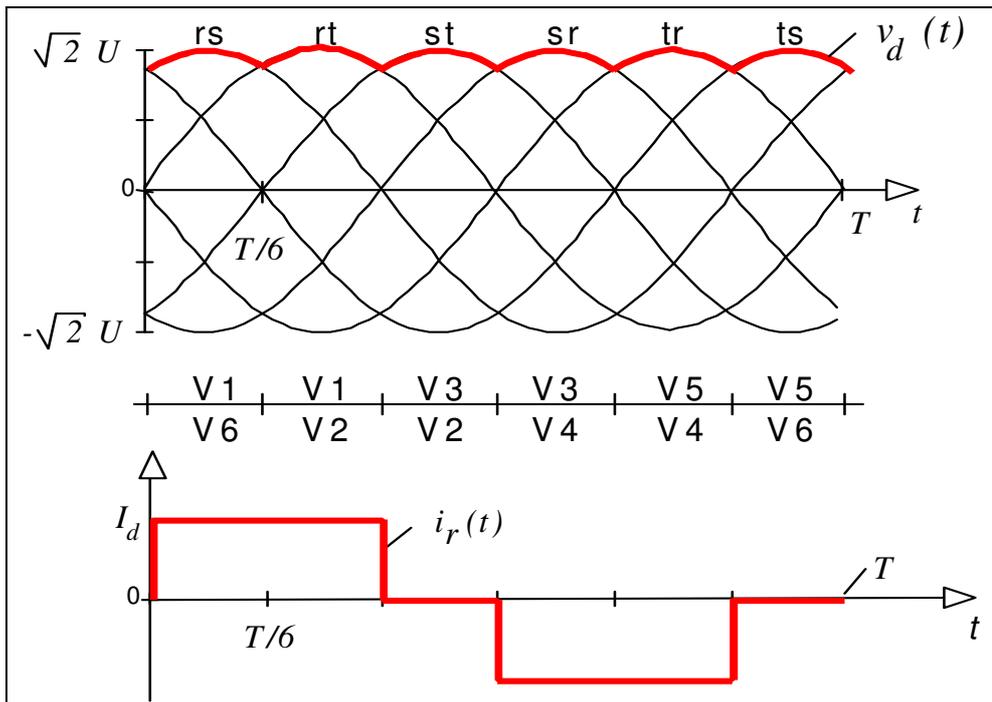


Fig. 2: Funzionamento idealizzato di ponte di Graetz semi controllato con  $\alpha=0$

La tensione  $v_d$ , che si vede in ogni istante sul lato DC, è la più alta fra le tensioni concatenate e l'opposto delle stesse. La forma d'onda è quindi periodica di periodo  $T/6$ , essendo  $T$  il periodo della tensione di alimentazione. Ogni valvola rimane in conduzione  $120^\circ$ . Il valor medio  $V_d$  della tensione continua è :

$$V_d = (3 / \pi) U_{cM} ( 1 + \cos\alpha ) (1/ 2)$$

Rispetto al valore massimo di tensione continua  $V_d$ , che si ha con  $\alpha=0$ , con  $\alpha \neq 0$  si ha una riduzione del fattore  $( 1 + \cos\alpha ) (1/ 2)$ .

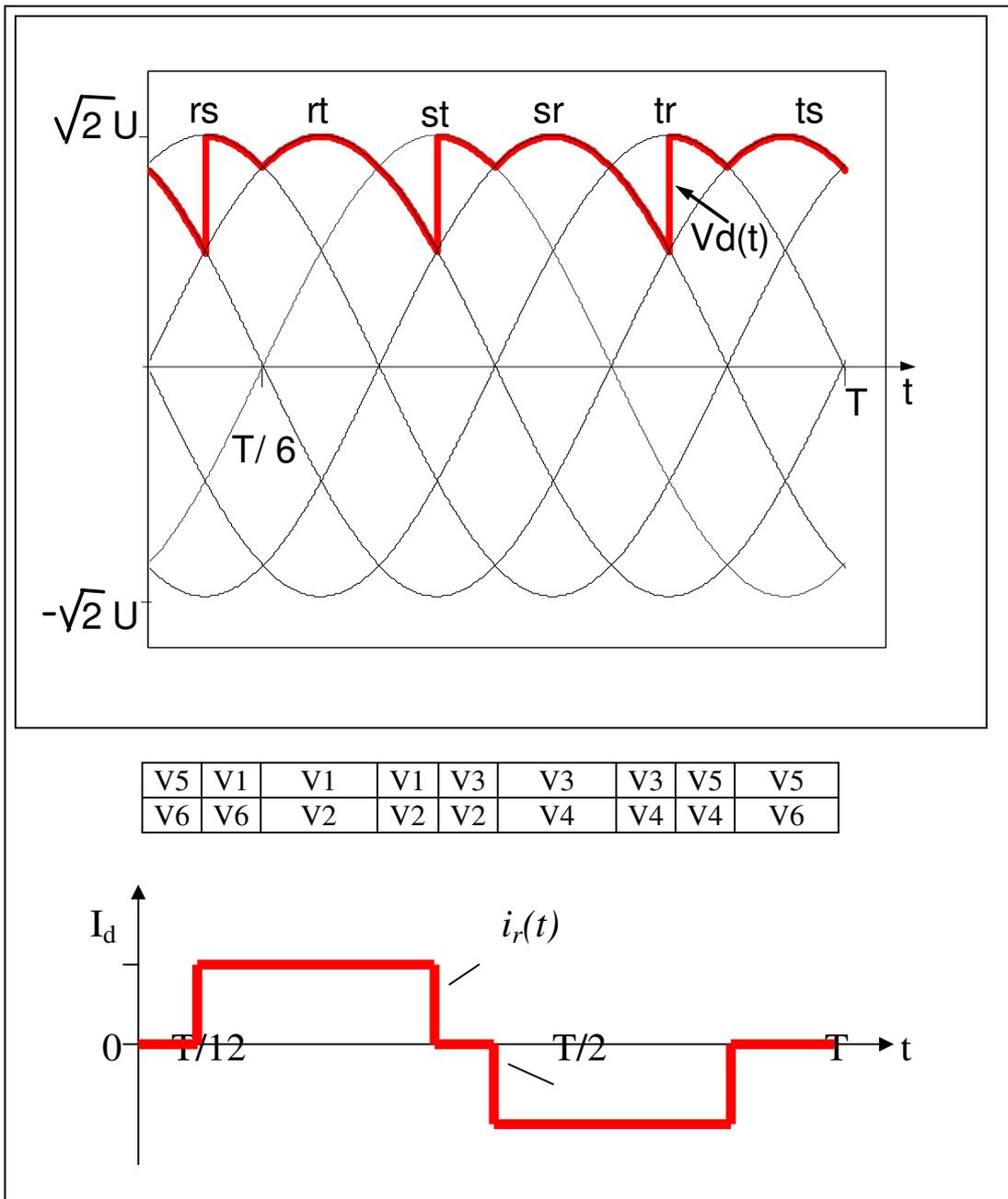


Fig. 3: Tensione del ponte di Graetz semicontrollato con  $\alpha=30^\circ$  per funzionamento ideale

Dalla fig. 3 si nota che, mentre la conduzione di ogni diodo ha inizio e termine come nella fig. 2 per un periodo di  $T/6$ , la conduzione di ogni tiristore ha inizio e termine, rispetto alla fig. 2, con un ritardo pari all'angolo di accensione dei tiristori ( $\alpha$ ) per un periodo di  $T/6$ . Questo comporta che le correnti di fase lato alternata abbiano la componente di corrente dovuta al tiristore sfasata dell'angolo di accensione del tiristore mentre resta invariata la componente dovuta al diodo.

Andiamo a vedere gli effetti della commutazione sul ponte di Graetz semicontrollato sotto le seguenti ipotesi:

1. sistema lato AC schematizzabile mediante una terna simmetrica di tensioni dietro una induttanza  $L_c$  (detta induttanza di commutazione);
2. corrente lato DC a profilo costante;
3. valvole con un comportamento ideale: accensione e spegnimento istantanei, tensione diretta in fase di conduzione nulla, corrente inversa in fase di interdizione nulla.

La presenza dell'induttanza di commutazione sull'alimentazione AC causa una modifica notevole del comportamento del ponte all'atto della *commutazione*, ovvero all'atto dell'accensione di una valvola ed il conseguente spegnimento dell'altra.

Il fenomeno della commutazione in presenza di reattanze di commutazione diverse da 0 può essere descritto mediante le figure di seguito riportate, relative in particolare alla commutazione della corrente dalla valvola V6 alla V2, ed i corrispondenti sviluppi analitici.

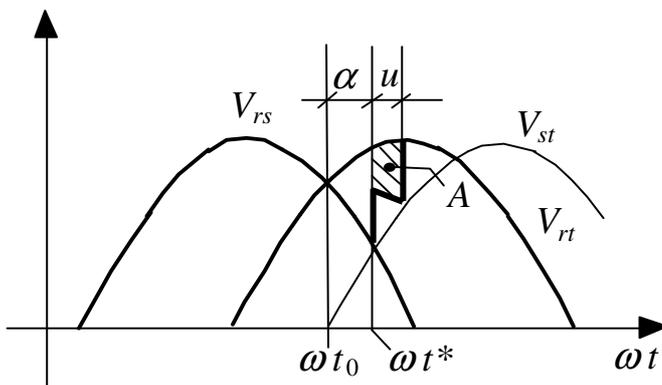


Fig. 4 : Schema per il calcolo della c.d.t. dovuta al fenomeno della commutazione con .

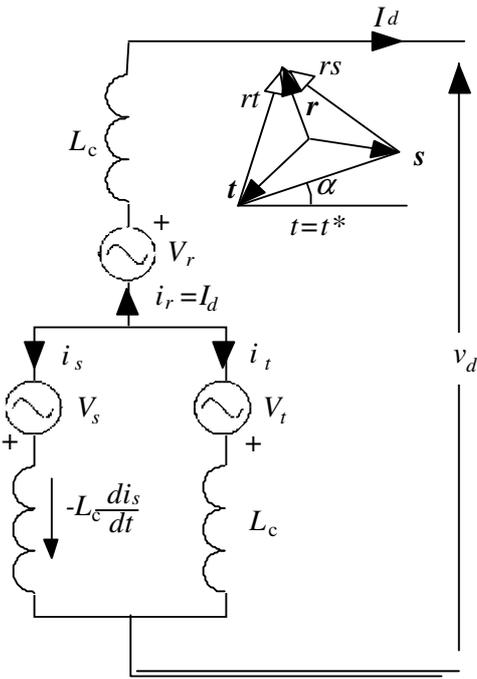


Fig. 5 : Rappresentazione circuitale del fenomeno della commutazione.

$$i_s + i_t = - I_d \Rightarrow (di_s/dt) = -(di_t/dt) \Rightarrow L_c(di_s/dt) = (v_s - v_t) / 2$$

$$v_s - L_c(di_s/dt) = v_t - L_c(di_t/dt) = v_t + L_c(di_s/dt)$$

$$v_d = v_r - [v_s - L_c(di_s/dt)] = v_r - (v_s + v_t) / 2$$

$$= (v_r / 2) + (v_r / 2) - (v_s + v_t) / 2 = (v_{rs} + v_{rt}) / 2$$

Quindi il valore istantaneo della tensione DC è pari alla media aritmetica delle tensioni in commutazione, come rappresentato in fig. 4.

La presenza dell'induttanza di commutazione sull'alimentazione AC causa una modifica notevole del comportamento del ponte all'atto della *commutazione*, ovvero all'atto dell'accensione di una valvola ed il conseguente spegnimento dell'altra.

Per quanto riguarda il valore istantaneo della corrente di fase durante la commutazione, essa vale, ad es. per la fase s:  $i_s = -(I_d + i_t)$

$i_s$  risolve la:

$$v_{st} = \sqrt{2} U \sin[\omega(t - t_0)] = 2L_c di_s/dt$$

e quindi è :

$$i_s(t) = -(\sqrt{2} U / 2\omega L_c) \cos [\omega(t - t_0)] + C \quad \text{per } t \geq t^* \quad (t^* = t_0 \text{ per } \alpha = 0)$$

con  $C$  tale che  $i_s(t^*) = -I_d$ .

Si vede come il decadimento di  $i_s$  è tanto più ripido quanto più piccola è  $L_c$ ; al limite per  $L_c \rightarrow 0$  si ottiene un segmento verticale. Quindi il valore istantaneo della tensione DC è pari alla media aritmetica delle tensioni in commutazione, come rappresentato in fig.5.3.

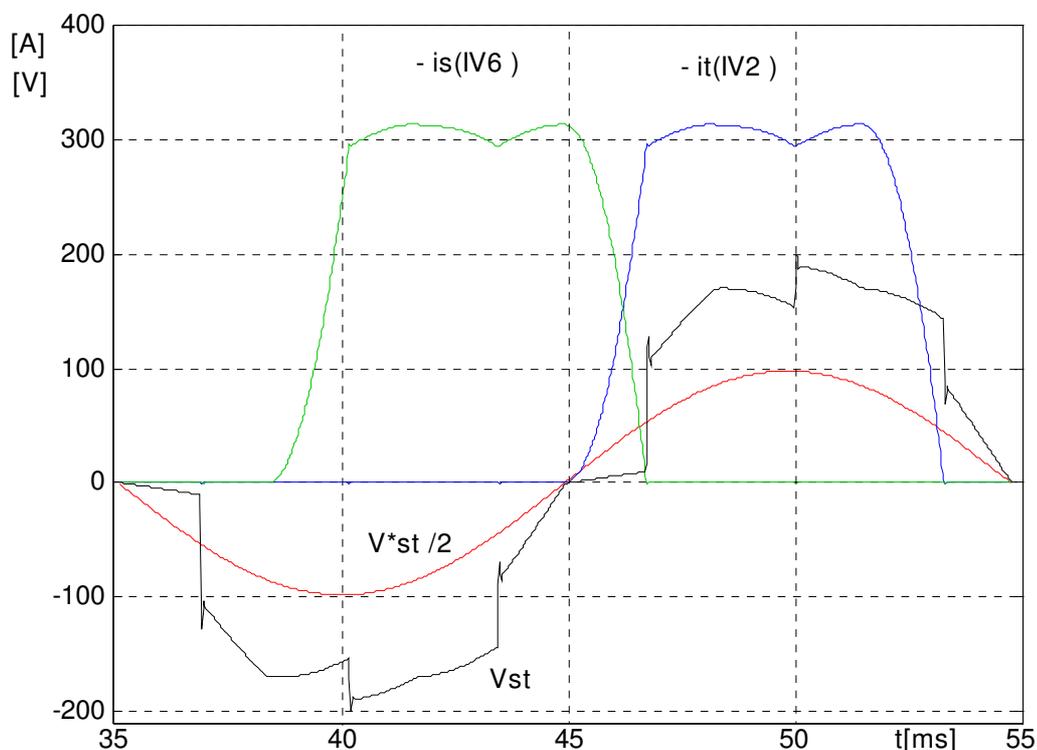


Fig. 5 : Rappresentazione delle correnti  $i_s$  e  $i_t$  in commutazione e delle tensioni  $V_{st}$  e  $V_{st}^*$  di alimentazione del convertitore rispettivamente a valle e a monte della reattanza di commutazione

La commutazione fra la fase  $s$  e la fase  $t$  in un raddrizzatore avviene, evidentemente, quando la tensione  $V_{st}$  diviene positiva.

Calcoliamo la perdita di tensione media dovuta al fenomeno della commutazione. A tal fine calcoliamo quanto vale l'area  $A$  rappresentata in fig. 4 presenza dell'induttanza di commutazione sull'alimentazione AC causa una modifica notevole del comportamento del ponte all'atto della *commutazione*, ovvero all'atto dell'accensione di una valvola ed il conseguente spegnimento dell'altra.

$$A = \int_{\alpha}^{\alpha+u} [v_{rt} - (v_{rs} + v_{rt})/2] d\omega t = \int [ (v_{rt} - v_{rs})/2 ] d\omega t = \int (v_{st}/2) d\omega t =$$

$$= \sqrt{2} U/2 \int_{\alpha}^{\alpha+u} \sin \omega t d\omega t = \sqrt{2} U/2 [ \cos \alpha - \cos(\alpha + u) ]$$

:

Si ricava dunque la caduta di tensione dovuta alla commutazione:

$$\Delta V_d = A / (2\pi/6) = A / (\pi/3) = (3U/\pi\sqrt{2}) [ \cos \alpha - \cos(\alpha + u) ]$$

e quindi anche:

$$V_d = V_{d0} [ 1 + \cos(\alpha + u) ]$$

Vediamo ora quale relazione lega l'angolo di commutazione con il valore della corrente DC  $I_d$ . Dalla espressione già ricavata della  $i_s(t)$ :

$$-i_s(t) = (\sqrt{2} U/2 \omega L_c) \{ \cos [\omega(t - t_0)] - \cos [\omega(t^* - t_0)] \} + I_d$$

per  $t' = t_0 + (u + \alpha)/\omega$  si ha :

$$0 = i_s(t') = (\sqrt{2} U/2 \omega L_c) [ \cos(u + \alpha) - \cos \alpha ] + I_d$$

e quindi (posto  $X_c = \omega L_c$ ):

$$I_d = (U/\sqrt{2} X_c) [ \cos \alpha - \cos(\alpha + u) ]$$

che è la relazione cercata che lega  $I_d$  alle altre grandezze, in particolare ad  $u$ .

E' importante notare come il rapporto  $\Delta V_d / I_d$  non dipenda dal punto di funzionamento del sistema:

$$\Delta V_d / I_d = (3U / \pi \sqrt{2}) / (U / \sqrt{2} X_c) = 3 X_c / \pi = \text{costante}$$

Si può pertanto dire che dal lato DC il sistema considerato è un bipolo avente per f.e.m.

$$V_d = V_{d0} (1 + \cos \alpha) \text{ e resistenza interna } R_x = 3 X_c / \pi$$

Fra le ipotesi enunciate all'inizio del presente paragrafo sul funzionamento delle valvole del convertitore era quella di una caduta di tensione diretta, durante la conduzione, nulla. Nella realtà, durante il funzionamento la corrente che arriva sul lato DC attraversa sempre due valvole poste in serie, sulle quali si ha una caduta di tensione pari al doppio della caduta di tensione diretta della singola valvola. Questa caduta può con buona approssimazione considerarsi indipendente da  $I_d$ .

Di conseguenza, la caratteristica esterna del sistema visto dal lato DC è del tipo rappresentato nella figura seguente.

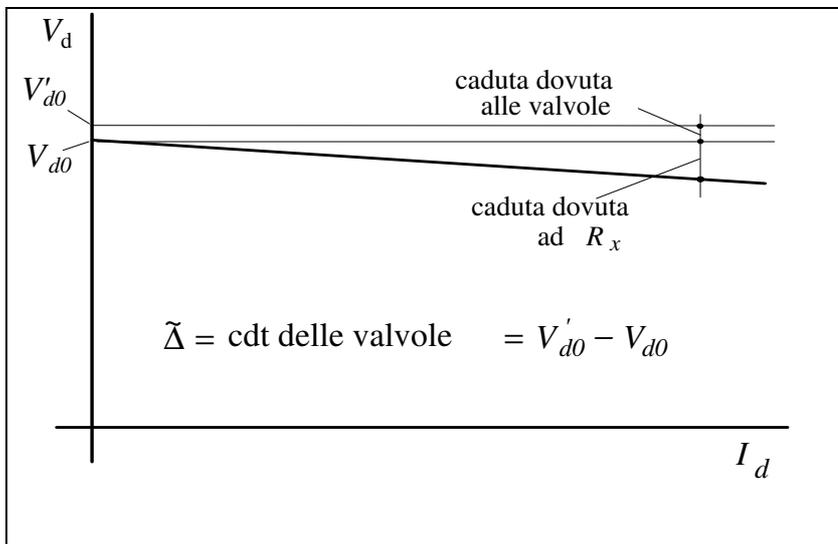


Fig.6 : Caratteristica lato DC di un convertitore di Graetz trifase.

Nei calcoli semplificati che spesso si fanno la caduta delle valvole è di norma omessa, salvo poi tenerne eventualmente conto per calcoli di rendimento. Anche qui, in conseguenza di suddette ipotesi, si segue questo approccio.

In conseguenza di quanto visto finora, trascurando la caduta diretta delle valvole, una rappresentazione equivalente lato DC del ponte di Graetz trifase (ai fini del calcolo dei valori medi delle grandezze, e non, ovviamente le armoniche) è quella riportata in fig.7, nella quale:

$$V_{d0} = 3 \sqrt{2} U / \pi$$

e il diodo è stato inserito per imporre anche nella rappresentazione equivalente la caratteristica naturale del ponte di poter condurre la corrente soltanto nel verso coerente con il verso di conduzione diretta delle sue valvole.

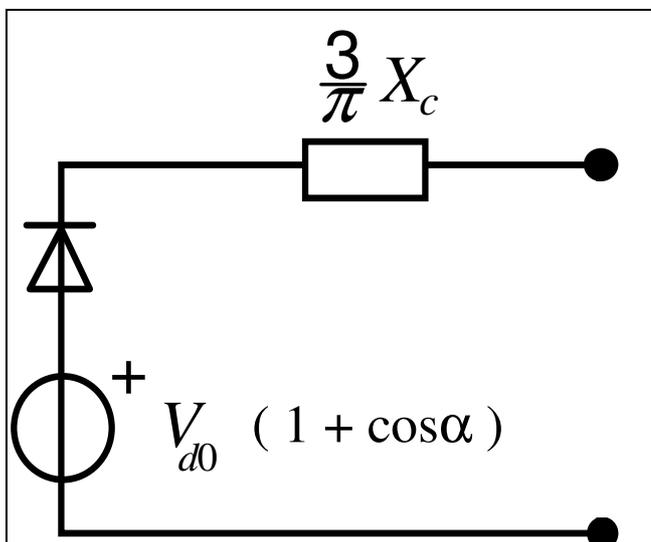


Fig7: Equivalente DC del Ponte di Graetz

E' importante chiarire che il circuito di fig. 7, non può essere utilizzato per calcoli energetici. In particolare il modello che abbiamo fatto del convertitore trascura tutti gli effetti dissipativi, e pertanto sussiste l'uguaglianza fra la potenza DC e quella AC, sia istantanea che sui valori medi. La potenza erogata al carico DC è quindi quella a valle del resistore  $(3/\pi)/X_c$  ed equivale a quella proveniente dal lato AC. La caduta di tensione sul resistore DC modella gli effetti della caduta che si ha in AC sulla reattanza di commutazione  $L_c$ , la quale è un elemento puramente reattivo e quindi non causa perdite di potenza e di energia.