



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Vittorio BUCCI

Progetto di impianti di propulsione navale

10.1 RICHIAMI E TERMINOLOGIA

Anno Accademico 2017/2018

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

La principale differenza fra un impianto elettrico di bordo ed un impianto elettrico terrestre è costituita dal fatto che quello di bordo è un impianto isolato in cui le distanze fra la centrale di generazione e gli utenti sono relativamente brevi, mentre nell'impianto terrestre sono presenti linee di trasmissione lunghe centinaia di chilometri con parecchie stazioni di trasformazione della tensione distribuite lungo la rete e sistemi di controllo separati per le varie sezioni dell'impianto.

Brevi distanze e potenze installate sempre crescenti fanno sì che a bordo le correnti e le forze elettrodinamiche che si sviluppano in caso di corto circuito siano di intensità elevata : ciò impone criteri di progettazione dell'impianto tali da garantire la sicurezza e la continuità del servizio in caso di guasto.

Negli impianti di bordo la tensione di produzione coincide con la tensione di distribuzione primaria.

L'energia elettrica primaria viene utilizzata direttamente dagli utenti più grandi.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Tensione e frequenza degli impianti elettrici di bordo

Gli impianti elettrici di bordo sono in corrente alternata. L'impiego della corrente continua è limitato ad impianti speciali (automazione, rilevazione ed allarme incendio, ecc.)

Di uso comune sono i sistemi in corrente alternata trifase con frequenza di 50 Hz (standard europeo) o 60 Hz (standard americano, internazionalmente più diffuso).

Rispetto al sistema a 50 Hz, il sistema a 60 Hz presenta i seguenti vantaggi :

- i motori asincroni a 60 Hz hanno velocità maggiori. A parità di giri essi hanno un margine di potenza di circa il 20% rispetto a quelli a 50 Hz e si adattano meglio all'azionamento di pompe e ventilatori, gli utenti di gran lunga più numerosi a bordo;**
- in generale tutte le macchine elettriche con nuclei ferromagnetici a 60 Hz risultano più leggere e meno ingombranti;**
- poiché la reattanza dei cavi elettrici cresce con la frequenza di rete, le linee a 60 Hz hanno una maggiore impedenza e di conseguenza valori più ridotti di corrente in caso di guasto.**

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

A seconda della potenza installata, l'impianto può essere in bassa tensione ($V < 1.000$ volt) o in media tensione ($1.000 \leq V \leq 11.000$ volt).

Impianti in bassa tensione

Quando la potenza totale installata dei generatori è inferiore a 4.000 kW, i valori possibili di tensione sono :

- 380 – 400 – 690 V a 50 Hz
- 440 – 450 – 480 – 690 V a 60 Hz

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Impianti in media tensione

Le tensioni di 3300 – 6600 V a 60 Hz si adottano quando la potenza totale installata dei generatori è compresa fra 4.000 e 20.000 kW.

La tensione di 3.300 V è usata meno di frequente e solo per le potenze inferiori.

La tensione di 11.000 V a 60 Hz si adotta quando la potenza totale installata dei generatori è superiore a 20.000 kW.

Il vantaggio nell'uso della media tensione è che, per una data potenza, le correnti sono più basse. Ricordiamo che la capacità dei componenti elettrici è limitata dalla corrente nominale e dalla corrente di guasto in caso di corto circuito. E' il caso soprattutto degli interruttori usati per connettere e disconnettere i generatori e gli utenti ai quadri o per connettere e disconnettere diverse parti dei quadri fra loro. Nel caso della media tensione le correnti in gioco sono minori. Tuttavia, poichè sono maggiori i valori di tensione, i componenti usati dovranno possedere migliori caratteristiche di isolamento.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Consideriamo ad esempio gli **interruttori**.

Il problema fondamentale dell'interruzione dei circuiti elettrici è lo spegnimento dell'arco che si innesca tra gli elettrodi all'apertura dell'interruttore. La soluzione consiste nel raffreddare l'aria, cioè il mezzo isolante interposto fra gli elettrodi, in modo che essa riacquisti il valore primitivo di rigidità dielettrica e si estingua così l'arco.

Negli impianti in bassa tensione si possono usare interruttori isolati in aria.

Negli impianti in media tensione si usano interruttori in cui l'isolante fra gli elettrodi è un gas (SF₆) o il vuoto (vacuum breaker).

Per gli interruttori si definiscono i valori di :

- tensione nominale,
- corrente nominale,
- potere d'interruzione (massimo valore di corrente per cui l'interruttore può aprire il circuito senza danni),
- tempo totale di interruzione (intervallo di tempo fra comando di apertura ed estinzione dell'arco),
- potere di chiusura (massimo valore di corrente che l'interruttore può stabilire sotto corto circuito senza danneggiarsi).

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

In tutti i tipi di impianto (bassa e media tensione), vi sono utenti che necessitano di tensioni ridotte fornite dalla rete di distribuzione secondaria (230 – 115 V). L'impianto di monitoraggio e controllo è alimentato in corrente continua, solitamente a 24 V.

Le varie reti (media tensione, se presente, bassa tensione e rete in corrente continua), sono alimentate dalla centrale elettrica principale o direttamente o tramite dispositivi di conversione dell'energia (trasformatori, raddrizzatori, convertitori).

Accanto ai sistemi di alimentazione primaria e secondaria, l'impianto elettrico di bordo deve avere un sistema di alimentazione di emergenza indipendente, costituito in genere da un gruppo diesel generatore.

I requisiti del sistema di alimentazione di emergenza sono stabiliti dalle normative SOLAS e dalle normative dei Registri di Classifica, già esaminate in altra parte del corso.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Motori primi per generazione elettrica

Si usano quasi esclusivamente motori diesel “medium” o “high speed”.

Si possono usare anche turbine a gas e a vapore.

Vi sono casi in cui i generatori elettrici vengono mossi dai motori di propulsione o direttamente, o tramite prese di potenza con moltiplicatore di giri. Le normative stabiliscono che tali generatori possono essere considerati parte della centrale elettrica principale (“main power source”) solo se in grado di funzionare indipendentemente dalla velocità e dal senso di rotazione dell’impianto propulsivo, anche quando l’elica è ferma.

I motori primi per generazione elettrica funzionano a giri costanti.

I motori diesel sono direttamente accoppiati ai generatori.

Ricordando la relazione $f = p n / 60$ (f : frequenza in Hz, p : numero di coppie polari dell’alternatore, n : giri al minuto dell’alternatore), si hanno le seguenti velocità dei gruppi generatori :

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

p	n	n	Motore primo
	f = 50 Hz	f = 60 Hz	
1	3000	3600	Turboalternatore
2	1500	1800	Diesel high speed
3	1000	1200	Diesel medium speed per centrali elettriche ausiliarie (*)
4	750	900	
5	600	720	(*) e (**)
6	500	600	Diesel medium speed per centrali elettriche su navi a propulsione elettrica (**)
7	428.6	514.3	
8	375	450	
9	333.3	400	

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

I motori diesel “high speed” sono leggeri e compatti; richiedono combustibili distillati.

I diesel “medium speed” funzionano a nafta pesante, in genere la stessa usata dal motore principale.

Le turbine a gas sono leggere e molto compatte ma usano combustibile distillato di alta qualità (gasolio) ed hanno basso rendimento.

Le turbine a vapore sono usate oggi molto raramente. Esempi di applicazione :

- **turbonavi per trasporto di gas metano liquefatto (LNG carriers) che usano il gas evaporato dal carico nell’impianto di propulsione (caldaie “dual fuel” e turbine a vapore);**
- **turbonavi passeggeri / crociera a propulsione elettrica in cui la generazione è effettuata con turbine a gas e a vapore di recupero in ciclo combinato (COGES);**
- **motonavi portacontenitori con motori propulsivi diesel due tempi di grandissima potenza (oltre 50 MW) in cui il recupero di calore dei gas di scarico è in grado di sostenere il funzionamento di un turboalternatore a vapore.**

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Generatori elettrici

In molti casi il generatore elettrico viene assemblato assieme al motore primo e ai sistemi ausiliari su una sottobase comune. Ciò avviene, di regola, per i diesel generatori in cui il motore ha cilindri di diametro non superiore a 400 mm. In questo caso il motore diesel è completo di coppa dell'olio e pompe ausiliarie trascinate per l'acqua di raffreddamento e l'olio. Il fissaggio del motore e del generatore alla sottobase comune è di tipo rigido. Motore e generatore sono accoppiati tramite giunto elastico. L'intera sottobase con il gruppo diesel-generatore è a sua volta fissata allo scafo tramite elementi elastici (resilienti).

Per motori con cilindri di diametro superiore ai 400 mm si ha in genere il montaggio a scafo con elementi resilienti del solo motore diesel, mentre l'alternatore è montato rigidamente. Il pozzetto dell'olio del motore è ricavato entro il doppiofondo dello scafo con intercapedine. L'accoppiamento fra motore e alternatore avviene sempre tramite giunto elastico, in questo caso ancor più sollecitato dalle oscillazioni relative fra motore (sospeso elasticamente) e alternatore (fisso).

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

I generatori sono quasi universalmente alternatori di tipo sincrono trifase, usati anche su navi con impianti in corrente continua (sottomarini). In questi casi la corrente continua per la ricarica delle batterie di accumulatori viene ottenuta tramite raddrizzatori statici.

Come accennato, la tensione dell'impianto viene scelta in base alla potenza installata e quindi al valore della corrente, specie in caso di corto circuito. La frequenza è spesso scelta in base a ragioni operative (disponibilità commerciale di componenti di rispetto a 50 o 60 Hz, frequenza di alimentazione da terra nei porti di approdo della nave).

La potenza degli alternatori viene espressa in kW (potenza attiva) e in kVA (potenza apparente). La potenza apparente è data dal prodotto della tensione per la corrente. Il generatore viene dimensionato sulla base del valore di corrente che gli avvolgimenti possono condurre senza pericoli di sovrariscaldamento. La potenza attiva è data dal prodotto della potenza apparente per il fattore di potenza ($\cos \phi$). Di solito l'impianto di bordo presenta un fattore di potenza pari a 0.80 – 0.85 in ritardo (carichi elettrici prevalentemente induttivi e resistivi).

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Distribuzione e conversione dell'energia elettrica

Il quadro elettrico riceve l'energia elettrica dai generatori e ne controlla la distribuzione o direttamente agli utenti o alle reti secondarie di energia. Ogni nave ha almeno un quadro elettrico principale e un quadro elettrico di emergenza.

Quando la potenza elettrica dei generatori supera i 3 MW, le sbarre del quadro principale sono suddivise in due parti, connesse da interruttori di parallelo. I generatori sono suddivisi equamente fra i due sistemi di sbarre del quadro.

Gli utenti non essenziali possono essere alimentati da sbarre ausiliarie del quadro elettrico, connesse alle sbarre principali da interruttori di gruppo. Questa configurazione consente, in caso di sovraccarico della centrale, il distacco automatico degli utenti non essenziali mediante l'apertura degli interruttori di gruppo.

Le navi da passeggeri ed altri tipi di navi, specie per perforazione e appoggio offshore, hanno due o più quadri principali connessi tramite cavi ed interruttori.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Per mantenere i cavi di connessione fra generatori e quadro quanto più corti possibile, conviene installare il quadro nelle immediate vicinanze dei generatori.

L'impianto di bordo può anche ricevere l'energia da terra quando la nave è in porto o in bacino: un **quadro con presa da terra** è situato sul ponte, in genere su entrambi i lati della nave.

Gli utenti più grossi sono alimentati direttamente dal quadro principale mentre gli utenti minori sono alimentati da **sottoquadri** e **sottostazioni**.

I sottoquadri sono nodi di distribuzione di potenza limitata che alimentano utenti di caratteristiche simili situati nelle loro vicinanze.

Le sottostazioni sono nodi di potenza maggiore che alimentano utenti di varie tipologie ubicati nella zona servita dalla sottostazione : può trattarsi ad esempio di un'intera zona tagliafuoco di una nave passeggeri. La sottostazione, a differenza del sottoquadro, è sistemata in locale proprio.

I sottoquadri sono alimentati secondo lo schema radiale : una sola alimentazione proveniente dal quadro principale.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Le sottostazioni possono essere alimentate secondo lo schema radiale o secondo lo schema ad anello. In quest'ultimo caso ogni sottostazione, oltre ad essere collegata al quadro, è collegata alla sottostazione adiacente con un collegamento di riserva. I collegamenti di riserva costituiscono un anello chiuso che parte da un sistema di sbarre del quadro e termina all'altro sistema.

Negli impianti in media tensione, i quadri principali alimentano le sottostazioni tramite trasformatori (per esempio 6.6 / 0.45 kV). Solo gli utenti maggiori (propulsione, eliche di manovra, compressori dell'impianto condizionamento) vengono alimentati direttamente in media tensione.

Fra il quadro elettrico principale e le reti secondarie a tensione ridotta o in corrente continua, devono essere installati **sistemi di trasformazione o conversione** dell'energia elettrica. Un esempio è quello appena citato relativo all'alimentazione delle sottostazioni. Altri esempi :

- **trasformatore che porta la tensione da 450 V a 230 o a 115 V per le reti piccola forza e luce;**

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

- raddrizzatore che converte la c.a. in c.c. a 24 V per i sistemi di continuità con batterie.

La **conversione** può essere di tipo **statico** (elettronica di potenza) o con **convertitori rotanti** (alternatori mossi da motori elettrici). Quest'ultima soluzione è stata usata per separare elettricamente dalla rete principale la rete a bassa tensione dedicata all'alimentazione di utenti sensibili (luce, sistemi elettronici, sistemi di navigazione) nel caso in cui la rete principale è "inquinata" dalle armoniche introdotte dai convertitori di propulsione ad alta potenza.

Quando un sottoquadro in corrente continua alimenta utenti vitali (sistemi di monitoraggio, allarme e controllo), si installano batterie di accumulatori per assicurare la continuità dell'alimentazione nell'intervallo di avviamento del gruppo di emergenza dopo un black-out della centrale principale.
Il sistema è denominato **UPS (uninterruptible power supply)**.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

L'UPS consiste in una batteria di accumulatori ed un impianto di conversione adatto al tipo di energia fornita dalla rete all'UPS ed al tipo di energia che a sua volta l'UPS eroga al carico.

Un tipico esempio di UPS alimentato in c.a. ed erogante c.c. è costituito da una batteria e da un raddrizzatore. Normalmente la potenza in c.c. viene fornita dal raddrizzatore mentre la batteria, collegata in tampone, viene mantenuta sotto carica. In caso di mancanza di potenza in c.a., l'energia in c.c. viene fornita dalla batteria.

Altri tipi di UPS, costituiti da una batteria, un raddrizzatore ed un inverter, sono adatti per alimentazioni da c.a. a c.a.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

In condizioni di servizio normali, il quadro principale alimenta il **quadro di emergenza** tramite interconnessione.

In caso di mancanza di tensione alle sbarre del quadro principale, il quadro di emergenza viene alimentato dal gruppo autonomo di emergenza.

Gli interruttori che controllano l'alimentazione del quadro di emergenza (o dal quadro principale o dal gruppo di emergenza), sono interbloccati in modo che l'alimentazione possa provenire da una sola fonte.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

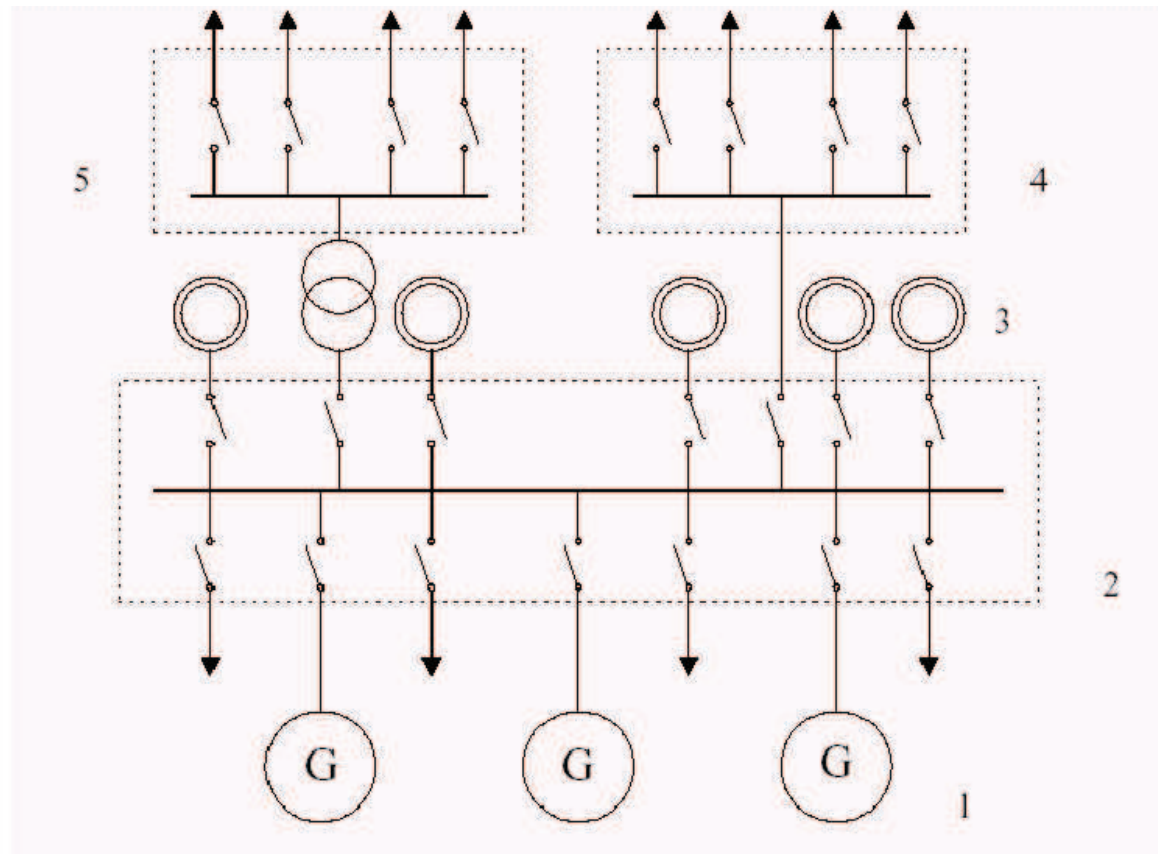


Figura 4.1: Schema semplificato di tipo radiale semplice. 1- Generatori. 2- Quadro principale. 3- Utenti forza. 4- Centralino forza. 5- Centralino luce.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

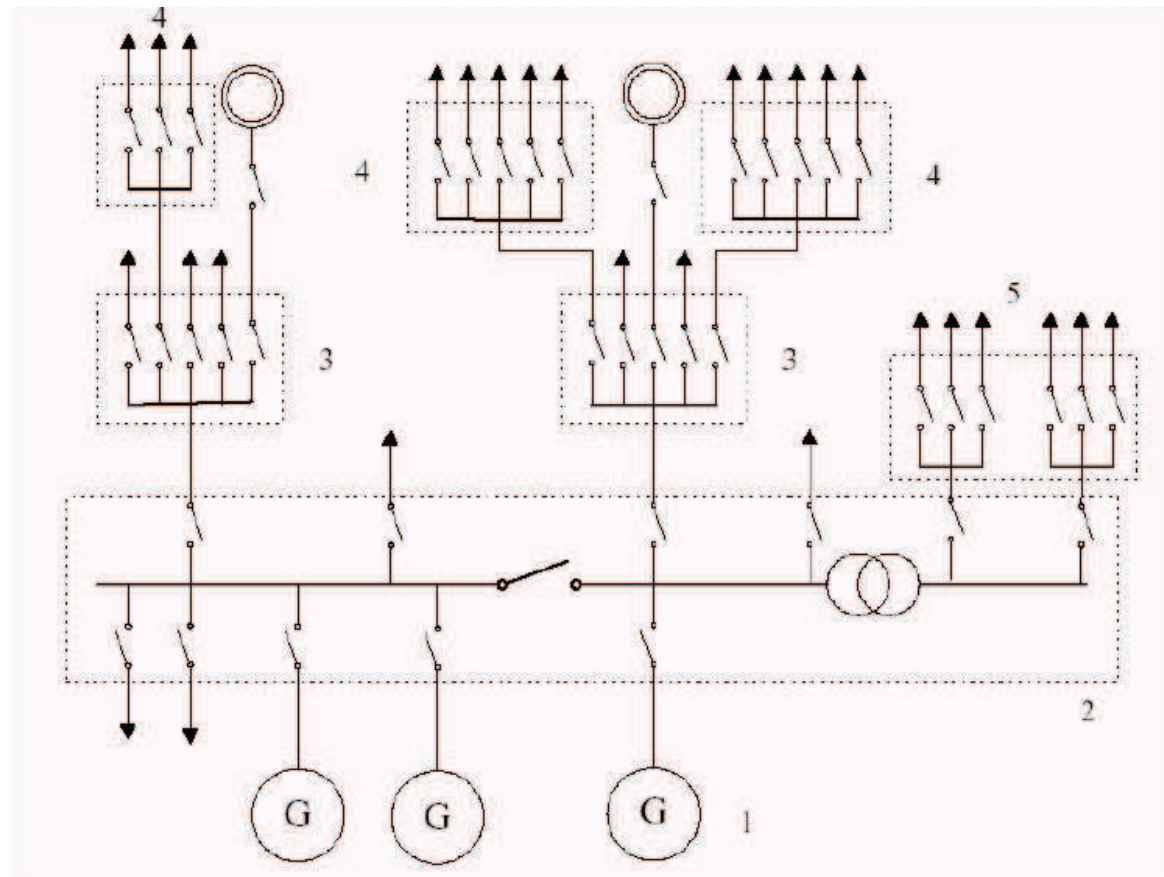


Figura 4.2: Schema semplificato di tipo radiale composto. 1- Generatori. 2- Quadro principale. 3- Utenti forza. 4- Centralino forza. 5- Centralino luce.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

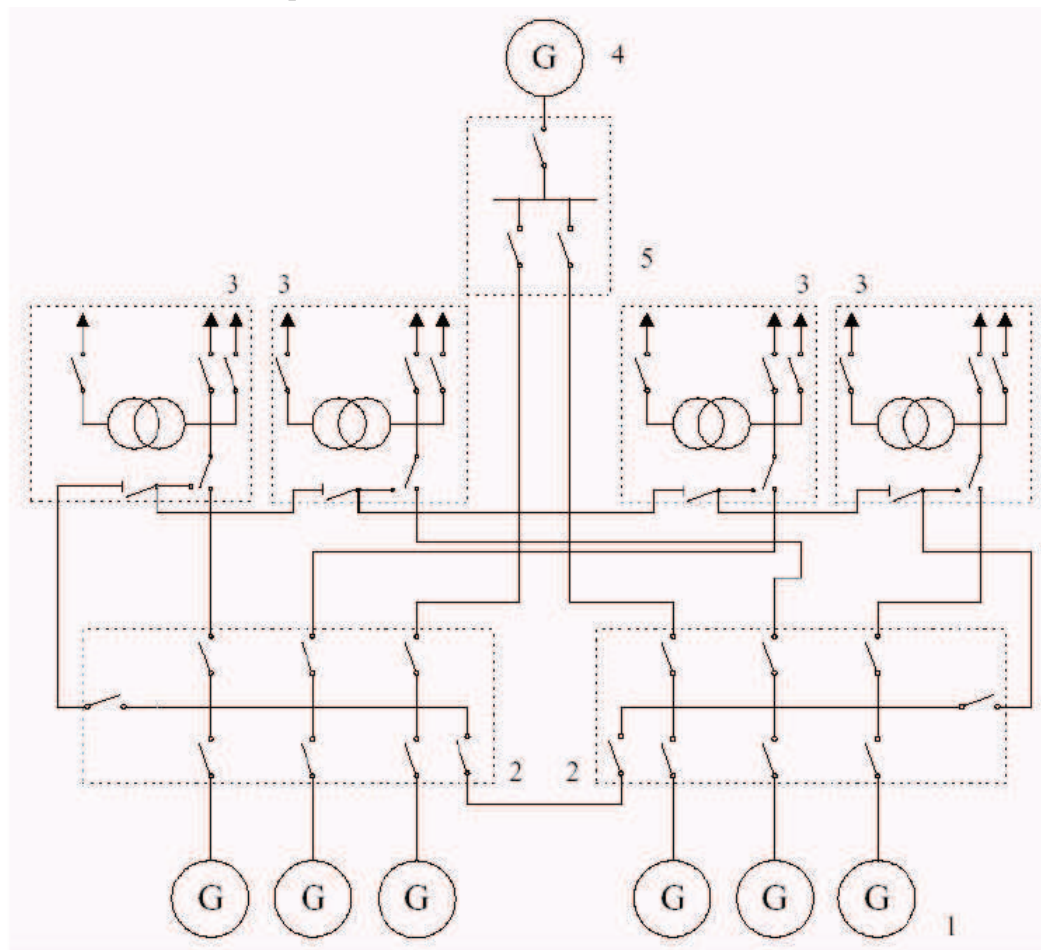
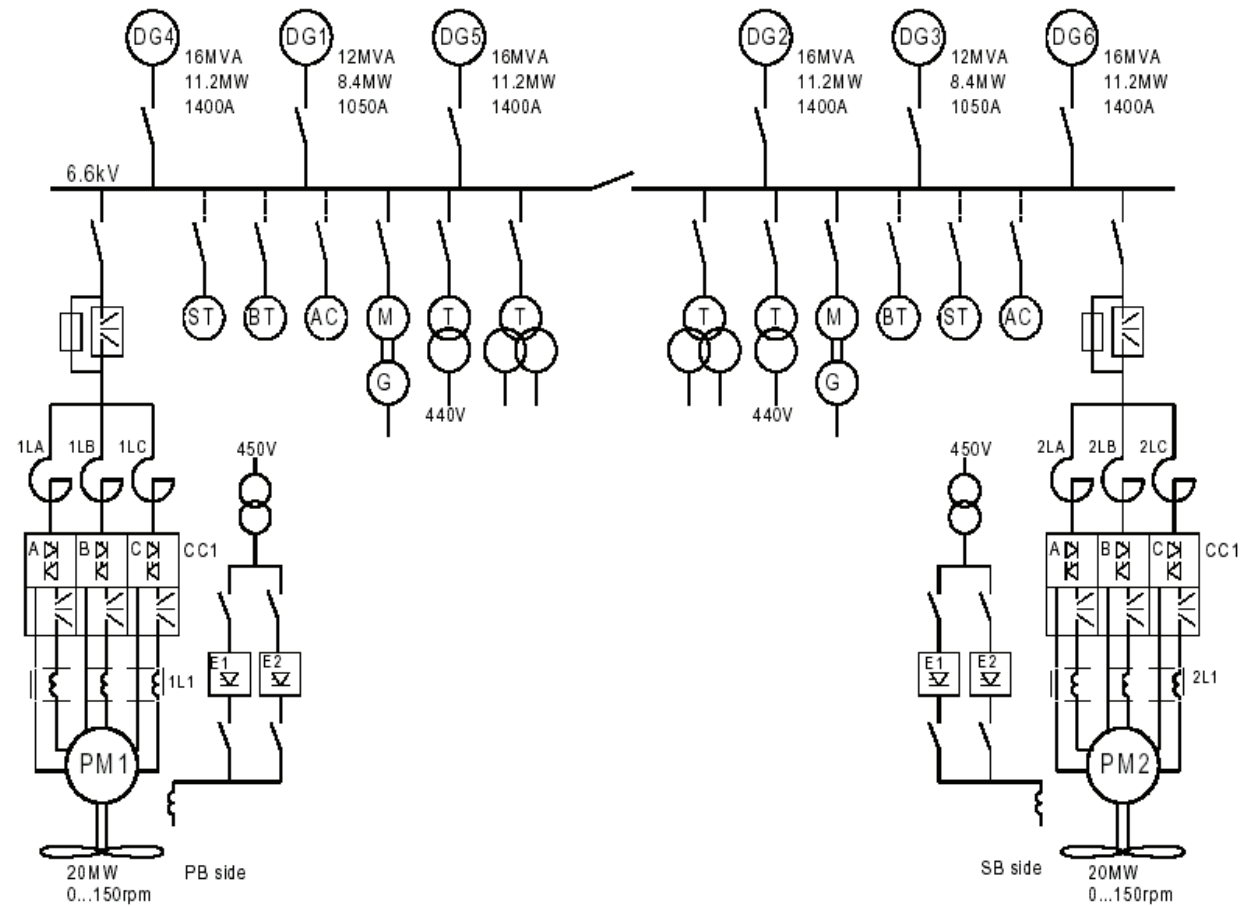


Figura 4.3: Schema semplificato di tipo radiale composto con anello di riserva normalmente aperto 1 - Generatori. 2 - Quadri principali. 3 - Sottostazioni forza e luce. 4 - Generatori emergenza. 5 - Quadro di emergenza.

Impianti di propulsione navale

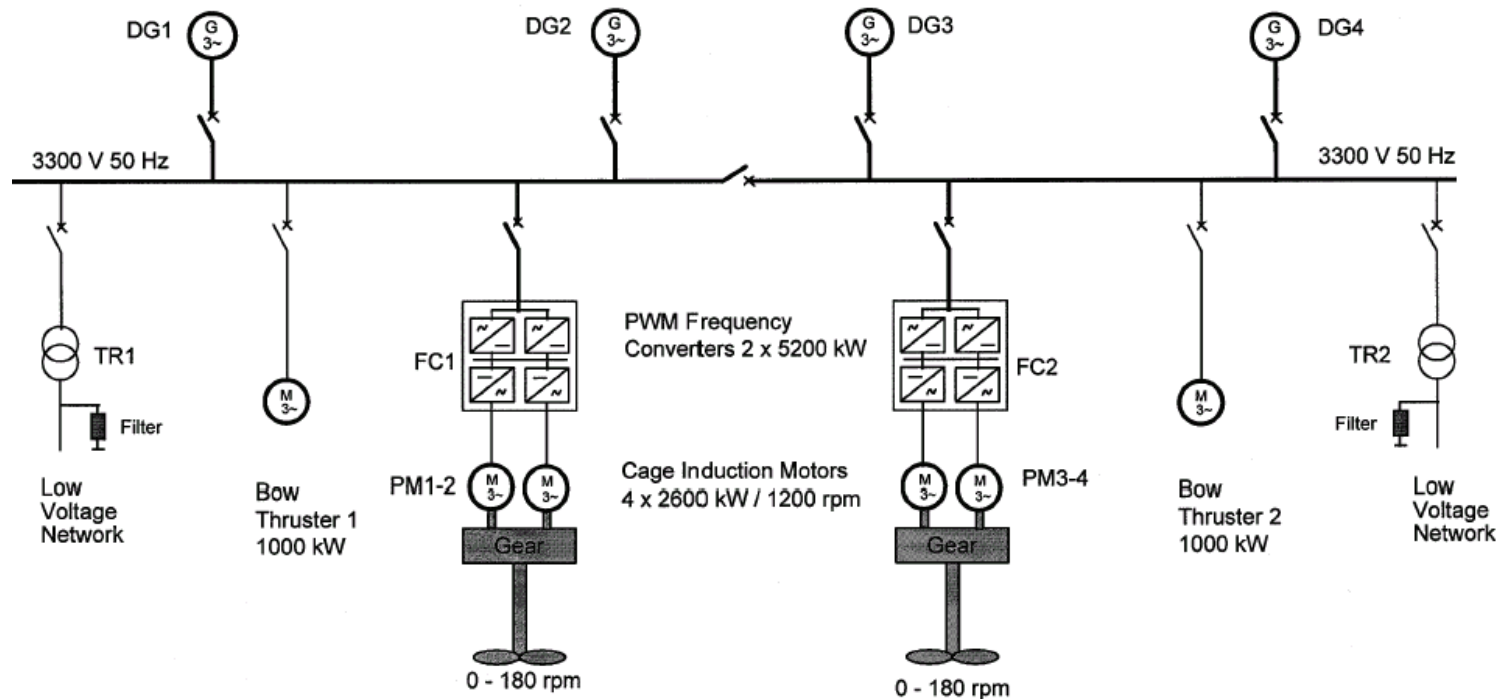
Impianti elettrici di bordo

**Nave passeggeri
/ crociera a
propulsione
diesel elettrica**



Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo



Nave chimichiera a propulsione diesel elettrica

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Nave chimichiera a propulsione diesel elettrica

Diesel electric propulsion with SIMOVERT D cyclo converters.

5100 kW SSP POD Main Prop.

1 x 620 kW Bow Thruster

4 x 2100 kVA Generators

1 x 560 kVA Generators

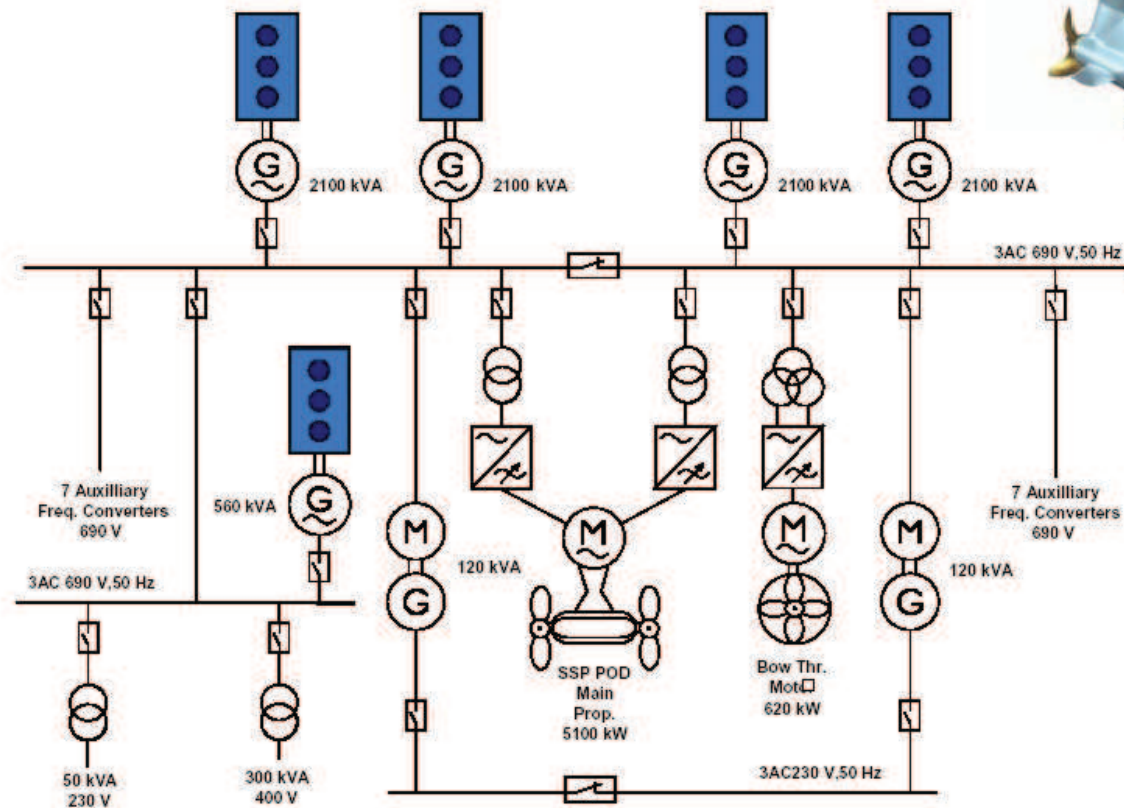
18 x 40-110 kW Converters

(Ballast pumps, cargo pumps etc.)

690, 400, 230 V Switchboards

Transformers

Bridge Panels / Control Panels



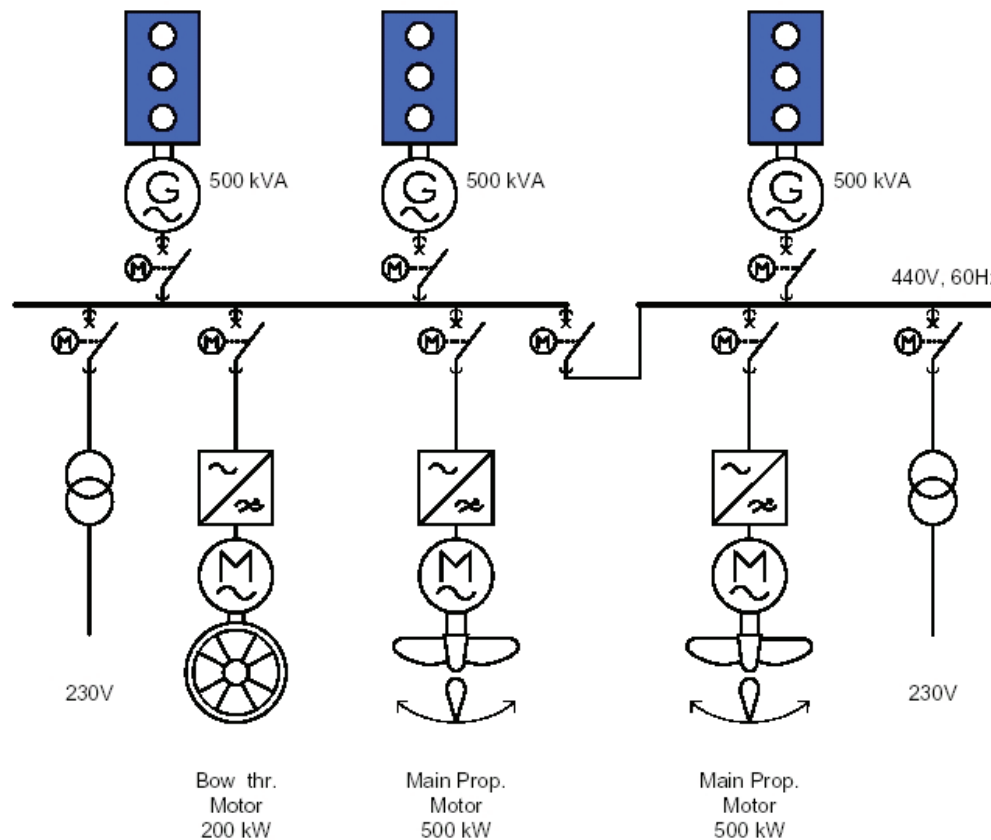
Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Nave da ricerca oceanografica a propulsione diesel elettrica

Diesel electric propulsion with MASTERDRIVES frequency converters.

- 2 x 500 kW Main Propulsion
- 1 x 200 kW Bow Thruster
- 3 x 500 kVA Generators
- Power Management System
- Generator Power Adaptation
- Power Plant Protection
- Transformers
- Bridge Control System
- 690V Switchboards



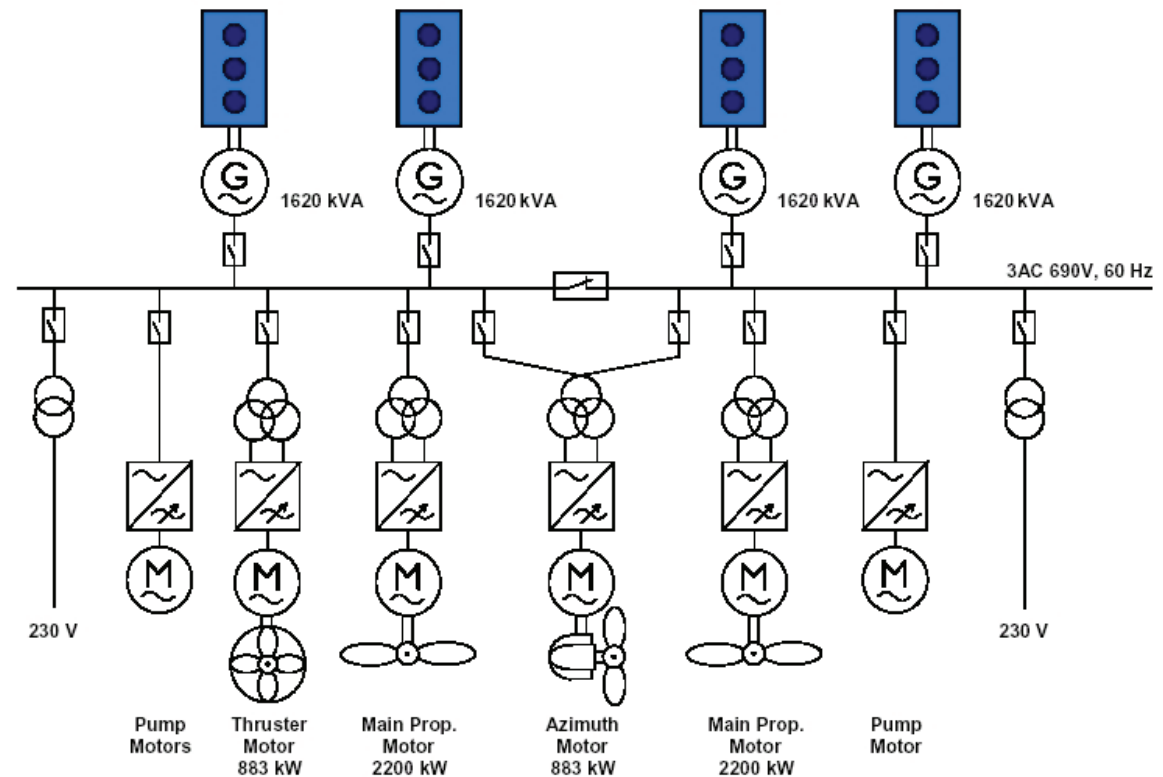
Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Nave appoggio piattaforme a propulsione diesel elettrica

Diesel electric propulsion with
MASTERDRIVES frequency
converters.

2 x 2200 kW Main Propulsion
1 x 883 kW Bow Thruster
1 x 883 kW Azimuth Thruster
7 x 75-125 kW Converters
(Ballast pumps, cargo pumps etc.)
4 x 1620 kVA Generators
690, 230 V Switchboards
Power Management System
Generator Power Adaptation
Power Plant Protection
Transformers



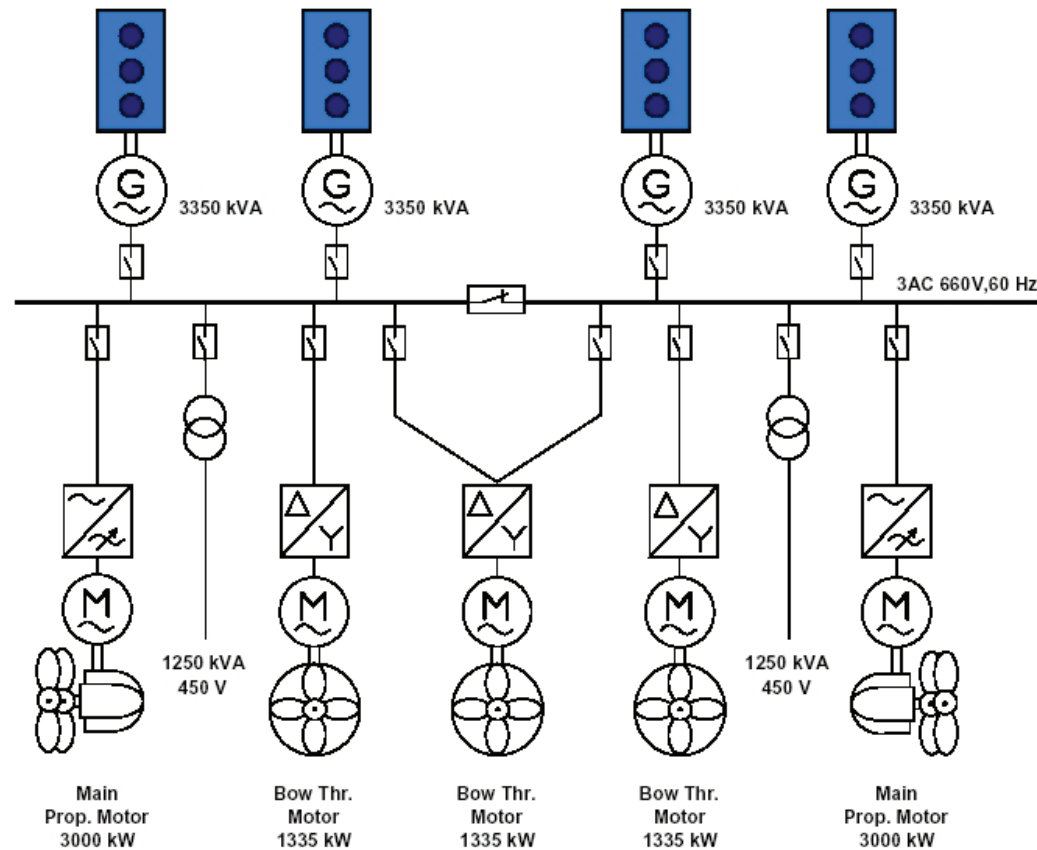
Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Nave appoggio piattaforme a propulsione diesel elettrica

Diesel electric propulsion with
MASTERDRIVES frequency
converters.

2 x 3000 kW Main Propulsion
3 x 1335 kW Bow Thruster
4 x 3350 kVA Generators
660 V Switchboard with PMS
Transformers



Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

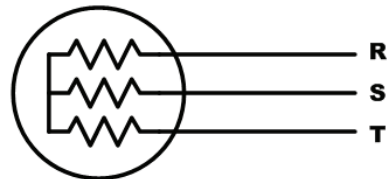
Sistemi di distribuzione - Rete primaria

- **Sistema trifase a tre conduttori, senza neutro, con centro stella isolato. Quando una fase va accidentalmente a massa, essendo il centro stella isolato, nelle altre due fasi la tensione assume il valore concatenato. Il sistema può continuare il servizio, anche se gli isolamenti degli utenti sono più sollecitati.**
- **Sistema trifase a tre conduttori con centro stella a massa. Questa disposizione fa sì che, quando una fase va a massa, la tensione verso massa di ciascun conduttore non possa superare il valore di fase.**

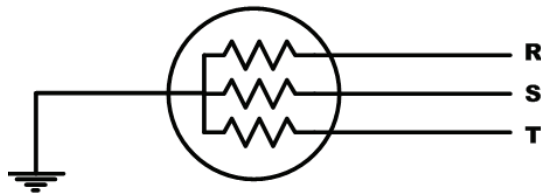
Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

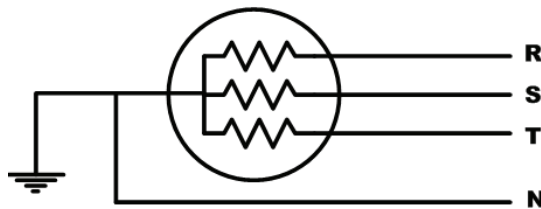
RETI PRIMARIE



Tre conduttori isolati

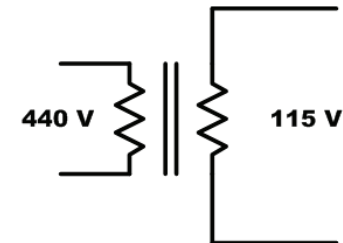


Tre conduttori con neutro a massa

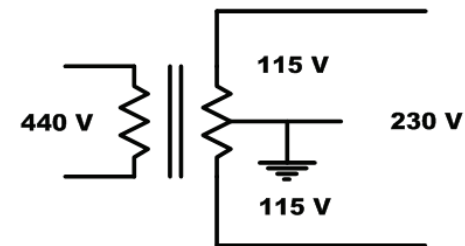


Quattro conduttori con neutro a massa senza ritorno allo scafo

RETI SECONDARIE



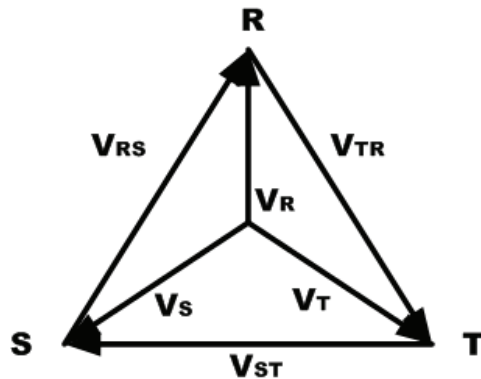
Monofase a due conduttori isolati



Monofase a tre conduttori con punto medio del trasformatore a massa

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo



$$\frac{V_{ij}}{2} = V_i \cos 30^\circ = V_i \frac{\sqrt{3}}{2}$$

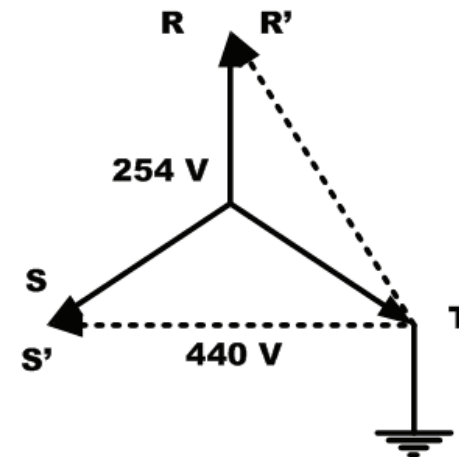
$$V_i = \frac{V_{ij}}{\sqrt{3}}$$

V_{ij} : tensione concatenata

V_i : tensione di fase

Se, ad esempio, $V_c = 440 \text{ V}$, allora

$V_f = 254 \text{ V}$



Sistema trifase a tre conduttori, senza neutro, con centro stella isolato.

Quando una fase va accidentalmente a massa, essendo il centro stella isolato, nelle altre due fasi la tensione assume il valore concatenato.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Per la sicurezza delle persone, il sistema con centro stella isolato è più sicuro : il contatto accidentale con una fase non comporta shock perchè non c'è connessione con due fasi. Ciò è vero se il sistema non ha un guasto a terra : in caso di guasto a terra, il contatto con una fase significa contatto fra quella fase e il centro stella (che è al potenziale di massa). Ciò può provocare la morte.

E' importante perciò verificare, come richiesto dai Registri, che l'impianto non sia in condizioni di isolamento precarie, con una fase accidentalmente a contatto dello scafo (massa) che passa inosservata.

Nei sistemi in bassa tensione si adotta la distribuzione con centro stella isolato.

Nei sistemi in media tensione, ove la resistenza di isolamento di cavi e componenti è più critica, si adotta il sistema con centro stella posto a massa tramite resistore, il quale assicura che in caso di corto circuito la corrente non divenga eccessiva.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Nella rete secondaria si possono usare vari sistemi :

- **monofase a due conduttori isolati ($V = 115 V$),**
- **monofase a tre conduttori, ossia con neutro, in cui il neutro è collegato a massa tramite il punto medio del trasformatore. Il sistema consente due tensioni : 230 V concatenata monofase e 115 V fra fase e neutro,**
- **oggi, date le aumentate potenze in gioco, si preferisce il sistema trifase a quattro conduttori con neutro a massa. Sono possibili alimentazioni trifase a 220 V (piccola forza), alimentazioni monofase a 220 V, alimentazioni monofase a 127 V (luce).**

Impianti di propulsione navale

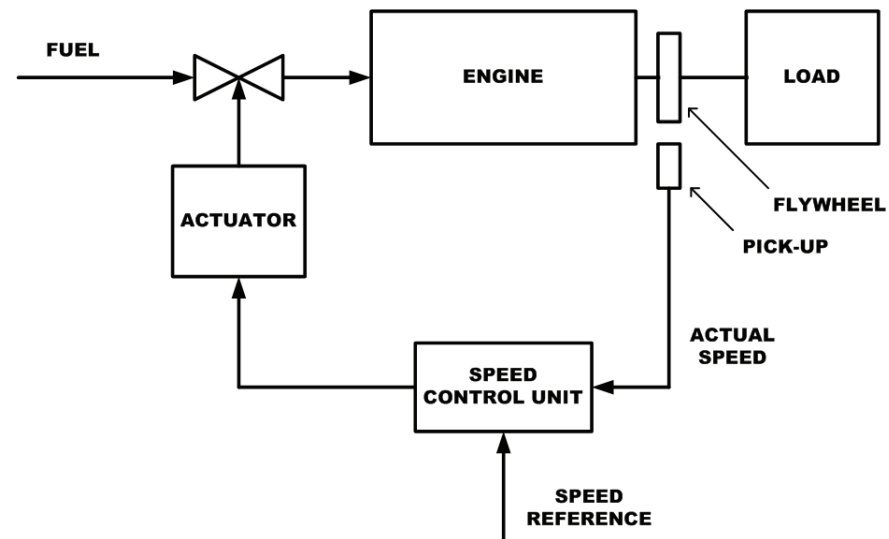
Impianti elettrici di bordo

Regolazione dei gruppi diesel generatori

Protezione e regolazione del motore diesel

I sistemi di protezione intervengono arrestando il motore in caso di sovralimentazione, temperature eccessive, mancanza di lubrificazione, ecc.

La protezione del motore viene normalmente consegnata dal costruttore come parte integrante del motore o come parte da integrare parzialmente con l'impianto di automazione della nave.



Schema del controllo di velocità del motore.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Il regolatore di governo controlla la frequenza della corrente generata agendo sulla mandata di combustibile, e quindi sui giri del motore.

I regolatori usati per controllare la velocità del motore sono solitamente di tipo idraulico/meccanico o elettronico. I regolatori elettronici sono impiegati nelle applicazioni più complesse.

I regolatore controllano la frequenza e la ripartizione della potenza attiva fra i generatori agendo in due modi distinti :

- **con caratteristica tipo “speed droop”**
- **in modo isocrono (“zero droop”)**

Il modo “speed droop” è ancora il più usato : in esso la velocità di riferimento del regolatore viene ridotta in proporzione al carico del generatore.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Per fare un esempio : un motore ha una velocità nominale di 500 giri/minuto quando aziona un generatore a 50 Hz senza carico. Lo "speed droop" è fissato al 4%. Pertanto la diminuzione di velocità fra lo 0 e il 100% del carico sarà di 20 giri/min. Lo "speed droop" è normalmente compreso fra il 3 e il 5%.

Il modo **isocrono** fa sì che i generatori si dividano la potenza attiva in modo molto accurato, mantenendo costante la frequenza.

Il modo isocrono è possibile solo se tutti i generatori sono dotati di regolatori elettronici dello stesso tipo.

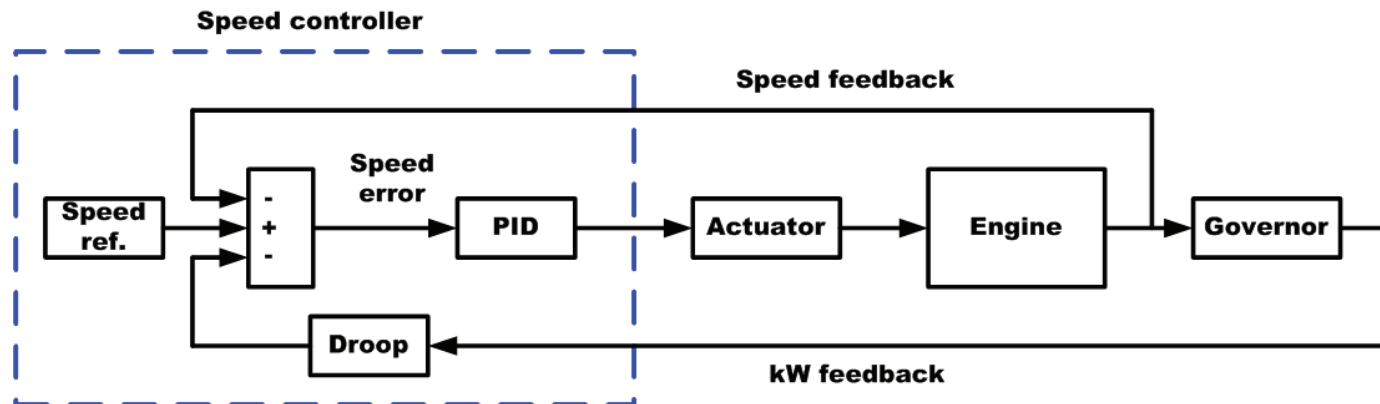
I regolatori isocroni contengono un elemento di controllo con effetto integrale che mantiene la frequenza esattamente al "set point".

Un segnale, sia cablato che trasmesso tramite bus dati ad alta velocità, viene scambiato fra i regolatori al fine di confrontare e ripartire i carichi dei rispettivi motori. In tal caso, il controllo dei generatori funzionanti in parallelo è automatico, senza bisogno di intervento di dispositivi esterni, quali ad esempio il Power Management System.

La maggioranza dei regolatori impiegati negli impianti di propulsione elettrici ha entrambe le funzioni di controllo disponibili.

Impianti di propulsione navale

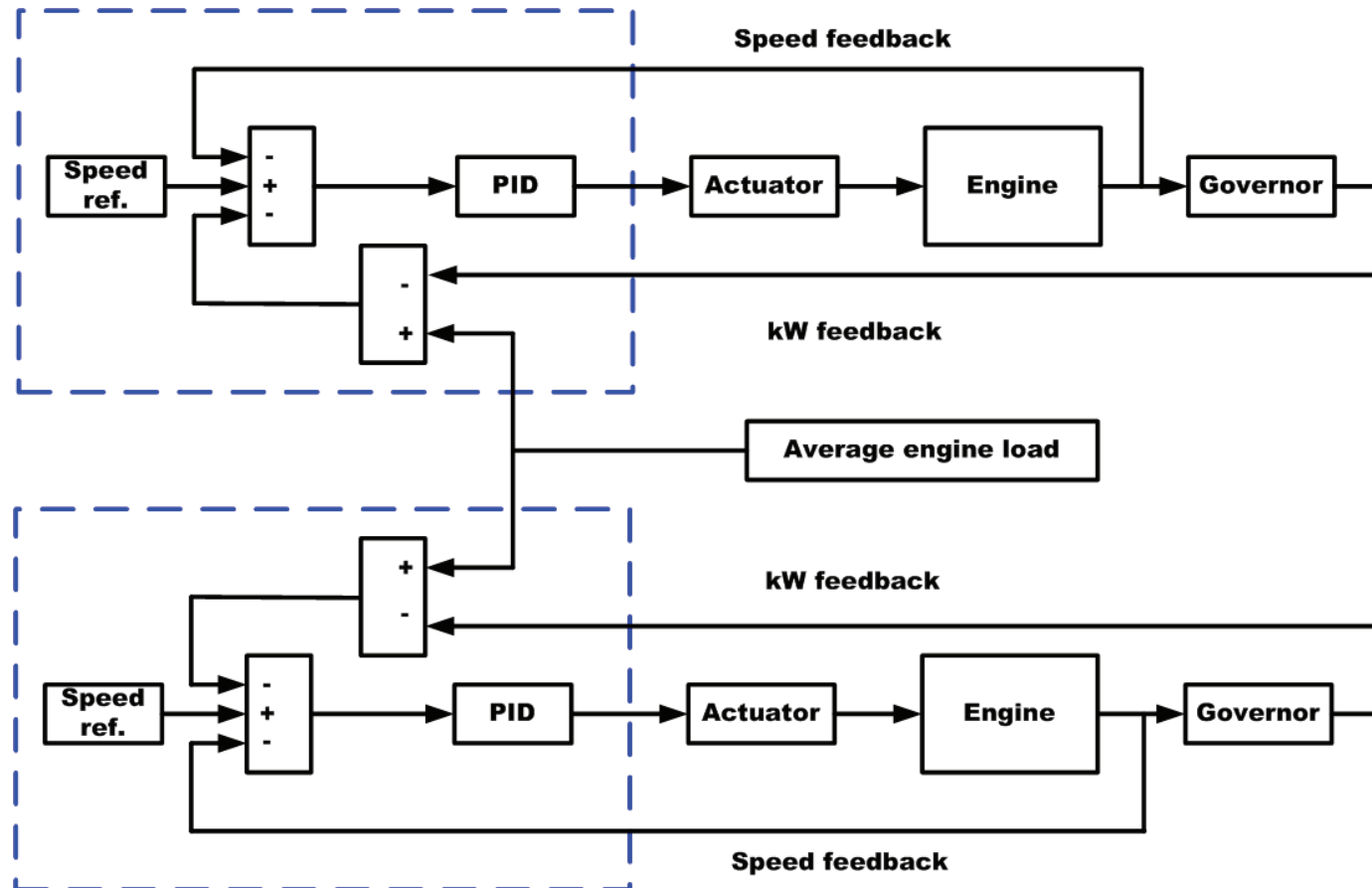
Impianti elettrici di bordo



Regolatore di governo con “speed droop”

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo



Regolatore di governo isocrono

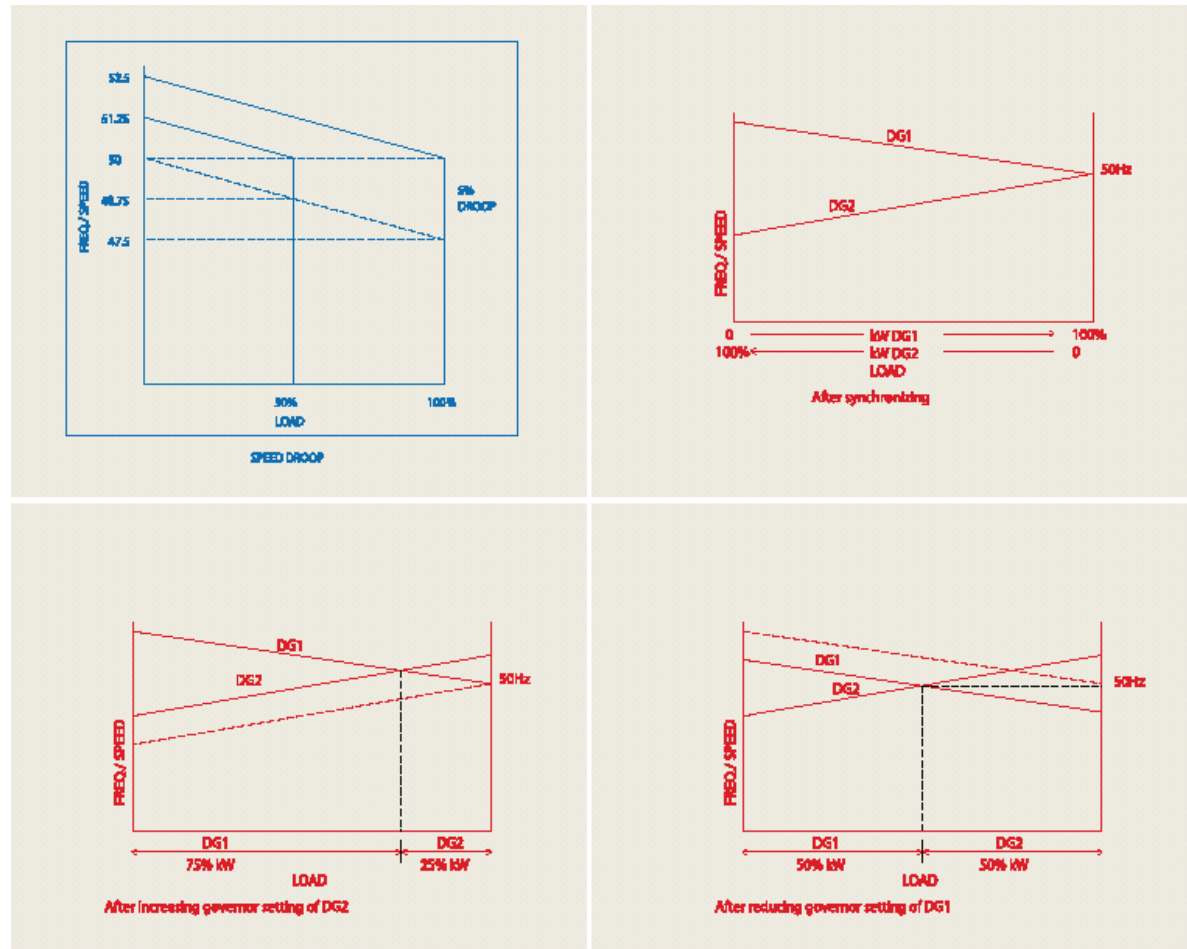
Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Figura in alto a destra :
dopo la sincronizzazione, il DG 2 ha lo 0% del carico mentre il DG1 ha ancora il 100% del carico.

Figure in basso :
il regolatore del DG2 incrementa il carico mentre il regolatore del DG1 lo diminuisce.

Il carico viene ripartito dapprima al 25 - 75%, poi uniformemente al 50 - 50%.



Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Regolazione automatica della tensione

Poiché gli alternatori funzionanti ad eccitazione costante presentano una tensione ai morsetti sensibilmente variabile con il carico, è necessario adottare dei regolatori di tensione che mantengano la tensione quanto più costante possibile variando l'eccitazione in base al variare del carico.

Il regolatore automatico di tensione (AVR : automatic voltage regulator) controlla la tensione dell'alternatore variando la corrente di eccitazione inviata all'avvolgimento di campo dell'alternatore. Come il regolatore di governo, anche l'AVR può avere caratteristica "droop": in tal caso la tensione varia in funzione del carico, al massimo del +/- 2.5 %.

L'AVR provvede alla ripartizione del carico reattivo (kVAr) fra gli alternatori.

Nelle applicazioni in cui le variazioni di tensione non sono accettabili, ci sono metodi alternativi per ridurre o annullare la caduta di tensione con il carico :

- **compensazione della caduta di tensione, tramite aggiustamento del "set-point";**

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

- **adozione di un regolatore integrale. L'AVR o il Power Management System (PMS) contengono un elemento di regolazione di tipo integrale che aggiusta il set point della tensione in funzione del carico ed evita deviazioni di tensione in condizioni statiche.**

Un'altra funzione dell'AVR è quella di intervenire in caso di grandi variazioni del carico, dovute per esempio a inserzione o disinserzione in rete di grossi utenti. In tali circostanze, la variazione transitoria della tensione non deve superare il -15% o il $+20\%$ del valore nominale.

A questo fine, l'AVR è dotato di un elemento di controllo "feed-forward", basato sulla misura della corrente di statore.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo

Riepilogo – Funzionamento a carico dell'alternatore

1) **Alternatore che alimenta un carico resistivo.**

- ✓ Il carico richiama corrente dagli avvolgimenti di statore;
- ✓ La corrente che fluisce nello statore produce un campo magnetico rotante avente la stessa velocità del rotore;
- ✓ **Il campo di statore è perpendicolare al campo di rotore** e provoca una coppia resistente che tende a rallentare il rotore;
- ✓ Il rallentamento del rotore è percepito dal regolatore di governo;
- ✓ Il regolatore di governo aumenta l'alimentazione di combustibile al motore primo fino a che la velocità, e quindi la frequenza, ritornano al valore nominale (in realtà ad un valore leggermente minore del nominale).

Impianti di propulsione navale

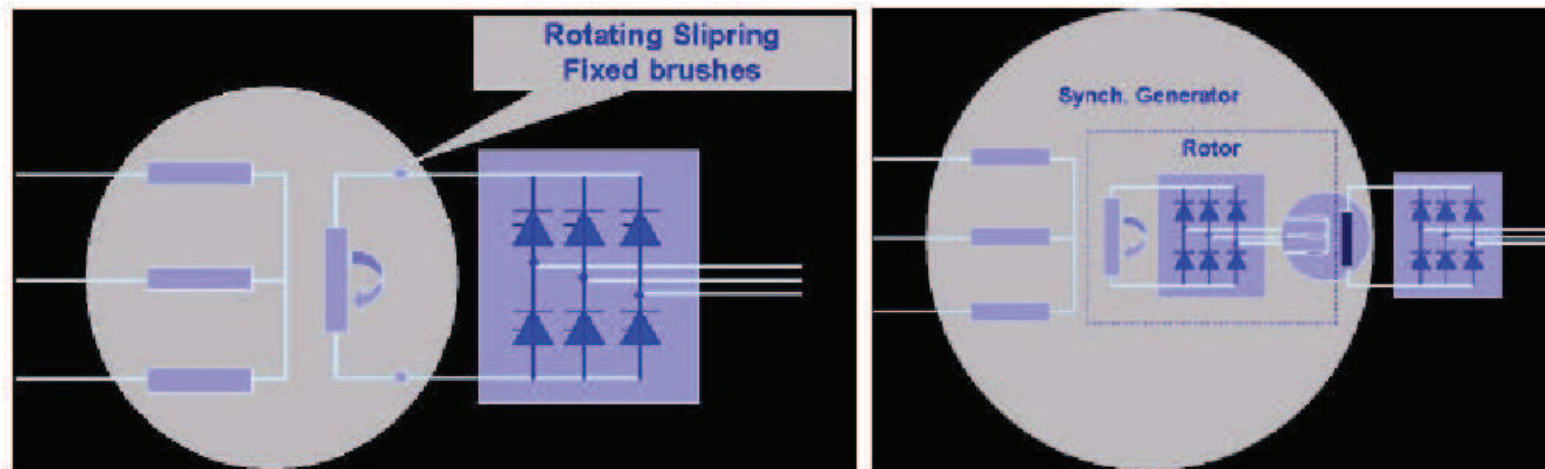
Impianti elettrici di bordo

2) Alternatore che alimenta un carico induttivo.

- ✓ Il carico induttivo provoca un flusso di potenza reattiva in entrambi i sensi fra il carico medesimo e l'alternatore;
- ✓ poichè non vi è richiesta di potenza attiva, la marcia del motore primo rimane inalterata;
- ✓ **La corrente di statore genera un campo magnetico rotante avente la stessa direzione e verso opposto rispetto al campo del rotore. Poichè il campo di statore ha la stessa direzione del campo di rotore, non si genera alcuna coppia che tende a rallentare il rotore. Il fatto che il campo di statore abbia verso opposto a quello di rotore provoca una riduzione del flusso magnetico del rotore e quindi una caduta di tensione;**
- ✓ La caduta di tensione è percepita dall'AVR;
- ✓ L'AVR aumenta la corrente di eccitazione al rotore, e quindi il flusso magnetico, fino a che la tensione ritorna al valore nominale.

Impianti di propulsione navale

Impianti elettrici di bordo



Eccitazione dell'alternatore sincrono :

- a sinistra, mediante spazzole,
- a destra eccitazione "brushless" (senza spazzole)