



Allievi Trasporti

a.a. 2004/2005

**POLITECNICO DI MILANO**  
**DIPARTIMENTO DI ELETTROTECNICA**

20133 Milano - Piazza Leonardo da Vinci 32  
Telefono: 02-2399/3702 – 3740 – 3741 – Telex 333467 POLIMI-I  
Telefax: 02-23993703  
Codice Fiscale 80057930150 – P. I.V.A. 04376620151

Prof. D. Zaninelli

**Dispensa di Sistemi Elettrici per i Trasporti**

***SISTEMI ELETTRICI A BORDO DELLE NAVI***



## **INDICE.**

Dispensa di Sistemi Elettrici per i Trasporti.....	1
SISTEMI ELETTRICI A BORDO DELLE NAVI.....	1
INDICE.....	3
INTRODUZIONE.....	4
1. GENERALITÀ SUI MEZZI NAVALI.....	4
1.1 CARATTERISTICHE GENERALI E CLASSIFICAZIONI.....	4
1.2 POTENZA, TENSIONE E FREQUENZA A BORDO DELLE UNITÀ NAVALI.....	6
2. CENTRALE DIESEL – ELETTRICA.....	9
2.1 CLASSIFICAZIONE DEGLI UTENTI.....	10
2.2 DETERMINAZIONE E FRAZIONAMENTO DELLA POTENZA.....	12
2.3 DISTRIBUZIONE DEGLI ELETTROGENI NELLE CENTRALI.....	14
2.4 CENTRALE DI EMERGENZA.....	15
3. SISTEMI DI DISTRIBUZIONE.....	18
3.1 LA FREQUENZA.....	18
3.2 LA TENSIONE.....	19
3.3 SISTEMI DI DISTRIBUZIONE PER RETI PRIMARIE.....	27
3.4 SISTEMA DI DISTRIBUZIONE PER RETI SECONDARIE.....	28
4. SCHEMI ELETTRICI.....	30
4.1 SCHEMA RADIALE SEMPLICE.....	31
4.2 SCHEMA RADIALE COMPOSTO.....	33
4.3 SCHEMA RADIALE CON ANELLO DI RISERVA.....	34
5. I CAVI A BORDO.....	36
5.1 SCELTA DEL CAVO.....	36
5.2 DIMENSIONAMENTO.....	36
5.3 INSTALLAZIONE.....	39
5.4 IMPIEGO DI CAVI ATOSSICI NELLE APPLICAZIONI NAVALI.....	42
6. CONVERTITORI STATICI PER AZIONAMENTI ELETTRICI DI PROPULSIONE NAVALE.....	46
7. SISTEMI DI PROTEZIONE.....	47
7.1 GENERALITÀ.....	47
7.2 INTERRUTTORI.....	48
7.3 PROTEZIONE DELLE LINEE PARTENTI.....	48
7.4 LA SELETTIVITÀ.....	49
7.5 IL COORDINAMENTO.....	50
8. COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA.....	52
8.1 GENERALITÀ.....	52
8.2 STUDIO DELLA COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA NEL CONTESTO NAVALE.....	56
CONCLUSIONI.....	57
BIBLIOGRAFIA.....	58

## **INTRODUZIONE.**

Si sta assistendo in questi ultimi anni ad una penetrazione elettrica sempre maggiore in campo navale, e di conseguenza all'aumento della potenza elettrica in gioco.

Il sistema elettrico navale è autonomo e indipendente dal mondo esterno, si ha pertanto la presenza a bordo di tutto ciò che è necessario per il funzionamento di tale impianto, come organi di generazione, di trasmissione, di distribuzione ed infine d'utilizzazione.

La potenza elettrica complessiva di bordo è ripartita sui più svariati carichi, che vanno dall'illuminazione, ai compressori per l'aria condizionata, ai frigoriferi, alle pompe d'esercizio e d'emergenza, ai motori di sollevamento, ai servizi nelle cabine, a quelli di comunicazione e navigazione e, per alcuni tipi di nave anche ai motori per le eliche di propulsione e manovra.

### **1. GENERALITÀ SUI MEZZI NAVALI.**

#### **1.1 CARATTERISTICHE GENERALI E CLASSIFICAZIONI.**

Le caratteristiche che devono possedere le macchine utilizzate a bordo dei mezzi navali sono:

1. Grande sicurezza di esercizio e affidabilità, anche nelle situazioni più difficili.
2. Pesi e ingombri ridotti.
3. Adattabilità alle forme dello scafo delle navi.
4. Elevata resistenza all'azione corrosiva dell'acqua e dell'aria marina.
5. Facilità di conduzione, smontaggio e manutenzione.
6. Riduzione al minimo possibile delle possibili fonti di incendio (uno dei pericoli più gravi che un equipaggio e i passeggeri possano essere chiamati a fronteggiare, specie se in alto mare).
7. Grande manovrabilità.
8. Capacità di funzionare in piena efficienza e sicurezza, anche in presenza di forti movimenti di rollio e beccheggio, ed anche di inclinazioni permanenti dovute a movimenti accidentali del carico non perfettamente stivato, oppure a variazioni dell'assetto dello scafo a causa di falle.
9. Capacità di funzionare anche con diversi combustibili, reperibili facilmente nei vari porti

La classificazione degli apparati motori navali è fatta secondo:

- Tipo di motore primo  $\Rightarrow$  motore Diesel, turbina a vapore, turbina a gas.
- Tipo di combustibile impiegato  $\Rightarrow$  nafta pesante, Diesel - oil, carbone, materiale fissile per i reattori nucleari.
- Sistema di trasmissione della potenza meccanica dal motore primo all'elica  $\Rightarrow$  trasmissione diretta, mediante ingranaggi, idraulica, elettrica.

La scelta tra un tipo e l'altro dei suddetti apparati, va fatta in conformità a considerazioni tecnico - economiche, i cui fattori di principale importanza sono:

- Potenza per ottenere le velocità d'avanzamento richieste nelle diverse condizioni.
- Costi iniziali.
- Consumi specifici di combustibile (in altre parole quantità di combustibile da usare per ottenere l'unità di potenza agente sull'elica, per unità di tempo. Questo parametro, viene di solito espresso nell'unità di misura pratica  $g / CV \cdot h$ ).
- Consumi di lubrificante.
- Costi di manutenzione prevedibili.
- Numero e qualifica richiesti per il personale di macchina.
- Comfort a bordo della nave, che dipende in larga misura dai valori di rumorosità e vibrazioni causati dall'apparato motore. A questo proposito, va precisato che in particolare le macchine alternative a ciclo Diesel (che sono le più utilizzate come motori primi a bordo di mezzi navali), trasmettono alle fondazioni forze e momenti variabili, che possono essere ridotti mediante l'applicazione di opportuni contrappesi all'albero a manovelle (questa operazione è chiamata bilanciamento). Tali vibrazioni non si possono però eliminare completamente, quindi occorre usare fondazioni abbastanza robuste e massicce, tali da ridurre ulteriormente l'ampiezza delle vibrazioni trasmesse allo scafo. Le turbine a vapore sono più equilibrate rispetto ai motori Diesel, ma i riduttori di velocità ad ingranaggi a cui sono molto spesso connesse, danno luogo a loro volta a vibrazioni ad alta frequenza ed a rumorosità elevate. Per evitare, o per lo meno per ridurre, gli effetti dannosi causati dalle vibrazioni, oltre ad irrigidire le fondazioni e lo scafo bisogna evitare accuratamente i fenomeni di risonanza meccanica. Inoltre, conviene fare ricorso all'isolamento acustico e strutturale per evitare che rumori e

vibrazioni fastidiose siano trasmesse all'esterno del locale in cui sono posti gli apparati motori.

- Costi e disponibilità dei diversi combustibili dei motori termici sulle rotte più probabili.
- Peso e volume richiesto dall'apparato motore e dalla relativa scorta di combustibile che vanno a sottrarsi al carico pagante (merci o passeggeri).
- Oneri relativi alle scorte di pezzi di ricambio da tenere disponibili sia a bordo della nave, sia nella sede di armamento. Tali oneri, sono molto spesso più rilevanti rispetto ad apparati motori usati in altri campi della tecnica, a causa del fatto che in ambito navale è fondamentale la sicurezza di esercizio dell'apparato motore, in quanto da ciò dipende anche la sicurezza e l'autosufficienza della nave.

È evidente che a seconda del fatto che il mezzo navale sia di tipo militare, mercantile o da trasporto passeggeri, alcuni dei suddetti fattori potranno prevalere rispetto ad altri e condurre così alla scelta dell'apparato motore più opportuno.

In conformità a tali parametri possono essere fatti dei confronti tra le varie soluzioni. Ad esempio il motore Diesel rispetto agli impianti con turbina a vapore, a parità di potenza erogata, consente d'avere minori consumi di combustibile, ma richiede maggiori costi di manutenzione, ha pesi ed ingombri notevolmente superiori, eroga una coppia all'asse con una certa irregolarità periodica, ed è vincolato all'utilizzo di un solo tipo di combustibile.

Il carbone rispetto agli oli combustibili, presenta difficoltà di maneggio, pulizia e misura, ed ha volume e peso maggiori, a parità di potere calorifico. Di conseguenza il carbone, è scarsamente utilizzato come combustibile per i motori termici a bordo di mezzi navali.

Le turbine a gas rispetto a quelle a vapore, hanno consumi molto più elevati e richiedono l'utilizzo di nafta di elevata qualità. Tali svantaggi non sono di solito compensati dai ridotti pesi ed ingombri e dalla rapidità di avviamento che hanno le turbine a gas, quindi il loro utilizzo è limitato a particolari unità navali come possono essere alcuni tipi di quelle della marina militare.

## **1.2 POTENZA, TENSIONE E FREQUENZA A BORDO DELLE UNITÀ NAVALI.**

Il primo dato fondamentale che serve per stabilire la potenza elettrica nominale complessiva di bordo, è dato dalla potenza totale richiesta dal complesso delle utenze elettriche nelle varie configurazioni operative (nave in sosta nel porto, nave in normale

navigazione, ecc.). Per ognuna di esse vanno determinati i relativi coefficienti di utilizzo e di contemporaneità.

La potenza di dimensionamento deve consentire il funzionamento contemporaneo di tutti i carichi nelle condizioni più gravose, e inoltre dovrà garantire un normale funzionamento anche nel caso di perdita di un gruppo Diesel - alternatore. Tenendo conto anche dei rendimenti dei vari organi frapposti tra la generazione e le utenze finali, si può determinare la potenza complessiva e suddividerla sulle varie unità di generazione.

A tale proposito va ricordato che nella condizione di sosta in porto, soprattutto se si tratta di una nave da crociera, la potenza elettrica complessivamente richiesta sarebbe tale da non riuscire a caricare completamente nemmeno uno dei gruppi Diesel - alternatore principali. Per evitare di avere bassi rendimenti e forti emissioni inquinanti nella zona portuale, si fanno funzionare come motori primi quelli dei gruppi elettrogeni d'emergenza, che hanno una potenza unitaria sicuramente più piccola rispetto a quella dei motori Diesel principali.

Di conseguenza gli apparati elettrogeni d'emergenza, hanno dei vincoli di dimensionamento proprio in funzione delle esigenze dei servizi ausiliari durante le soste portuali. D'altra parte, con tale sistema si ottiene anche una verifica completa dell'efficienza dei gruppi elettrogeni d'emergenza ad ogni sosta nei porti.

La scelta definitiva del numero e della taglia dei gruppi Diesel - alternatore, è effettuata in base ai criteri di convenienza tecnico-economica e di reperibilità sul mercato, ma anche in base al fatto che in tutte le condizioni operative previste, deve essere rispettata la condizione di richiesta ad ogni gruppo di generazione di una potenza vicina all' 80% di quella nominale, per ottenere alti rendimenti e basse emissioni inquinanti.

Il valore della potenza nominale complessiva della rete di bordo, incide in maniera fondamentale sulla scelta di un altro parametro: la tensione nominale d'esercizio della rete, e dei suoi vari sottosistemi. Nella Tabella 1.1, sono riportati i valori tipici delle tensioni a bordo delle navi, e delle relative frequenze.

BASSA TENSIONE		MEDIA TENSIONE	
380V	50Hz	2200V	50Hz
415V	50Hz	3300V	50Hz
440V	60Hz	6000V	50Hz
600V	60Hz	6600V	50Hz
660V	60Hz		

**Tabella 1.1:** Valori standardizzati delle tensioni e delle relative frequenze a bordo di mezzi navali.

La ripartizione in categorie di tensione in ambito navale prevede il limite di 660V per la media tensione, oltre il quale si passa all'alta tensione.

All'aumentare dei livelli di potenza complessiva richiesta è inevitabile il passaggio ad un valore più elevato di tensione nominale d'esercizio, per evitare perdite eccessive nella trasmissione dell'energia elettrica e correnti di corto circuito troppo elevate. Ad esempio l'American Bureau of Shipping, prescrive l'utilizzo d'alta tensione per ogni applicazione navale in cui la richiesta complessiva di potenza elettrica oltrepassa il valore di 2 MW.

D'altra parte l'utilizzo di livelli che rientrano nella categoria d'alta tensione, pone problemi non indifferenti per l'isolamento delle varie parti in tensione, anche perché l'ambiente d'esercizio presenta elevati livelli d'umidità e facilità di depositi salini.

Oltre a ciò, bisogna considerare anche il fatto che attualmente le tensioni inverse di picco sopportabili dalle valvole elettroniche dei convertitori di potenza, hanno dei valori piuttosto limitati. Quindi nei casi in cui la scelta della tensione nominale cada sui valori più elevati, bisogna prevedere una delle seguenti soluzioni:

- utilizzo di trasformatori abbassatori per l'alimentazione dei convertitori elettronici di potenza.
- messa in serie di più valvole, per assicurare la tenuta alle tensioni inverse. Questa soluzione, pone però a sua volta dei problemi per la disuniforme ripartizione della tensione complessiva su valvole aventi differenze anche molto piccole nel piano di funzionamento tensione - corrente. Questi problemi possono essere risolti mediante l'utilizzo di resistenze d'uguale valore in parallelo ad ogni valvola, anche se in tal modo si provocano delle perdite aggiuntive di potenza.

In base alle norme del RINA (*Registro Italiano Navale*), le fluttuazioni relative della tensione delle reti di bordo, non devono oltrepassare il  $\pm 20\%$  in fase transitoria (che deve avere la durata massima di 1,5 s), e di  $+ 6\%$  e  $- 10\%$  a regime.

Come mostrato nella Tabella 1.1, la frequenza per reti elettriche navali può assumere i valori di 50 Hz o 60 Hz. Sono ammesse tolleranze del  $\pm 10\%$  nelle fasi transitorie (con durata massima di 10 s), e del  $\pm 5\%$  a regime.

In alcune unità della marina militare sono state utilizzate frequenze più elevate, fino a 400 Hz. Ciò ha il vantaggio della riduzione delle sezioni dei circuiti magnetici a parità d'induzione di lavoro, quindi si ottengono riduzioni dei pesi e degli ingombri. Inoltre si ottengono miglioramenti nella risposta dinamica dei sistemi di regolazione delle macchine elettriche.

D'altra parte aumentando la frequenza, si hanno anche degli incrementi delle perdite per isteresi e per correnti parassite nei materiali magnetici, e per effetto pelle nei materiali conduttori. Inoltre all'aumentare della frequenza aumenta la reattanza longitudinale complessiva della linea e quindi, a parità d'altre condizioni, diminuisce la potenza elettrica trasmissibile al limite della stabilità.

## **2. CENTRALE DIESEL – ELETTRICA.**

L'impianto di produzione d'energia elettrica di una nave comprende una o più centrali:

- di navigazione;
- di porto;
- di emergenza.

Tutte queste devono soddisfare nel migliore dei modi le necessità degli impianti utilizzatori, in ogni condizione di servizio.

A tale proposito il RINA, analogamente ad altri Registri, prescrive che la sorgente principale di energia deve essere sufficiente ad alimentare tutti i servizi ausiliari necessari per mantenere la nave in condizioni ordinarie di funzionamento e di abitabilità e per la conservazione del carico senza sovraccaricare i generatori o fare ricorso alla centrale di emergenza. Prescrive inoltre che la potenza dei gruppi elettrogeni deve essere tale da garantire nel caso d'arresto di uno qualsiasi dei gruppi stessi, l'alimentazione dei servizi per assicurare:

- le condizioni ordinarie di propulsione e sicurezza;
- un benessere corrispondente alle minime condizioni d'abitabilità, che comprendono idonei servizi per cottura, riscaldamento, refrigerazione dei viveri;
- ventilazione meccanica, acqua per servizi sanitari e acqua potabile;
- la conservazione del carico.

Tale potenza deve inoltre essere tale da permettere l'avviamento del più potente motore senza causare l'arresto di un qualsiasi motore già funzionante o avere qualsiasi effetto sfavorevole su altre apparecchiature in funzione.

Oltre a quanto sopra detto i gruppi elettrogeneratori devono essere di potenza tale da assicurare, in caso avaria di uno qualsiasi dei generatori o del suo motore primo, l'alimentazione dei servizi elettrici necessari per avviare l'impianto principale di propulsione dalla condizione di nave priva d'energia.

## 2.1 CLASSIFICAZIONE DEGLI UTENTI.

Già in fase di progetto, non appena possibile, deve essere compilato un particolareggiato elenco degli utenti di bordo, che sarà mantenuto aggiornato in fase di studio e d'allestimento e sarà reso definitivo alla consegna della nave.

I diversi utenti sono divisi in gruppi corrispondenti ai diversi esercizi (Tabella 2.1) e d'ogni utente sono indicati il numero totale delle macchine utilizzatrici installate, la potenza resa unitaria, la potenza assorbita, il fattore di potenza ed infine la potenza resa e assorbita totale.

SERVIZIO	UTENTI
A) COPERTA	Timone, argani, verricelli per scale di banda e imbarcazioni, tonneggi.
B) SICUREZZA	Ausiliari di navigazione, stabilizzazione, sicurezza, emergenza, incendio, esaurimento, proiettori, radio.
C) NAVE	A + B
D) CARICO	Verricelli, gru, montacarichi, frigoriferi e caldaie per il carico. Ausiliari per armi e depositi munizioni.
E) APPARATO MOTORE (A.M.)	Ausiliari dell'A.M. e degli elettrogeneratori.

	Ausiliari per imbarco/sbarco combustibile, lubrificanti acqua caldaie. Ventilatori A.M. e ausiliari officina.
F) CONDIZIONAMENTO	Frigoriferi ed ausiliari caldaie, ventilatori ed estrattori per locali scafo.
G) CUCINA	Ausiliari cucina, cambusa, bar. Frigoriferi celle viveri. Montacarichi.
H) CAMERA	Ascensori. Ausiliari terapie e svago. Pompe acqua igiene, lavanda, potabile.
I) ALBERGHIERO	F + G + H
L) LUCE	Luce normale e di emergenza, interna, esterna, di gala e dei locali dell'apparato motore
M) TOTALE	C +D +E +I +L

**Tabella 2.1:** Divisione degli utenti in gruppi corrispondenti ai diversi servizi.

Secondo quest'elenco è possibile definire, servizio per servizio, la potenza installata e da questa i consumi di ciascun servizio nelle diverse ore del giorno e compilare il cosiddetto bilancio elettrico. Tale bilancio è stabilito per diverse condizioni di servizio della nave tra cui le più caratteristiche sono:

*a) Condizioni operative continue di navigazione.*

- Ai tropici.
- All'equatore, estivo.
- Climi freddi, invernali.
- In crociera.
- In combattimento.
- In allarme.

*b) Condizioni operative continue in sosta.*

- In porto, normale.
- In porto, per carico.
- In porto, ai lavori.
- In rada.

c) *Condizioni operative saltuarie.*

- Manovra.
- Attivazione dell'apparato motore.
- Riattivazione dell'apparato motore.
- Emergenza per allagamento.
- Emergenza per incendio.

I bilanci che si riferiscono alle condizioni di cui al punto c) sono redatti per l'ora del giorno e le condizioni climatiche più gravose, mentre gli altri sono redatti per le seguenti ore più caratteristiche della vita quotidiana a bordo:

- Ore 6: sveglia.
- Ore 8: prima colazione.
- Ore 10: attività mattutina.
- Ore 12: seconda colazione.
- Ore 14: sosta pomeridiana.
- Ore 17: attività pomeridiana.
- Ore 20: pranzo.
- Ore 22: attività serali.
- Ore 24: sosta notturna

Il tipo di classificazione descritta nelle pagine precedenti riguarda solamente gli utenti degli impianti elettrici ausiliari, che comprendono i sistemi di generazione, di distribuzione e d'utilizzazione d'energia elettrica per uso di luce e forza motrice ausiliaria. Qualora la nave fosse dotata di propulsione elettrica occorrerà in fase di progetto tenerne conto per il giusto dimensionamento della centrale.

## 2.2 DETERMINAZIONE E FRAZIONAMENTO DELLA POTENZA.

La potenza totale dell'impianto generatore si determina moltiplicando le potenze degli utenti effettivamente in funzione, ricavate dal bilancio elettrico, per il rispettivo *coefficiente medio d'utilizzazione*  $K_n$ .

Questo coefficiente, ricavato dal calcolo o da valori sperimentali di navi già costruite è dato dal prodotto del *coefficiente d'utilizzazione istantanea* ( $P_{mr} / P_n$ ) per il *coefficiente d'intermittenza* ( $N / 24$ ):

$$K_n = \frac{P_{mr}}{P_n} \cdot \frac{N}{24} \quad (2.1)$$

dove:

$P_{mr}$  = Potenza media resa;

$P_n$  = Potenza nominale;

$N$  = Numero delle ore di servizio al giorno.

Aggiungendo alle potenze assorbite così calcolate le perdite di distribuzione, dovute ai cavi di collegamento tra generatore e utenti, si ottiene il carico medio dell'impianto elettrogeneratore nelle diverse condizioni operative.

Sulla determinazione della potenza totale influiscono inoltre considerazioni sul tipo di nave in esame, con particolare riferimento ai viaggi cui la nave è destinata, al rapporto tra i periodi di navigazione e di sosta in porto e alla frequenza delle soste per lavori di revisione e manutenzione. Si deve anche tener conto di un margine di potenza (variabile dal 10 % al 20% della totale potenza dei generatori) destinato a sopperire alle probabili aggiunte di nuovi utenti durante la vita della nave.

Dal bilancio elettrico si può stabilire oltre alla totale potenza dell'impianto generatore, anche la potenza unitaria ed il numero di generatori più conveniente in modo da avere in funzione, nelle diverse condizioni operative, un numero adatto d'elettrogeni lavoranti in prossimità del pieno carico e quindi nelle condizioni di massimo rendimento e minima necessità di controllo e manutenzione. Occorre considerare in questo caso che gli elettrogeni in funzione devono essere in grado di sopperire non solo alla potenza media richiesta dal carico, ma anche alle punte dovute all'avviamento dei motori elettrici più grossi.

La suddivisione della potenza su molte unità eventualmente diverse tra loro, è conveniente per l'esercizio ma non per quanto riguarda il peso, l'ingombro ed i costi d'installazione e manutenzione.

Considerazioni di tipo prevalentemente economico consigliano di installare elettrogeneratori per quanto più possibile identici tra loro e di fissarne il numero ad un valore che permetta di realizzare un impianto semplice, di buon rendimento, una riduzione del peso e del costo della riserva di potenza necessaria ad assicurare il servizio anche con un generatore in avaria. In conclusione il numero degli elettrogeni è mantenuto per quanto

possibile modesto e la potenza unitaria sono scelta piuttosto esuberante rispetto a quella effettivamente necessaria. In pratica si adottano:

- 2 generatori per potenze assorbite fino a 400 - 500 kW, ciascuno in grado di sopportare tutto il carico.
- 3 gruppi per potenze fino a 1300 - 1500 kW, due dei quali in grado di sopportare tutto il carico.
- 4 o più gruppi per potenze maggiori di 1500 kW, ciascuno con potenza unitaria tra i 2000 e i 4000 kW.

Per ovvi motivi di manutenzione, in condizioni normali gli elettrogeni sono utilizzati a rotazione in modo da tenerli in servizio un ugual numero di ore / anno.

### **2.3 DISTRIBUZIONE DEGLI ELETTROGENI NELLE CENTRALI.**

Dopo aver determinato il numero degli elettrogeneratori, la collocazione dei gruppi è in base al tipo di nave.

Sulla distribuzione degli elettrogeni in una o più centrali principali e sulla loro suddivisione tra loro influiscono particolari criteri di sicurezza e servizio. In base ai primi si prevede la costruzione di una centrale di emergenza e si distribuiscono gli elettrogeni in una, due, o più centrali indipendenti tra loro. In base ai secondi si prevede la costituzione di distinte centrali di navigazione e di porto.

Nel caso di navi da carico, cisterna o miste, gli elettrogeni dell'unica centrale principale sono ubicati di norma nel locale dell'apparato motore, sia per motivi d'economia di spazio, sia per comodità d'esercizio: infatti, il personale di guardia può sorvegliare contemporaneamente la centrale elettrica e l'apparato motore.

Nel caso di nave passeggeri superiore alle 25.000 tonnellate di stazza lorda è obbligatorio distribuire i gruppi elettrogeni in due centrali autonome, il che si realizza a volte accentrando in una delle due il controllo generale dell'impianto.

Sulle navi da guerra, infine, si tende ad applicare all'impianto elettrico la stessa compartimentazione dell'apparato motore e dello scafo, per questo gli elettrogeni vengono divisi in due, tre, quattro centrali, ciascuna munita di proprio quadro, le quali alimentano gli utenti della propria zona ma possono, in emergenza, provvedere in buona parte alle esigenze delle zone limitrofe.

## 2.4 CENTRALE DI EMERGENZA.

Per tutte le navi mercantili di stazza lorda superiore od uguale alle 500 t e per tutte le navi passeggeri abilitate a navigazioni internazionali, i Registri impongono la presenza di una fonte autonoma di energia elettrica indipendente dalla principale, che viene denominata *centrale di emergenza*. Questa può essere costituita da:

- una batteria di accumulatori capace di sopperire al carico di emergenza senza ricariche e senza eccessive cadute di tensione;
- uno o più gruppi elettrogeni costituiti ciascuno da un motore primo Diesel, collegato ad un generatore elettrico che deve fornire, in condizioni di emergenza, energia ai carichi detti in interrompibili.

Il motore Diesel in questione deve essere in grado di avviarsi anche quando la rete principale non è in grado di fornire energia (black start). Per ottenere tale risultato si deve tenere a disposizione la quantità di energia necessaria per l'avviamento e ciò di solito viene fatto immagazzinando aria compressa o prevedendo un collegamento al sistema UPS (*Uninterruptible Power Supply*).

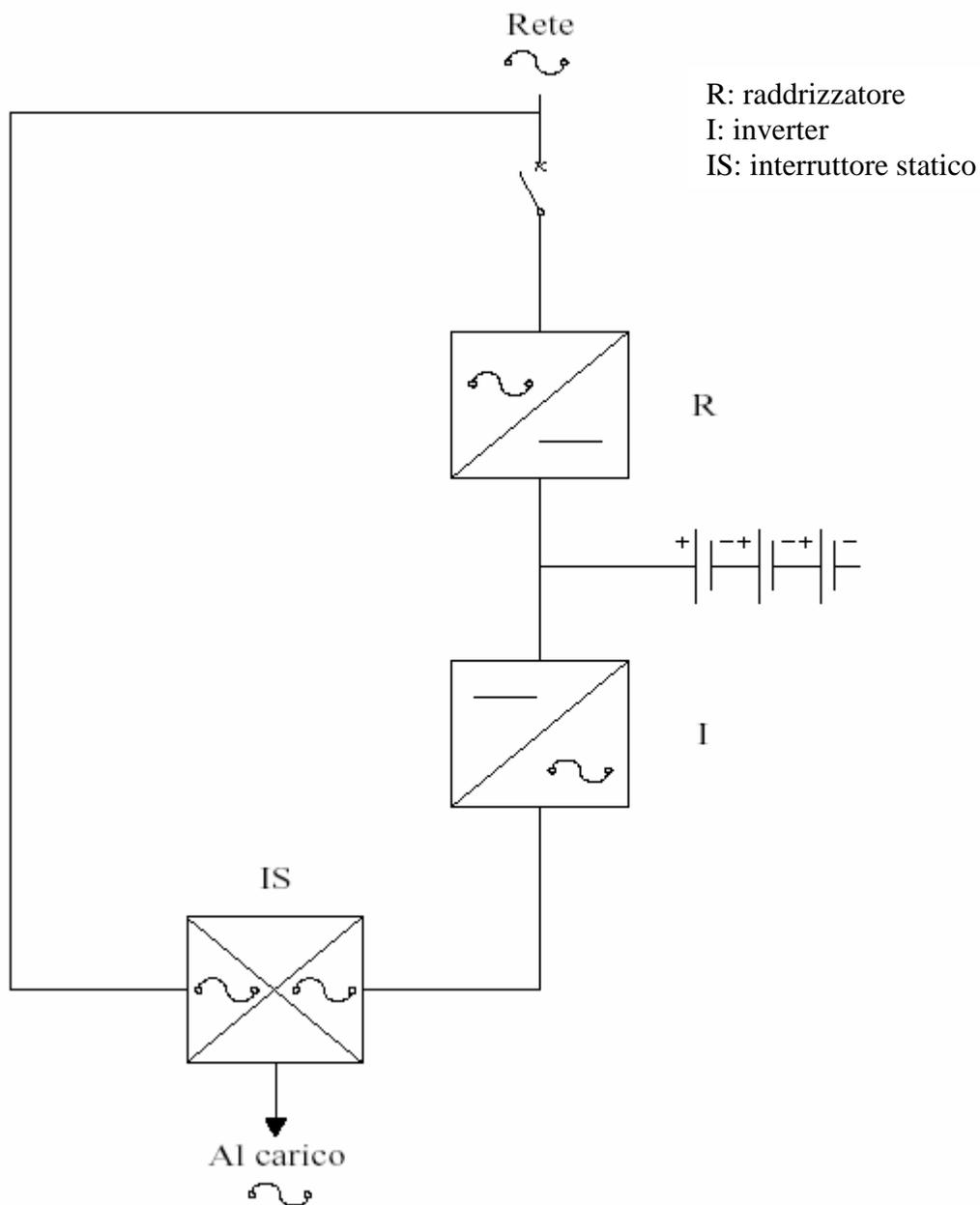
Nel caso di nave passeggeri, se la centrale d'emergenza è costituita da moto-generatori le due fonti d'energia sopra descritte sono entrambe presenti. Il sistema di accumulatori è presente allo scopo di disporre di energia anche durante il tempo di avviamento dell'elettrogeno di emergenza. Ovviamente tale batteria deve essere inserita automaticamente in caso di mancanza della fonte principale, a questo provvedono gli UPS che garantiscono una continuità in sostanza assoluta dell'alimentazione a tutte quelle utenze che non tollerano neppure una breve interruzione dell'alimentazione, come ad esempio:

1. computer;
2. impianto antincendio;
3. parti dell'impianto luce destinate ad illuminare le vie di fuga in condizioni di emergenza.

Lo schema unifilare di un gruppo statico di continuità è riportato in Figura 2.1.

In condizione di normale funzionamento, e quindi in presenza di tensione sulla rete, il raddrizzatore ha il compito di fornire alle batterie di accumulatori l'energia necessaria per mantenerli alla massima carica. In caso d'assenza di tensione il commutatore statico (indicato con IS nella Figura 2.1), commuta in modo rapido (pochi ms.) l'alimentazione dei carichi dalla

rete alle batterie d'accumulatori, che forniscono l'energia precedentemente accumulata attraverso l'inverter, che dovrà essere naturalmente a commutazione forzata.



**Figura 2.1:** Schema unifilare di un gruppo statico di continuità UPS.

La centrale d'emergenza deve essere sistemata a poppavia delle paratie di collisione, fuori del cofano dell'apparato motore e sopra il ponte delle paratie stagne, in modo che il suo funzionamento sia sicuro in caso d'incendio o d'altri incidenti che mettano fuori uso la centrale elettrica principale.

Da notare che tali prescrizioni si riferiscono non solo all'elettrogeno, ma anche ai relativi quadri elettrici, serbatoi di combustibile, accumulatori, apparecchiature d'avviamento e simili, vale a dire a tutti i componenti della centrale stessa. Il locale ideale che soddisfa a tutte queste esigenze viene dunque ricavato nelle sovrastrutture, talvolta nella base del fumaiolo.

L'impianto d'emergenza deve essere in grado di sopportare il carico massimo che può essere richiesto in pratica, per almeno 36 ore nel caso di nave passeggeri, per un periodo più breve nel caso di navi mercantili. Durante questo tempo esso deve alimentare tutti quei servizi che sono necessari per la sicurezza dei passeggeri e dell'equipaggio nel caso in cui avvenga un'emergenza che metta fuori uso le centrali principali.

In genere la centrale d'emergenza deve poter alimentare - se sono elettrici- i seguenti servizi:

- Illuminazione d'emergenza in tutte le zone necessarie per le esigenze di salvataggio.
- Illuminazione d'emergenza in tutti i corridoi, scale, uscite...
- Illuminazione d'emergenza nei locali dell'apparato motore e nelle stazioni di comando
- Pompa d'emergenza per esaurimento.
- Pompa dell'impianto antincendio automatico a nebulizzazione (a sprinklers).
- Verricelli per la messa in mare delle imbarcazioni di salvataggio.
- Manovra delle porte stagne e tagliafuoco.
- Centralino fanali di navigazione e segnali.
- Apparati di radiocomunicazione.
- Reti di comunicazione e segnalazioni interne d'emergenza e d'allarme.
- Timonerie ed ausiliari indispensabili dell'apparato motore.

Per garantire la massima sicurezza e continuità di servizio, si adotta anche una particolare disposizione dei cavi partenti dalle varie centrali (principali e d'emergenza). In particolare sui ponti bassi sono installati e fatti correre i cavi provenienti dalla sorgente principale, mentre sui ponti alti sono sistemati i cavi provenienti dalla centrale d'emergenza. In ciascuna zona si risale dal basso con i cavi delle alimentazioni "normali" (centrale principale), e si scende con i cavi delle alimentazioni d'emergenza.

Per separare ulteriormente le due linee d'alimentazione ed evitare così che un singolo guasto le danneggi entrambe, queste sono disposte su ponti diversi oppure su due diversi lati della nave.

### **3. SISTEMI DI DISTRIBUZIONE.**

La compilazione dell'elenco degli utenti, del bilancio elettrico di cui si è parlato in precedenza, richiede che il progettista abbia già scelto quale sistema di distribuzione adottare. In particolar modo la scelta da effettuare riguarda la frequenza, la tensione e il numero delle fasi.

#### **3.1 LA FREQUENZA.**

Si dovrà scegliere tra i 50 ed i 60 Hz. La corrente continua, infatti, ha dominato gli impianti di bordo fino agli anni '30 ma da allora la corrente alternata ne ha ridotto sempre più il campo d'applicazione. Attualmente l'uso della corrente continua è riservato ad impianti di potenza molto limitata o di caratteristiche particolari.

Le cause principali di tale evoluzione sono essenzialmente dovute a:

- sviluppo di sistemi di controllo e regolazioni più complessi ma basati sull'impiego di convertitori e di corrente alternata;
- aumento della potenza e del numero di macchine elettriche sottoposte a condizioni difficili di lavoro, che hanno imposto l'impiego delle macchine in corrente alternata, più robuste, sicure, meno costose e meno bisognose di manutenzione e riparazione.

Il progressivo estendersi dell'energia elettrica a bordo con il conseguente aumento del valore del coefficiente di elettrificazione, ha sensibilmente aumentato l'incidenza del peso e del costo dell'impianto elettrico sul peso e sul costo della nave, consigliando quindi l'adozione della corrente alternata che ne consente una notevole riduzione (Tabella 3.1):

Elementi dell'impianto	Costo %			Peso %		
	C.C.	C.A.	Riduz	C.C.	C.A.	Riduz
cavi ed accessori	100	70	30	100	65	35
Motori ed avviatori	100	60	40	100	70	30
Generatori	100	90	10	100	95	5
Quadri	100	90	10	100	90	10
Totale impianto	100	75	25	100	80	20

**Tabella 3.1:** Riduzione del peso e del costo di impianti a corrente alternata a 440 V rispetto ad impianti a corrente continua a 220 V.

Le frequenze attualmente in uso sono di 50 e di 60 Hz. La prima è caratteristica degli impianti terrestri d'Europa, Africa e Australia, mentre la seconda, è tipica degli impianti terrestri e navali dell'America e del Giappone. Anche se oggi esistono e si continuano a costruire generatori a 50 Hz si sta osservando una forte tendenza ad utilizzare per gli impianti navali la frequenza di 60 Hz.

Il sistema a 440 V - 60 Hz rispetto a quello a 380 V - 50 Hz è tecnicamente ed economicamente superiore perché richiede macchinari, reti di distribuzione, quadri ed apparecchiature meno pesanti, meno costosi ed infine consente agli ausiliari delle velocità caratteristiche più corrispondenti alle esigenze degli impianti. Infatti la maggiore tensione riduce i valori delle correnti nominali e di corto circuito in gioco, mentre la maggior frequenza aumenta le impedenze di rete e la velocità dei macchinari; permette di realizzare motori a velocità corrispondenti a quelle sincrone di 1800 e 1200 giri al minuto, particolarmente indicate per le pompe ed i ventilatori.

### 3.2 LA TENSIONE.

Recentemente, le realizzazioni in campo navale, hanno evidenziato un notevole aumento della potenza installata a bordo: si raggiungono oggi comunemente potenze di 7-8 MVA per navi mercantili, per arrivare a potenze di 50 MVA per navi da crociera e potenze superiori nel caso di piattaforme di perforazione off-shore. Specialmente per gli ultimi due casi citati diviene obbligatoria la scelta per la generazione d'energia, date le potenze in gioco, di

passare dalla bassa alla media tensione. Si è individuato come limite superiore per la generazione in bassa tensione la potenza di 8 MVA; per potenze maggiori occorre passare alla generazione direttamente in media tensione. Il valore più adatto e oggi più frequentemente considerato è 6600 V.

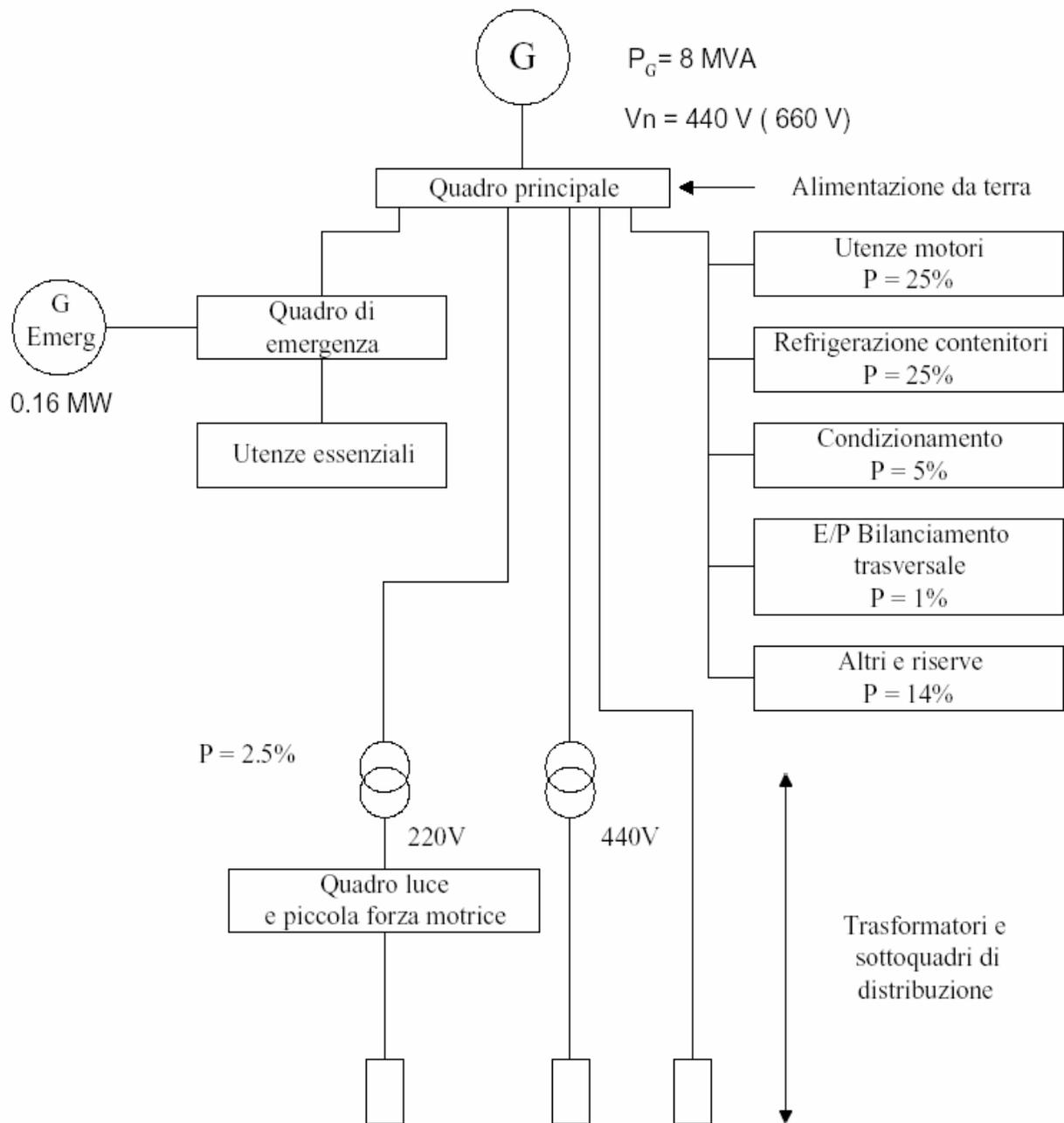
Attualmente la distribuzione in bassa tensione viene fatta generalmente con tensioni di 440 V per tutti gli utenti di potenza rilevante, 220 V per piccoli utenti e per l'impianto di illuminazione. Anche si possono però individuare centri di potenza elevata e questo fa nascere il dubbio se sia tecnicamente ed economicamente conveniente innalzare la tensione ad un valore superiore. A parità di potenza trasmessa, in sostanza tutti i vantaggi dovuti all'innalzamento della tensione, derivano essenzialmente dalla notevole riduzione della corrente. Si deduce che i vantaggi principali sono:

- riduzione dei costi di investimento (sezioni inferiori dei conduttori sia nei quadri che sulle linee in cavo di distribuzione);
- riduzione dei costi di esercizio (perdite joule minori, minori costi di manutenzione conseguenti alle correnti inferiori in gioco);
- migliori condizioni di esercizio (cadute di tensione più basse, correnti di corto circuito inferiori, lunghezze ammissibili dei cavi più elevate);
- tendenze alla riduzione degli spazi occupati e dei pesi di quadri, cavi, ecc.

Allo scopo di quantificare i vantaggi evidenziati sono stati analizzati in dettaglio i sistemi di distribuzione elettrica dei due tipi di nave prima citati: una nave passeggeri da crociera a propulsione elettrica e una nave portacontainer.

#### *Nave portacontainer.*

In Figura 3.1 è rappresentato lo schema a blocchi semplificato dell'impianto elettrico. È un tipico schema radiale, con generazione in bassa tensione mediante generatori sincroni trascinati da motori Diesel e alimentanti il quadro principale da cui si dipartono tutti i servizi nave.



**Figura 3.1:** Schema a blocchi dell'impianto elettrico di generazione e distribuzione di una nave portacontainer. Il 70% della potenza distribuita è costituito da carichi che vengono alimentati a 440 V o 660 V e il 30% viene distribuito a tensioni inferiori che richiedono l'impiego di trasformatori. I risultati dei calcoli sono stati raccolti in una serie di tabelle che facilitano il confronto della tensione adottata.

Nella Tabella 3.2 sono riportate le voci che concorrono a definire il costo totale del quadro principale.

COMPONENTI DEL COSTO	INDICI DI COSTO % (1)	
	440 V	660 V
- INTERRUTTORI	42	33.6
- SBARRE DI RAME LAVORATE	8	6.1
- COMPONENTI DIVERSI	15	15
- ORE UOMO	35	34
TOTALE	100	88.7

**Tabella 3.2:** Indici di costo del quadro principale di una nave portacontainer in funzione della tensione di 440 V e 660 V. (1) Fatto 100 il costo totale del quadro per 440 V

Si osserva che i componenti su cui si realizzano sensibili risparmi sono gli interruttori e le sbarre di rame lavorate. Passando da 440 V a 660 V il risparmio sarà del 12 % circa. La riduzione del peso del quadro sarà del 10% circa su un totale di 10.000 kg.

Nella Tabella 3.3 è riassunta invece la situazione dei cavi.

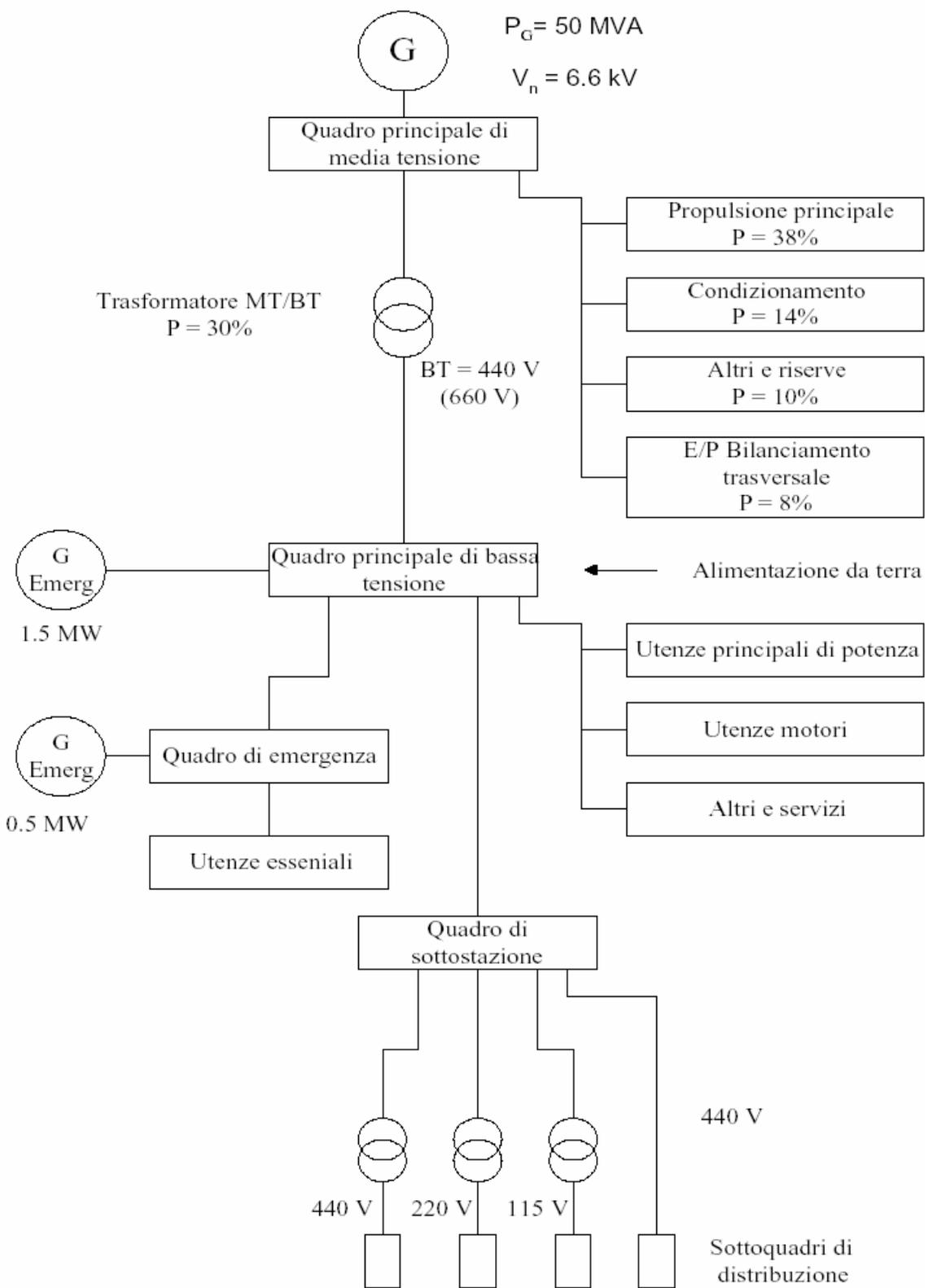
GRANDEZZA	TENSIONE		RAPPORTO
	440 V	660 V	
LUNGHEZZA TOTALE (m)	22143	19429	0.88
PESO TOTALE (kg)	55150	35830	0.65
COSTO CAVO (1)	100	65	0.65
COSTO INSTALLAZIONE (1)	100	75	0.75
COSTO TOTALE DEI CAVI INSTALLATI (1)	100	70	0.70

**Tabella 3.3:** Quantità ed indici di costo dei cavi installati su una nave portacontainer in funzione delle tensioni di 440 V e 660 V. (1) Fatto 100 il costo riferito a 440 V.

Si evidenzia un risparmio sulle lunghezze totali, dovuto alla riduzione della quantità di cavi in parallelo e alla traslazione nell'uso delle sezioni cavo verso il basso, ciò implica una diminuzione del peso e una riduzione del tempo di stesura. Un altro vantaggio è quello del risparmio dello spazio occupato dai percorsi cavi. La ristrettezza degli spazi a disposizione amplifica enormemente il problema di sistemazione dei percorsi, del loro coordinamento con le condotte di ventilazione e condizionamento e i tubi dei vari servizi nave.

#### *Nave passeggeri*

In Figura 3.2 è rappresentato lo schema a blocchi dell'impianto elettrico di generazione e distribuzione.



**Figura 3.2:** Schema a blocchi dell'impianto elettrico di generazione e distribuzione di una nave passeggeri.

Per il 70% dei carichi principali è stata scelta la tensione di 6600 V a 60 Hz. Per la distribuzione del rimanente 30% della potenza installata, sono impiegati tre trasformatori MT/BT con il secondario avente tensione di 440 o 660 V.

Analogamente all'esempio precedente nella Tabella 3.4 sono indicati gli indici di costo dei componenti; per un quadro a 660 V è del 6% e le voci che concorrono in maggior misura a realizzare un risparmio sono ancora gli interruttori e le sbarre di rame, mentre la riduzione della manodopera incide soltanto per l'1%.

COMPONENTI DEL COSTO	INDICI DI COSTO % (1)	
	440 V	660 V
- INTERRUTTORI	32	29.8
- SBARRE DI RAME LAVORATE	9.5	7.3
- COMPONENTI DIVERSI	22	22
- ORE UOMO	36.5	34.9
TOTALE	100	88.7

**Tabella 3.4:** Indici di costo del quadro principale di una nave passeggeri in funzione della tensione di 440 V e 660 V. (1) Fatto 100 il costo totale del quadro per 440 V.

La riduzione del peso del quadro principale è del 12% su un totale di 27.000 kg.

Per i cavi si rimanda alla tabella 5 dove si evidenzia una maggiore riduzione dei costi rispetto al primo caso determinata dalla maggiore complessità dell'impianto.

GRANDEZZA	TENSIONE		RAPPORTO
	440 V	660 V	
LUNGHEZZA TOTALE (m)	63402	54798	0.86
PESO TOTALE (kg)	187900	117800	0.63
COSTO CAVO (1)	100	62	0.62
COSTO INSTALLAZIONE (1)	100	70	0.70
COSTO TOTALE DEI CAVI INSTALLATI (1)	100	66	0.66

**Tabella 3.5:** Quantità ed indici di costo dei cavi installati su una nave passeggeri in funzione delle tensioni di 440 V e 660 V. (1) Fatto 100 il costo riferito a 440 V.

In generale, per i due casi esaminati, si evidenziano i seguenti ulteriori vantaggi:

- riduzione dei volumi dei quadri e degli spazi dedicati ai percorsi dei cavi con conseguente semplificazione del progetto di lay-out;
- riduzione delle perdite per effetto joule quantificabile in circa il 15%;
- riduzione delle cadute di tensione sulle tratte dei cavi.

Si completa il paragrafo valutando quali possano essere i problemi tecnici che si riscontrano nella realizzazione delle macchine, con l'innalzamento della tensione, la loro reperibilità sul mercato ed i costi conseguenti.

Un'indagine svolta tra le principali aziende interessate nel settore, mostra che non si riscontrano difficoltà tecniche significative nella realizzazione di macchine rotanti e trasformatori.

Nel caso di generatori e motori l'innalzamento della tensione consente un aumento della potenza fino a 4.5 MVA per i generatori e 1 MVA per i motori. I costi e le prestazioni non subiscono variazioni rilevanti.

L'innalzamento della tensione influenza gli apparecchi di manovra e di protezione, cioè gli interruttori e i contattori. Si ha la tendenza ad una riduzione delle prestazioni correlate ai fenomeni d'interruzione delle correnti di carico, sovraccarico e corto circuito, per taglie piccole per gli interruttori e medie per i contattori.

Chiaramente un altro aspetto negativo dell'innalzamento della tensione è l'aumento delle tensioni di prova dettate dalle norme. Passando, infatti, dai 440 V ai 660 V le tensioni di prova dei vari apparecchi variano come in Tabella 3.6.

	V di prova per 440 V	V di prova per 660 V
<b>Macchine rotanti</b>	2000 V	2320 V
<b>Trasformatori</b>	2500 V	3000 V
<b>Quadri</b>	2500 V	3000 V
<b>Apparecchi di manovra</b>	2500 V	2500 V
<b>Cavi</b>	2500 V (IEC) 3500 V	2500 V (IEC) 3500 V

**Tabella 3.6:** Tensioni di prova dei vari elementi dell'impianto per tensioni nominali di 440 e 660 V.

I risultati dello studio condotto portano comunque alla conclusione che un innalzamento delle tensioni a 660 V comporta vantaggi tecnici ed economici.

### 3.3 SISTEMI DI DISTRIBUZIONE PER RETI PRIMARIE.

Nelle reti primarie di forza è generalmente impiegato il sistema trifase a tre conduttori, sistema che può essere gestito in due modi:

1. Con neutro isolato, in quanto la prima andata a massa di una qualunque parete della rete primaria non costituisce corto circuito e non provoca l'immediato distacco della sezione di rete interessata, il quale sarebbe inopportuno potendo questa funzionare ancora in modo soddisfacente.
2. Con neutro a terra tramite resistenza.

### 3.4 SISTEMA DI DISTRIBUZIONE PER RETI SECONDARIE.

Inizialmente, quando gli impianti di bordo erano poco estesi e le potenze in gioco modeste, le reti secondarie erano costituite da sistemi monofasi a due conduttori isolati o a tre conduttori con punto medio del trasformatore collegato a massa (Figura 3.3 e Figura 3.4).

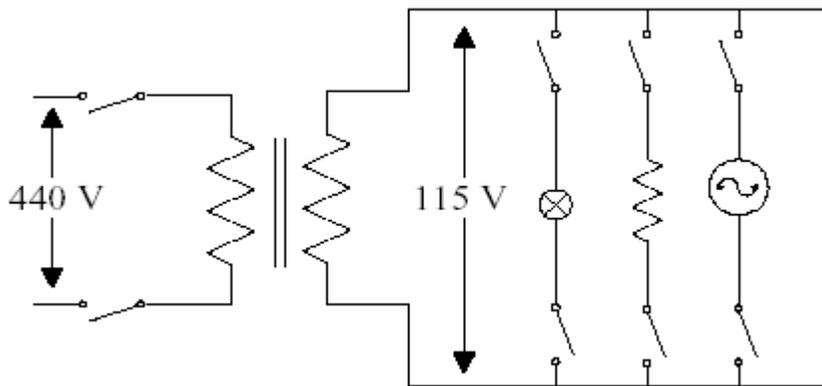


Figura 3.3: Sistema monofase a due conduttori isolati per reti secondarie.

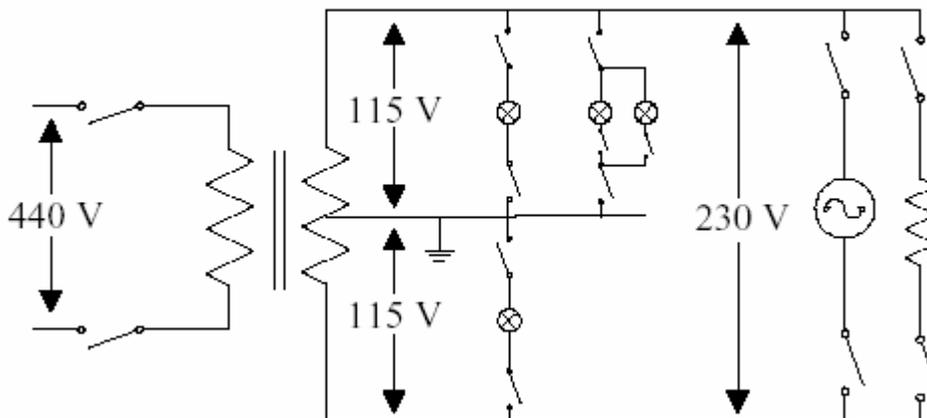
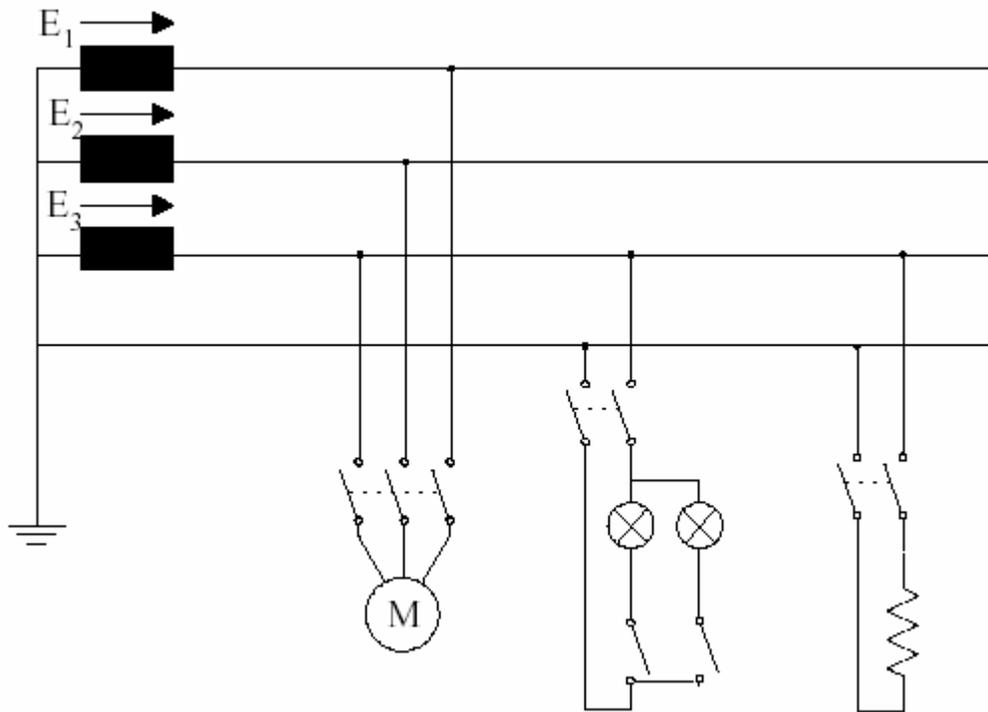


Figura 3.4: Sistema monofase in derivazione a tre conduttori, 230/115 V, col punto medio del trasformatore a massa.

Oggi che le potenze in gioco sono notevolmente aumentate si preferisce utilizzare il sistema trifase a quattro fili (Figura 3.5):



**Figura 3.5:** Sistema trifase a quattro fili con neutro a terra.

Con questo sistema si possono facilmente alimentare sia motori trifasi di potenza ridotta sia i forni, le cucine, le luci alla tensione di 220 V. Inoltre in caso di impianti molto estesi (come è il caso di navi passeggeri) questo sistema fa conseguire un certo risparmio perché consente di utilizzare interruttori automatici con neutro apribile che sono economicamente più convenienti dei normali interruttori bipolari.

Il neutro di questi sistemi viene messo a terra. Gestire, infatti, la rete di bassa tensione con neutro isolato significa mettersi nelle condizioni molto pericolose, poiché un contatto accidentale tra le rispettive fasi del sistema in media con quello in bassa tensione comporterebbe una notevole sovratensione proprio per la rete in bassa tensione con probabili scariche verso terra dei punti più deboli dell'impianto e grave pericolo per le persone.

Con questo tipo di gestione un eventuale guasto tra media e bassa tensione si traduce, in sostanza, in una corrente di circolazione che interessa le fasi guaste e gli impianti di terra delle due reti. L'entità delle correnti in gioco è tale da far intervenire le protezioni di massima corrente. Durante la permanenza del guasto la tensione verso terra del sistema in bassa tensione assume un valore definito dai rapporti tra le impedenze in gioco nel circuito di guasto. Anche se le conseguenti sovratensioni possono raggiungere valori importanti per

l'impianto, usualmente questo non costituisce pericolo per le persone grazie alla breve durata della situazione di guasto.

#### **4. SCHEMI ELETTRICI.**

Nella scelta dello schema di distribuzione da adottare per l'impianto elettrico ausiliario di una data nave si deve cercare, partendo dai dati fondamentali del problema quali la corrispondenza alle necessità di servizio, di ottenere con il minor costo, ingombro, peso e altezza baricentrica dell'impianto, le migliori caratteristiche di servizio e la massima sicurezza di esercizio ed efficacia e selettività delle protezioni, così da assicurare una buona continuità di alimentazione degli utenti, specie se essenziali.

A tale scopo occorre conseguire, per quanto possibile:

- la minima lunghezza, il massimo coefficiente di utilizzazione ed il minor peso e costo specifico dei cavi;
- la massima impedenza di linea, compatibilmente con le cadute di tensione a regime e transitorie, le perdite di energia e le riduzioni del fattore di potenza ammissibili;
- lo scaglionamento delle protezioni sul numero minimo di gradini richiesto dalle apparecchiature impiegate;
- l'alimentazione dei sottoquadri di smistamento e distribuzione con sistema a scacchiera da due diversi quadri principali o sezioni diverse dell'unico quadro principale;
- l'alimentazione di utenti complementari tra loro con linee indipendenti derivate da sottoquadri diversi;
- la realizzazione di percorsi diversi per linee complementari tra loro;
- la massima continuità di servizio di ogni circuito, per quanto riguarda cavi ed apparecchiature, ed integrazione dello stesso con i necessari circuiti di riserva;
- la massima semplicità e facilità di manovra e manutenzione delle apparecchiature.

Nelle reti secondarie la distribuzione è quasi sempre eseguita con sistema radiale semplice e solo qualche volta, per gli utenti più importanti, con alimentazione di riserva singola, pertanto il problema si riduce alla scelta dello schema della rete primaria.

Chiaramente per ogni tipo di grandezza e di caratteristica d'impiego della nave, si ha uno schema particolarmente idoneo e generalmente più usato.

Per imbarcazioni minori, con potenza installata intorno ai 500 kW si riscontrano in prevalenza schemi radiali semplici che ben si adattano alla limitata corrente di corto circuito nominale dell'impianto e alle limitate distanze degli utenti dal quadro principale.

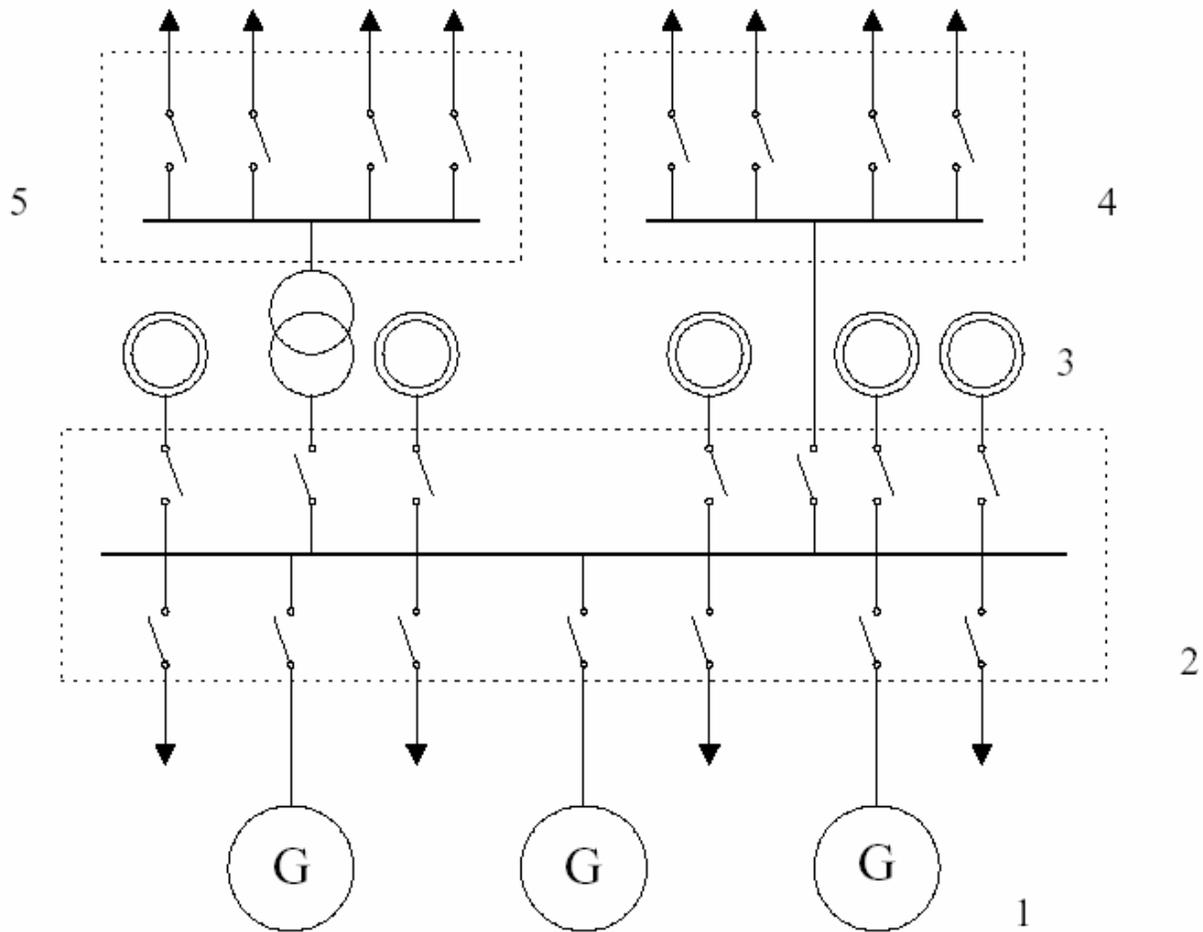
Sulle navi da carico e miste di tipo oceanico s'impiegano generalmente schemi radiali composti, mentre sulle navi passeggeri si preferisce adottare schemi di tipo radiale composto con anelli, o collegamenti di riserva che assicurano elevata continuità di servizio a tutto l'impianto.

Occorre notare in ogni modo che gli impianti più moderni (navi da guerra o passeggeri da crociera), si dispone, come già detto, di due centrali elettriche distinte, oltre a quella d'emergenza, e di un solo quadro principale diviso in due sezioni distinte, ciascuna delle quali collegata ad uno o più generatori, di modo che, in caso d'avaria ad uno dei quadri o sezioni di quadro, è ancora possibile, con opportuni collegamenti, conservare un'efficienza ridotta, ma tale da far mantenere alla nave un buon grado di sicurezza e abitabilità.

#### **4.1 SCHEMA RADIALE SEMPLICE.**

Lo schema radiale semplice (Figura 4.1) è quello che più si presta ad impianti di potenza limitata senza particolari esigenze di sicurezza.

Esso comprende un quadro principale ad unica sezione il quale alimenta direttamente gli utenti più importanti nonché i centralini di distribuzione per luce e piccola forza.



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

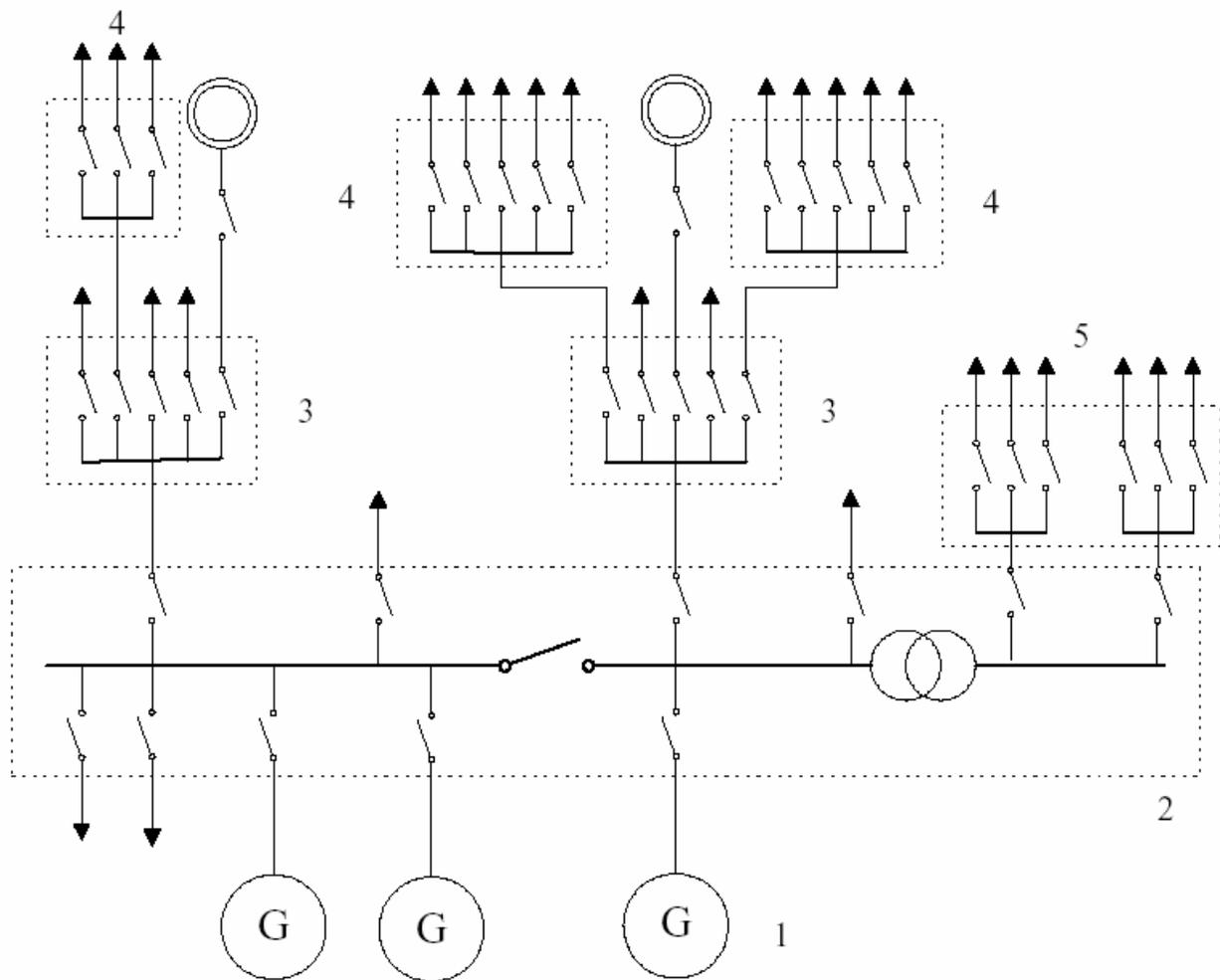
Questa disposizione costruttiva rende l'impianto particolarmente vulnerabile sul quadro principale, nodo obbligatorio di passaggio di tutta l'energia elettrica perché qualsiasi guasto di rilievo in esso provoca l'arresto della nave con pericolo e disagio per i passeggeri.

L'alimentazione diretta del quadro principale di tutti gli utenti più importanti e di tutti i centralini di distribuzione per piccola forza e luce aumentano il numero dei circuiti partenti dal quadro con conseguente aumento di peso, ingombro e costo del quadro principale.

D'altra parte, a causa dell'assenza di sottostazioni e sottoquadri di smistamento, si consegue una riduzione considerevole del numero totale degli interruttori, mentre il collegamento diretto dei centralini di distribuzione al quadro principale con cavi di sezione limitata aumenta generalmente l'impedenza di linea e la caduta di tensione e riduce conseguentemente il valore della corrente di corto circuito nei sottoquadri.

## 4.2 SCHEMA RADIALE COMPOSTO.

Questo schema (Figura 4.2) si presta meglio del precedente alla realizzazione di impianti di media potenza e comprende un quadro principale ad una o più sezioni ed un certo numero di sottoquadri che provvedono esclusivamente allo smistamento dell'alimentazione dal quadro principale ai centralini di distribuzione che si trovano nella zona ad essi circostante.



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

Lo schema radiale composto presenta una sensibile riduzione del numero dei circuiti derivati dal quadro principale, con relativo minor peso ed ingombro e maggior grado di sicurezza per il minor numero di apparecchiature direttamente collegate alle sbarre principali,

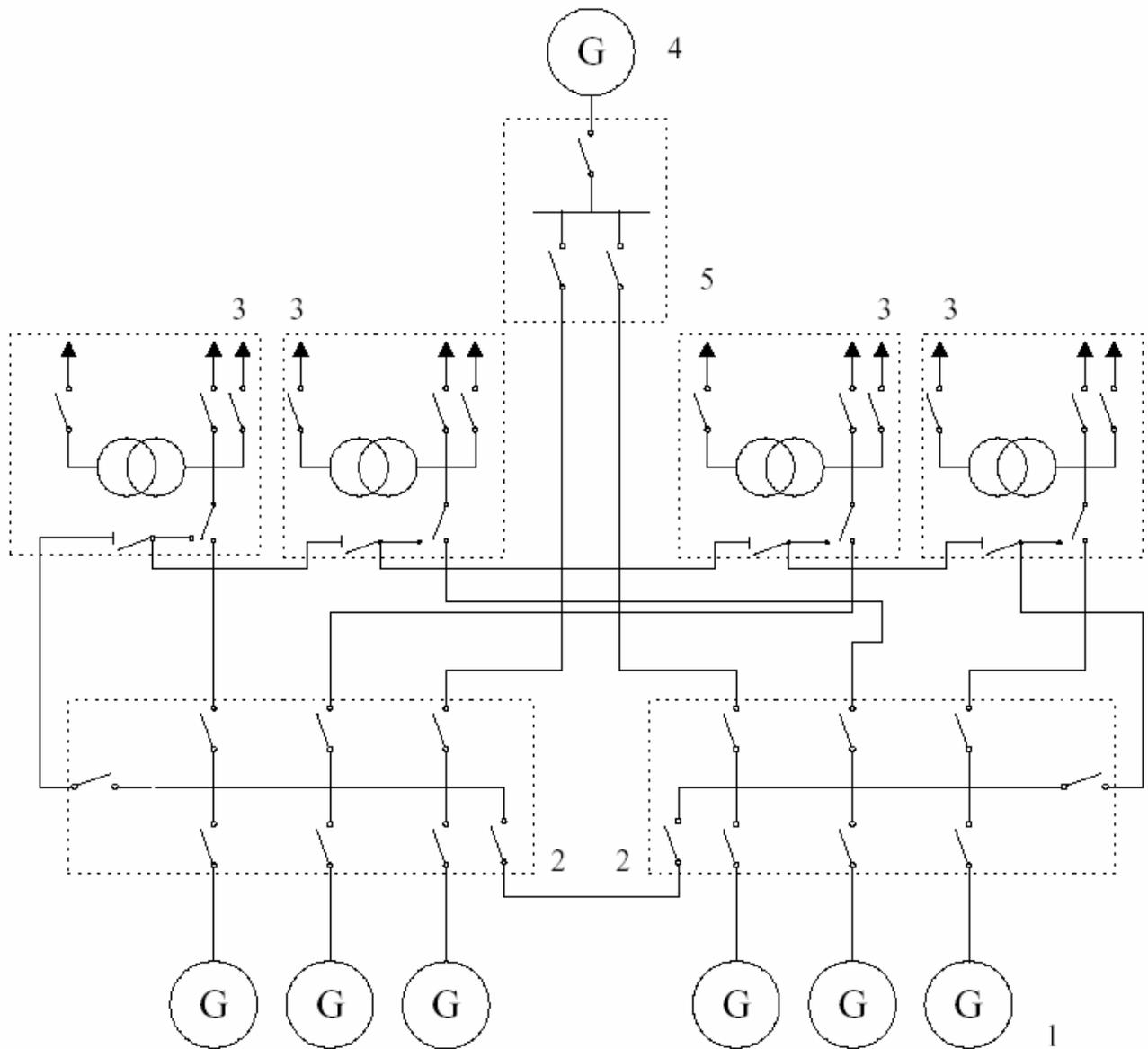
le quali però continuano ad essere, come per lo schema radiale semplice, il passaggio obbligato di tutta l'energia elettrica distribuita e perciò il punto più delicato di tutto l'impianto.

Per quanto riguarda invece la sicurezza di continuità di servizio degli utenti derivati da diversi sottoquadri di smistamento, questa viene naturalmente ad essere ridotta, in quanto può sempre accadere che, per correnti di corto circuito superiori ad un dato valore, risulti necessario l'intervento della protezione a monte dei circuiti di alimentazione dei sottoquadri, per cui tutti gli utenti da essi derivati vengono messi fuori servizio per un periodo dipendente dalla posizione e qualità del guasto.

Per questo motivo gli utenti essenziali come il timone, gli argani ed ausiliari essenziali dell'apparato motore, vengono alimentati direttamente dal quadro principale, singolarmente, oppure tramite alcuni sottoquadri di smistamento di particolare caratteristiche in relazione al richiesto maggior grado di sicurezza.

### **4.3 SCHEMA RADIALE CON ANELLO DI RISERVA.**

Questo schema (Figura 4.3) dispone di un anello di riserva destinato ad alimentare quelle sottostazioni che abbiano in avaria la linea di normale alimentazione radiale, o in caso di grave avaria ad uno dei due quadri principali, l'intero gruppo di sottostazioni da questo normalmente alimentate. Poiché l'ultimo dei due casi è senz'altro il più gravoso, l'anello dovrà essere dimensionato per sopperire alle esigenze dell'impianto in detta eventualità.



**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.

In tal caso l'alimentazione potrà essere derivata da una sola delle due estremità dell'anello e, essendo in efficienza uno dei due quadri, sarà in genere disponibile solo la metà dei generatori e quindi della relativa potenza installata.

Potendo supporre che il coefficiente di carico sia, in condizioni normali, pari a 0.5 e che in avaria esso possa raggiungere il valore di 0.8 (riferito alla metà dei generatori ora

disponibili), si avrà che in avaria la potenza totale disponibile per gli utenti è al massimo pari all'80 % di quella impegnata in servizio normale.

L'anello può quindi essere dimensionato per una potenza molto ridotta e l'adozione di questo tipo di schema consente un risparmio di peso, rispetto allo schema ad anello semplice, che si aggira intorno al 30-35 %. Si rileva inoltre che tanto in servizio normale che in avaria lo schema rimane in ogni caso radiale, conseguendosi così sempre buone caratteristiche d'efficienza e selettività di protezione pur disponendosi delle necessarie alimentazioni di riserva.

## **5. I CAVI A BORDO.**

La distribuzione dell'energia elettrica a bordo viene effettuata esclusivamente per mezzo di cavi, cioè di conduttori ricoperti da guaine isolanti e rivestimenti protettivi. È ammesso l'uso di conduttori nudi solo come sbarre all'interno di quadri elettrici.

### **5.1 SCELTA DEL CAVO.**

La tensione per la quale il cavo è stato progettato non deve essere minore della tensione nominale del circuito, nel quale il cavo stesso è inserito e l'isolante deve essere scelto in modo che la sua temperatura di funzionamento sia al minimo del 10 % più alta della massima temperatura ambiente che si presume esista, o sia prodotta nel luogo dove il cavo è installato. In base quindi alla tensione nominale e alla temperatura di funzionamento, viene determinato il tipo di isolamento necessario.

Per quanto riguarda la copertura protettiva, questa dipende dalla collocazione del cavo. Le norme ritengono necessario dotare di guaina impermeabile tutti i cavi installati sui ponti ed esposti alle condizioni atmosferiche, quelli situati in ambienti umidi o bagnati, in luoghi refrigerati o in sala macchine e in generale devono essere provvisti di tale guaina tutti i cavi situati in luoghi dove sono presenti condense o vapori pericolosi.

### **5.2 DIMENSIONAMENTO.**

Il proporzionamento dei cavi consiste nelle seguenti fasi:

- determinare la corrente in servizio continuativo che il cavo deve trasportare nelle più gravose condizioni di esercizio, dove con *servizio continuativo* si intende un tempo di durata superiore a tre volte la costante di tempo termica del cavo;
- determinare la sezione di rame corrispondente;
- verifica della caduta di tensione lungo la linea, che non deve essere superiore a quella prevista dalle norme per il tipo di circuito.

La sezione del conduttore si ricava generalmente da diagrammi che mostrano come varia la corrente nominale in funzione della sezione del rame. Solitamente si hanno quattro curve, che corrispondono ai diversi tipi d'isolamento, e precisamente partendo da quelle più basse alle più alte si ha:

- 1) PVC (60°C);
- 2) PVC resistente al calore (75°C);
- 3) Gomma butilica (80°C);
- 4) Gomma al silicone e isolante minerale (95°C).

Tali diagrammi sono validi sia in corrente continua sia in corrente alternata, per cavi unipolari e per temperature ambiente di 45°C che è considerato un valore standard generalmente applicabile per ciascun tipo di nave e per la navigazione in ogni clima.

Quando comunque è noto che la temperatura ambiente rimane permanentemente al di sotto dei 45°C la corrente nel grafico può essere aumentata, ma in nessun caso la temperatura deve essere considerata al di sotto dei 35 °C.

Quando d'altra parte ci si aspetta una temperatura superiore ai 45 °C la corrente del grafico deve essere diminuita.

I fattori di correzione per i due casi ora citati sono raccolti nella Tabella 5.1.

Max temp. del cond.	Fattore di correzione per temperatura ambiente di										
	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C	80 °C	85 °C
60	1,29	1,15	1,00	0,82	–	–	–	–	–	–	–
75	1,15	1,08	1,00	0,91	0,82	0,71	0,58	–	–	–	–
80	1,13	1,07	1,00	0,93	0,85	0,76	0,65	0,53	–	–	–
95	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55	0,45

**Tabella 5.1:** Fattore di correzione in funzione dei diversi valori di temperatura ambiente.

Se invece i cavi sono a più conduttori occorre moltiplicare per i seguenti fattori di correzione approssimati:

- 0,85 per i cavi a due conduttori;
- 0,70 per i cavi a tre o quattro conduttori.

Tutte le portate così ricavate sono valide se lungo il loro percorso i cavi sono riuniti in gruppi di non più di sei e se questi giacciono tutti sullo stesso piano, oppure se, in caso di raggruppamenti a più strati, tra uno strato e l'altro viene lasciato uno spazio sufficiente a consentire la libera circolazione dell'aria.

Nel caso che tali condizioni non siano rispettate si deve applicare alle portate un coefficiente di riduzione pari a 0,85.

Si valuta ora la caduta di tensione misurata tra le sbarre di alimentazione principali o d'emergenza e un punto qualsiasi della rete quando la linea trasporta il massimo carico sotto normali condizioni di esercizio.

Essa rappresenta una verifica della corretta scelta della sezione del cavo, in quanto una scelta errata può portare ad un eccessivo abbassamento di tensione sugli utilizzatori che si ripercuote negativamente su apparecchi elettrici come motori asincroni, lampade a scarica, o sistemi di controllo elettronici. Per questo le norme CEI 60092-352 impongono che il  $\Delta V$  massimo non debba superare il 6% della tensione nominale per circuiti di forza motrice, o riscaldamento, non debba invece essere superiore al 5% per i circuiti di illuminazione.

Per alimentazione da batterie non superiore ai 50 V questo valore può aumentare fino al 10%. Sotto speciali condizioni di breve durata come ad esempio l'avviamento di motori, si può accettare una caduta di tensione maggiore ammesso che l'installazione sia in grado sopportarla. I cavi e i loro conduttori isolati devono infine resistere agli effetti termici e meccanici dovuti al massimo valore della corrente di corto circuito prendendo in considerazione, non solo la caratteristica tempo/corrente dell'apparecchio di protezione del circuito, ma anche il valore di picco durante il primo mezzo ciclo della corrente di corto calcolata.

### 5.3 INSTALLAZIONE.

I Registri stabiliscono precise norme per l'installazione dei cavi, relativamente al percorso, alla protezione meccanica, al fissaggio dei medesimi, in modo che siano assicurate all'impianto le migliori caratteristiche di funzionalità e sicurezza.

Le condutture ed i cavi devono seguire percorsi il più possibile rettilinei ed accessibili, essere fissati in posto per mezzo di graffette e simili supporti e devono essere rispettati i valori dei raggi di curvatura interni che variano a seconda del tipo di cavo come mostrato in Tabella 5.2.

tipo di cavo		diametro esterno del cavo (D)	minimo raggio interno di curvatura
isolante	rivestimento esterno		
termoplastico ed elastomerico	guaine metalliche intrecciate	tutti	6 D
	altre finiture	$\leq 25$ mm $> 25$ mm	4 D 6 D
minerale	guaine metalliche rigide	tutti	6 D

**Tabella 5.2:** Raggio di curvatura ammissibile in funzione del tipo di cavo.

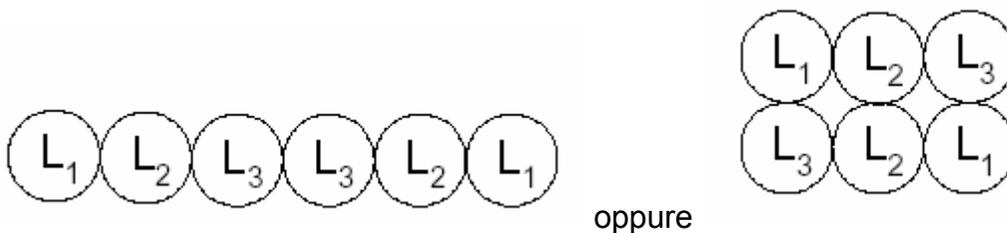
Per motivi di sicurezza e accessibilità si consiglia di limitare al minimo la posa di cavi entro condotte metalliche (tubi e simili). In caso d'applicazione in condotta, queste devono essere internamente lisce e protette contro la corrosione, e devono inoltre essere sagomate in modo tale da evitare il danneggiamento dei cavi e avere dimensioni e raggio interno tali da permettere un facile accesso e una facile uscita degli stessi. Il raggio di curvatura interno deve comunque essere maggiore di quello permesso dal cavo.

Le condotte devono inoltre essere disposte in modo tale da non permettere l'accumulo di acqua nel loro interno (anche per condensazione), devono essere collegate a massa e la continuità elettrica delle stesse deve essere assicurata in special modo nelle giunzioni.

Negli impianti in corrente alternata, per evitare riscaldamenti dovuti alle correnti indotte, si prescrive che le condutture siano realizzate per quanto possibile con cavi multipolari (a due conduttori nelle linee monofasi, a tre nelle trifasi, a quattro nelle trifasi con neutro). Nel caso che sia necessario impiegare cavi unipolari devono essere usati i seguenti accorgimenti

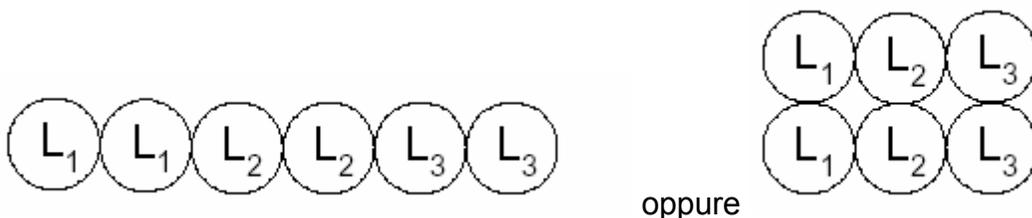
- i cavi devono essere non armati oppure armati in materiale diamagnetico;
- i cavi appartenenti allo stesso circuito devono essere posti nella stessa condotta o i collari che li fissano devono abbracciare tutte le fasi;
- quando un cavo unipolare ha una corrente nominale maggiore di 250 A e deve passare attraverso una paratia di acciaio, lo spazio tra i cavi e la paratia deve almeno essere di 50 mm a meno che i cavi appartenenti allo stesso circuito siano disposti a triangolo;
- per simmetrizzare la linea in circuiti trifasi formati da cavi unipolari e di lunghezza superiore a 30 m occorre effettuare una trasposizione al massimo ogni 15 m per cavi di sezione maggiore ai 185 mm<sup>2</sup>;
- in circuiti formati da più cavi unipolari in parallelo per fase tutti i cavi devono seguire lo stesso percorso e avere la stessa area, inoltre i cavi che riguardano la stessa fase dovrebbero per quanto possibile essere alternati con le altre fasi in modo da evitare la disuniforme distribuzione di corrente.

Nel caso di due cavi per fase la disposizione corretta risulta essere quella in Figura 5.1:



**Figura 5.1:** Disposizione corretta dei cavi.

e non come in Figura 5.2:

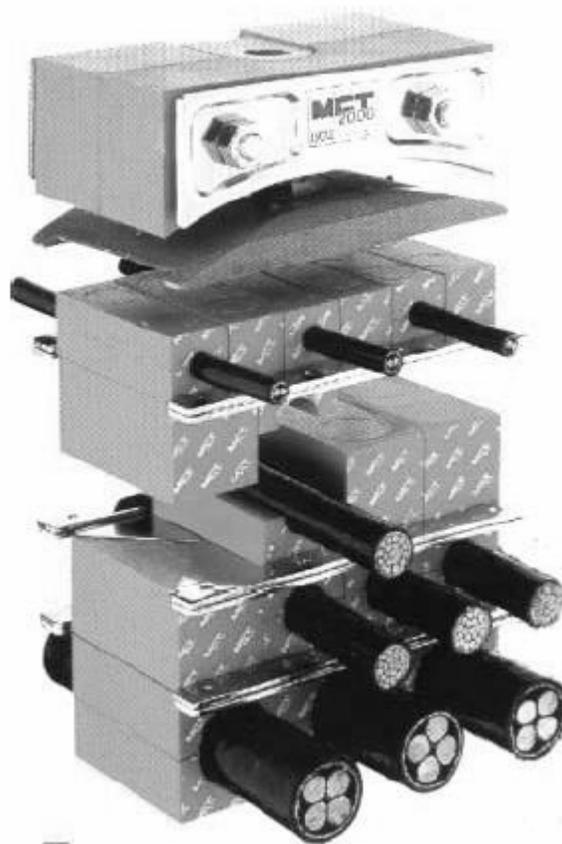


**Figura 5.2:** Disposizione scorretta dei cavi.

È possibile l'utilizzo di tubi o condotte non metalliche a patto di utilizzare materiale ritardante alla fiamma sia per i cavi che per le condotte stesse. Bisogna porre poi particolare

attenzione alla posa dei cavi con diverse guaine protettive e diversa temperatura di funzionamento, le norme impongono infatti di evitare in questi casi di porre nella medesima condotta o tubo cavi con materiale isolante con diverse temperature massime di funzionamento e con guaine protettive differenti e tali che l'una può causare il danneggiamento dell'altra.

Particolare cura deve essere posta nella realizzazione d'attraversamenti di ponti e paratie stagne, per evitare il passaggio d'acqua e simili da un locale all'altro lungo i cavi stessi. Per questo motivo si devono usare passaponti e passaparatie stagne. Questi ultimi sono costituiti da speciali mattoncini in gomma ignifuga, prelubrificata (per facilitarne il montaggio) e presagomata in funzione della dimensione del cavo. Una volta inseriti i cavi vengono strette le due viti poste in alto (Figura 5.3) che provvedono tramite la piastra in metallo a pressare tutti i mattoncini e a rendere pertanto stagno tutto il blocco.



**Figura 5.3:** Passaponti e passaparatie stagni.

L'installazione dei cavi deve tener conto anche della sicurezza contro gli incendi a bordo, quindi i cavi stessi devono essere disposti in maniera opportuna per avere il minimo dei danni possibili. Le norme impongono che:

- siano separati, in ogni zona di fuoco, i cavi principali e quelli di emergenza sia verticalmente che orizzontalmente, in modo da evitare che il fuoco interferisca con i servizi essenziali e quindi che lo sviluppo di un incendio in un punto non danneggi contemporaneamente l'alimentazione principale e quella di emergenza;
- i cavi che alimentano i servizi essenziali o di emergenza, luci, comunicazioni interne, devono passare lontano da lavanderie, sala macchine, cambusa, e altri locali con alto rischio di incendio. Dove possibile devono essere disposti in maniera tale da precludere ogni possibile danno derivante da riscaldamento delle paratie dovuto ad incendi nei locali adiacenti;
- quando è essenziale che un circuito funzioni per un certo tempo anche durante un incendio e non è possibile portare il cavo lontano da zone di alto rischio, occorre proteggerlo contro l'esposizione diretta al fuoco;
- la penetrazione dei cavi nei vari locali deve essere tale da mantenere l'integrità al fuoco dei vari componenti;
- i gruppi di cavi devono essere installati in modo tale da non modificare le proprietà ritardanti la fiamma del singolo cavo. Non si può, infatti, assumere che se un singolo cavo sia a norma un gruppo di cavi si comporti allo stesso modo, questo perché la propagazione della fiamma in un gruppo di cavi dipende da numerosi parametri quali il volume del materiale combustibile, la configurazione geometrica, il volume d'aria che passa attraverso i cavi ecc...;
- in percorsi verticali chiusi o semichiusi occorre sistemare barriere ignifughe almeno a livello dei ponti ad una distanza massima di 6 m, ad ogni quadro principale e di emergenza, nei punti in cui i cavi entrano nella sala di controllo, ai pannelli di controllo per la propulsione. In percorsi orizzontali valgono le stesse regole tranne per il fatto che la massima distanza può crescere fino a 14 m.

#### **5.4 IMPIEGO DI CAVI ATOSSICI NELLE APPLICAZIONI NAVALI.**

Da un po' d'anni a questa parte lo studio dei cavi si è orientato, oltre che sulla ricerca di materiali che fossero autoestinguenti, anche sulla ricerca di particolari mescole atossiche. In

caso d'incendio a bordo, infatti, non solo è necessario l'autoestinzione delle fiamme, ma deve essere garantita (o sarebbe meglio anche garantire) l'assoluta atossicità dei fumi derivanti dalla combustione di guaine, isolanti e riempitivi vari.

Nello sviluppo di tali cavi, è stata posta particolare attenzione alle caratteristiche di comportamento al fuoco, come le proprietà di autoestinzione e di non propagazione della fiamma, la quantità e qualità dei fumi emessi in caso d'incendio con riferimento alla loro tossicità e proprietà corrosive. Era necessario combinare in un unico cavo, tutta una serie di caratteristiche per alcuni aspetti tra loro contrastanti. Occorrevano in pratica cavi con caratteristiche di non propagazione dell'incendio allo scopo di circoscrivere il più possibile le fiamme e limitare al massimo le sovratemperature, con ridotta emissione di fumi allo scopo di consentire alle persone in caso d'incendio una facile identificazione delle protezioni e delle vie d'uscita ed infine con limitate emissioni di gas tossici e corrosivi sempre per motivi di sicurezza alle persone.

Il modo più semplice per ottenere buone qualità autoestinguenti, consiste nell'utilizzare mescole nelle quali siano presenti additivi alogenati (normalmente a base di cloro o bromo). Questo tipo di scelta produttiva è però in contrasto con le prescrizioni relative alla tossicità e corrosività dei fumi, infatti, i prodotti alogenati esplicano le loro funzioni di ritardanti la fiamma sviluppando una gran quantità di gas e fumi che limitano l'apporto d'ossigeno al materiale in combustione. Tali emissioni sono però ricche di composti alogenidrici ed in particolare nel caso del PVC, di acido cloridrico, che presenta lo svantaggio di essere tossico e corrosivo. Il problema richiede quindi un approccio globale in cui vengono presi in considerazione tutti gli aspetti del comportamento al fuoco e non solamente le proprietà di non propagazione della fiamma.

Una delle principali difficoltà nella progettazione consiste nell'impossibilità di basarsi solamente sulle proprietà dei materiali per prevedere il comportamento del cavo finito. È necessario quindi in una prima fase effettuare una selezione delle mescole e valutare l'effetto dei vari componenti al fine di minimizzare le rilevanti spese relative alle prove sul cavo finito. Gli elementi che ci consentono di effettuare tale selezione sono essenzialmente l'indice d'ossigeno e l'indice di temperatura. Il primo fornisce la massima concentrazione d'ossigeno presente nel campione, il secondo ci dice fino a che temperatura lo stesso campione è in grado superare la prova e quindi di essere a norma. Elevati valori di questi due parametri consentono di ottenere migliori proprietà d'autoestinguenza e di non propagazione della

fiamma. Per quanto riguarda invece i componenti organici della miscela escludendo il PVC per i motivi prima enunciati, le scelte più frequenti per i cavi atossici riguardano l'EVA e l'EPDM da soli o opportunamente miscelati.

Il primo è un polimero che consente di avere elevati indici di temperatura vantaggiosi sia per la vita termica, sia per le proprietà di non propagazione dell'incendio, anche se trattandosi di un dielettrico polare presenta perdite e costante dielettrica particolarmente elevate tale da renderlo utilizzabile solo in bassa tensione.

Il secondo fa parte della famiglia degli EPR (Ethylene Propylene Rubber) che rappresenta il materiale più frequentemente usato. È utilizzato nei cavi di media tensione poiché presenta buone caratteristiche dielettriche, anche se in realtà tende a peggiorare le proprietà antifiamma e di vita termica della miscela.

Un confronto tra le caratteristiche dei cavi atossici e quelle dei cavi in polivinilcloruro è riassunto nella Tabella 5.3, in cui si riportano i risultati ottenuti dalle prove su cavi dei due tipi valutando rispettivamente il comportamento dell'isolante propriamente detto, della guaina e dell'eventuale riempitivo.

<b>PROPRIETA'</b>	<b>MESCOLE ATOSSICHE</b>	<b>MESCOLE IN PVC</b>
Gas alogenidrici (isolante)	Assenti	> 10 %
Gas alogenidrici (riempitivo)	Assenti	> 0.5 %
Gas alogenidrici (guaina)	Assenti	> 5 %
Indice di tossicità (isolante)	< 2	> 10
Indice di tossicità (riempitivo)	< 2	> 2
Indice di tossicità (guaina)	< 2	> 10
Corrosività (isolante)	PH > 5.5	PH < 4
Corrosività (riempitivo)	PH > 5.5	PH > 5
Corrosività (guaina)	PH > 5.5	PH > 4

**Tabella 5.3:** Confronto tra le caratteristiche relative ai fumi di mescole per cavi atossici e mescole a base di PVC.

I risultati mostrano nelle tre situazioni, sia pure in maniera diversa, una presenza costante di gas alogenidrici nei fumi prodotti da mescole a base di PVC, gas che sono totalmente assenti nei cavi atossici.

Tale diversità di comportamento si ripete per la tossicità e per il livello di corrosività.

Per quanto riguarda invece la caratteristica di non propagazione dell'incendio, i due cavi si comportano all'incirca nello stesso modo.

A conclusione di queste brevi note sui cavi atossici, si può affermare che è possibile produrre cavi con caratteristiche di non propagazione dell'incendio non inferiori a quelle dei cavi con additivi alogenati, ma senza le ricadute negative dovute all'aggressività ed alla tossicità dei fumi prodotti.

La caratterizzazione di vita termica del cavo, pur con i limiti dettati dai ridotti tempi di invecchiamento dei cavi atossici, consente di effettuare delle previsioni di esercizio con possibilità di manutenzione predittiva per parti di impianto particolarmente importanti.

Tutto quanto detto finora dimostra in modo inequivocabile che i vantaggi dei cavi atossici, già rilevati in ambito terrestre, diventano fondamentale negli impianti navali, dove anche un modesto aumento di costo diventa irrilevante a fronte dell'aumento dei livelli di affidabilità e sicurezza che ne conseguono.

## **6. CONVERTITORI STATICI PER AZIONAMENTI ELETTRICI DI PROPULSIONE NAVALE.**

Gli enormi sviluppi dell'elettronica di potenza che si sono verificati negli ultimi anni, sono alla base della notevole espansione della propulsione elettrica a bordo dei più svariati tipi di mezzi navali.

I convertitori statici, che costituiscono la parte principale degli azionamenti elettrici, sono basati sull'utilizzo delle valvole elettroniche, che consentono la conduzione unidirezionale della corrente e sono connesse tra loro con svariate configurazioni circuitali.

Esse possono essere:

- Non comandabili (DIODI);
- Comandabili solo in chiusura, dette anche valvole a commutazione naturale (TIRISTRORI);
- Comandabili sia in apertura, sia in chiusura, dette anche valvole a commutazione forzata (GTO, BJT, IGBT, ecc.).

Tali convertitori hanno raggiunto attualmente dei rendimenti molto elevati, ma dato che le potenze che essi sono in grado di governare sono ingentissime, le perdite pur essendo piccole in percentuale sono molto rilevanti in senso assoluto. Quindi bisogna prevedere adeguati sistemi di raffreddamento, per smaltire le notevoli quantità di calore dovute alle perdite nei convertitori.

In generale i convertitori di taglia bassa e media sono raffreddati ad aria o ad aria forzata, mentre quelli di grossa taglia (da 2000 kVA fino a 4500 kVA di potenza governata), vengono di solito raffreddati con acqua deionizzata in circuito chiuso.

L'acqua viene posta direttamente a contatto con le valvole per ottenere un migliore raffreddamento, quindi per evitare che in conseguenza di tale contatto diretto con parti in tensione si verificino dei corti circuiti bisogna rendere l'acqua non conduttrice. Ciò si ottiene deionizzando l'acqua, cioè facendola passare, quando ancora contiene ioni disciolti, attraverso un filtro ionico costituito da una resina a scambio ionico, che esercita l'azione a cui è preposta in virtù della sua struttura molecolare.

## **7    SISTEMI DI PROTEZIONE.**

Gli impianti di bordo differiscono da quelli di terra per le condizioni particolari in cui sono chiamati a funzionare. Sulle navi l'importanza di alcuni servizi è vitale, perciò le protezioni devono essere in grado di eliminare il guasto nel più breve tempo possibile.

Tra i servizi vitali si devono considerare quelli necessari per navigare, governare, manovrare e tutti quei servizi connessi con la sicurezza delle persone.

La continuità di servizio è connessa con la scelta degli schemi di distribuzione, con le protezioni delle varie parti dell'impianto e con la costruzione e la sistemazione a bordo di motori primi, generatori, trasformatori, motori, quadri, cavi con particolare riferimento alle condizioni ambientali come urti, vibrazioni ,ambiente umido, caldo e salino.

### **7.1   GENERALITÀ.**

Le protezioni contro corto circuiti e sovraccarichi dell'impianto rivestono grande importanza per la conservazione dei conduttori e delle apparecchiature ad essi collegati, ma ancora di più per la limitazione del pericolo di incendio che può manifestarsi a seguito dei fenomeni termici connessi col passaggio di correnti di valore molto superiore a quelle sopportabili dall'impianto.

Un sistema di protezione per essere pienamente efficiente deve rispondere ai seguenti requisiti :

- rapidità di eliminazione del guasto col minor disturbo possibile del servizio;
- intervento selettivo per ridurre al minimo la parte del sistema che viene esclusa dalla alimentazione;
- semplicità di costruzione degli apparecchi;
- semplicità di manutenzione.

Le caratteristiche d'intervento degli apparecchi di protezione devono essere adeguate alle possibilità di sovraccarico dei vari elementi posti in serie al sistema. Oltre a rispondere ai vari requisiti elettrici comuni agli impianti terrestri, gli apparecchi di protezione devono essere in grado di superare le prove di resistenza agli urti e alla vibrazioni, di comportamento in ambiente caldo, umido e salino.

## **7.2 INTERRUTTORI**

Per la protezione contro le sovracorrenti s'impiegano normalmente interruttori, interruttori combinati con fusibili o soli fusibili; si deve però tenere presente che l'uso degli interruttori è consigliato in quanto evita la sostituzione delle parti fuse.

Nei sistemi in media tensione degli impianti navali vengono solitamente utilizzati interruttori ad esafluoruro di zolfo, più efficaci, compatti e meno bisognosi di manutenzione rispetto a quelli a bagno d'olio o ad aria precedentemente usati.

Per la bassa tensione si utilizzano invece interruttori in aria con largo impiego dei limitatori, con i quali si sono potute fronteggiare le elevate correnti di corto circuito. Questi interruttori sono caratterizzati da:

- tempi totali d'interruzione molto ridotti (qualche ms);
- valori bassi dell'integrale di joule;
- poteri di interruzione assai elevati.

## **7.3 PROTEZIONE DELLE LINEE PARTENTI.**

Per la scelta più appropriata dell'apparecchiatura dei circuiti partenti, oltre alle correnti di corto circuito, si deve conoscere:

- la corrente di esercizio;
- la corrente di breve durata, dovuta ai transitori di manovra.

La corrente di esercizio si determina facendo il bilancio elettrico, ossia tenendo conto del massimo numero di utenti che possono funzionare contemporaneamente nel caso di servizio più gravoso. Con lo stesso criterio si può stabilire la massima corrente durante gli avviamenti e la sovracorrente di breve durata. Su tale valore deve essere effettuata la taratura dei relè, stabilita in modo da evitare scatti intempestivi ed assicurare nello stesso tempo le protezioni degli elementi in serie sul circuito, compresi i cavi.

Le tarature dei relè di massima corrente sono molto elevate, circa 5 - 10 volte la corrente nominale, mentre per i relè di sovraccarico questo valore scende fino a 1.2 - 1.5. Per quest'ultimo tipo di protezione si preferisce usare relè a ritardo meccanico sui circuiti di elevata portata, i quali hanno il vantaggio di essere indipendenti dalla temperatura ambiente e di non richiedere un tempo di attesa per la rimessa in esercizio dopo l'intervento. Sulla nave, infatti, il forte raggruppamento dei cavi, il limitato spazio, la ventilazione ridotta e l'elevata temperatura dei diversi ambienti determinano condizioni d'impiego particolarmente sfavorevoli e soprattutto temperature ambiente elevate.

Sugli interruttori di piccola e media portata è preferito il relè termico a bimetallo, il cui intervento si verifica dopo 1 - 3 minuti con correnti di 1.5 volte quella nominale massima, a regime termico e in ambiente a 45°C. Col relè a bimetallo si ha il vantaggio del funzionamento a tempo inverso, vale a dire tanto più elevata è la corrente, tanto minore è il ritardo. Però per ripristinare il servizio dopo lo scatto occorre lasciar passare il tempo necessario al raffreddamento del bimetallo.

Quando non è possibile ottenere una caratteristica tempo - corrente adeguata alle necessità di avviamento, è consentito cortocircuitare il dispositivo di sovraccarico durante il tempo strettamente necessario, purché però i dispositivi di protezione contro i corto circuiti rimangano sempre operanti.

È bene ricordare che, indipendentemente dalla marcia in monofase, non è opportuno realizzare con fusibili la protezione contro i sovraccarichi, poiché essi fondono normalmente con sovraccarichi del 60% e in pratica di valore troppo elevato, che può essere ancora più alto in quei casi in cui i fusibili devono essere sovradimensionati per evitare la fusione intempestiva a causa delle forti correnti di spunto provocate dai motori.

#### **7.4 LA SELETTIVITÀ.**

Le esigenze di una sempre maggiore continuità di servizio, e quindi della necessità di creare il minimo disturbo alla rete a seguito di un corto circuito, sono alla base degli studi sulla selettività delle protezioni.

Per definizione si dice che un impianto è dotato di protezioni selettive se, in caso di guasto, le caratteristiche costruttive e d'intervento dei vari apparecchi di protezione sono tali da causare soltanto l'intervento dell'apparecchio più vicino al guasto, con la conseguenza di porre fuori servizio un settore limitato dell'impianto.

La scelta degli interruttori per effettuare tale tipo di protezione viene fatta in base a:

- *corrente nominale*;
- *potere di interruzione*, che viene espresso dalla più alta corrente presunta che l'interruttore è in grado di interrompere sotto una data tensione e sotto determinate condizioni del circuito e d'uso;
- *potere di chiusura* sotto corto circuito rappresentato dalla più alta corrente di picco presunta che l'interruttore è in grado di stabilire sotto una data tensione e sotto una determinata condizione del circuito e d'uso.

Il loro intervento si realizza in un tempo totale costituito dalla somma dei seguenti tempi elementari:

- T1: *tempo d'intervento* del relè ovvero ritardo che intercorre tra l'istante in cui si manifesta il guasto e quello in cui il relè è in condizioni di inviare il comando d'intervento all'interruttore;
- T2: *tempo di ritardo* applicato al relè;
- T3: *tempo proprio d'intervento meccanico* dell'interruttore (legato a caratteristiche costruttive e all'inerzia delle masse);
- T4: *tempo d'arco* tra i contatti.

Pertanto dall'istante in cui la corrente si manifesta a quello in cui è estinta intercorre il tempo  $T=T1+T2+T3+T4$ . Tale tempo non può in ogni modo essere inferiore a  $T1+T3+T4$ , variando il tempo T2. È proprio quest'ultimo elemento che consente di dosare gli interventi di più interruttori tutti sistemati in serie su una linea interessata da guasto, in modo tale che l'interruttore più a valle intervenga sempre prima dell'interruttore a monte. Il tempo di ritardo all'intervento può essere essenzialmente di due tipi: dipendente o indipendente.

## 7.5 IL COORDINAMENTO.

Il coordinamento delle protezioni può essere realizzato in dipendenza dalle caratteristiche dell'impianto e delle relative correnti di guasto secondo due criteri fondamentali:

- selettività in grandezza;
- selettività in tempo.

La selettività in grandezza è adottata quando le impedenze in gioco nell'impianto sono sufficientemente elevate per permettere una differenziazione netta dei valori di corrente di guasto nei diversi gradini dell'impianto stesso.

Spesso però questa situazione non si verifica, pertanto se si vuole utilizzare questo sistema per il coordinamento bisogna intervenire aumentando l'impedenza della linea mediante l'inserimento di reattanze in serie che possono essere installate direttamente sulle linee partenti o sulle sbarre. L'impiego di reattori modifica la tensione di rete a valle provocando una caduta di tensione che aumenta al crescere della corrente e raggiunge il massimo durante il corto circuito. Si deve perciò verificare sempre che tale caduta reattiva non superi il limite ammissibile sia in esercizio normale sia nei periodi transitori come nel caso di avviamento dei motori.

La selettività in tempo è invece il sistema più completo che consente una protezione selettiva totale sull'intero impianto anche nel caso che le impedenze di collegamento e dei diversi componenti non siano tali da differenziare a sufficienza le correnti di corto.

Gli apparecchi per la protezione possono essere interruttori automatici o fusibili. A questi si ricorre solamente per motivi economici nei casi in cui si preferisce sottodimensionare gli interruttori poiché i fusibili sono scelti non in base alla massima corrente teorica ma in base alla più probabile, che è minore della precedente.

I tempi d'intervento devono essere via crescenti dalla periferia verso il centro dell'impianto essendo la periferia la zona ove è più probabile che accada un guasto. In tal modo si è sicuri che gli interruttori sistemati nel centro dell'impianto scattino solamente quando il loro intervento è indispensabile.

Occorre notare che gli apparecchi sistemati all'estrema periferia condizionano con il loro tempo di intervento i tempi di tutti gli altri apparecchi, pertanto il loro intervento deve avvenire nel minor tempo possibile per non provocare eccessivi ritardi degli apparecchi a monte. Per analoghe ragioni è opportuno limitare a tre gli stadi di uno schema elettrico, corrispondenti ai gradini di protezione.

Bisogna tenere anche sotto controllo l'effetto termico delle correnti di guasto, durante il quale l'impianto è percorso dall'intera corrente di corto, che può raggiungere valori anche di dieci volte la corrente nominale, è quindi rilevante e assolutamente non trascurabile l'effetto termico legato al quadrato della corrente.

Effetto dannoso analogo al precedente può verificarsi quando le sollecitazioni elettrodinamiche connesse con le correnti di corto si prolungano a causa di ritardi di intervento. Sbarre, connessioni e interruttori stessi possono essere enormemente danneggiati.

Negli impianti dove gli apparecchi prescelti non hanno un potere d'interruzione sufficiente si può ricorrere alla protezione in serie che è realizzata quando l'apparecchio posto a monte (detto di *back up*), dimensionato per la piena potenza di corto circuito che può manifestarsi nel punto di installazione, provvede a proteggere l'altro sottodimensionato situato a valle. Spesso questo tipo di protezione è realizzato sull'ultimo gradino dell'impianto tra fusibili e contattori, dato il basso potere d'interruzione di questi ultimi e l'elevato potere d'interruzione e la rapidità d'intervento dei fusibili. Per effettuare la protezione in serie devono essere rispettate le seguenti condizioni:

- l'apparato a monte deve essere in grado di stabilire, sopportare, interrompere almeno la massima corrente di corto circuito nel punto di installazione, mentre quello a valle può essere notevolmente sottodimensionato;
- non devono essere previsti in serie più di due apparecchi;
- gli apparecchi protettori sono normalmente interruttori o fusibili e quelli protetti interruttori o contattori;
- gli apparecchi a monte devono essere predisposti in modo che il loro intervento si verifichi per una corrente al massimo pari al 90% di quella effettiva, corrispondente al potere di interruzione dell'apparecchio, protetto il quale deve essere in grado di sopportare il passaggio della corrente per tutto il tempo di intervento dell'apparecchio protettore;
- per ragioni di sicurezza è bene che gli apparecchi protetti siano comandati a distanza sia in apertura, sia in chiusura.

## **8 COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA.**

### **8.1 GENERALITÀ.**

La compatibilità elettromagnetica (usualmente identificata con il suo acronimo dalla lingua inglese *EMC*), è definita come la capacità di una apparecchiatura elettronica o elettrica, di funzionare correttamente anche in presenza di determinate interferenze

elettromagnetiche presenti nell'ambiente in cui si trova ad operare (*immunità elettromagnetica*), rispettando a sua volta determinati limiti di emissione elettromagnetica.

Attualmente i problemi di EMC sono di grande importanza ed è prevedibile un loro incremento in futuro. Ciò è dovuto al fatto che nella quasi totalità dei campi della tecnica (e l'impiantistica navale non fa eccezione), si registra un incremento nell'utilizzo di apparecchiature elettriche ed elettroniche per le comunicazioni, per l'automazione e per la distribuzione della potenza.

Queste apparecchiature causano un aumento dell'inquinamento dello spettro elettromagnetico ed a loro volta sono molto sensibili a tale inquinamento. Infatti, il margine di immunità ai disturbi elettromagnetici va sempre più assottigliandosi a causa del continuo decremento delle dimensioni dei suddetti dispositivi (e quindi del decremento della soglia di energia massima tollerabile prima dell'insorgere di disturbi), e dell'aumento della complessità delle operazioni svolte soprattutto a livello di software.

L'interferenza è in generale definita come un segnale indesiderato e non intenzionale, sovrapposto al segnale voluto.

Questa definizione si può applicare anche quella categoria particolare costituita dalle interferenze elettromagnetiche, spesso identificate con l'acronimo *EMI (ElectroMagnetic Interference)*.

Le EMI si possono suddividere sostanzialmente in due categorie principali: le interferenze elettromagnetiche irradiate e quelle condotte.

Le *interferenze elettromagnetiche irradiate* sono dovute ad accoppiamenti capacitivi e induttivi, oltre che a campi elettromagnetici irradiati nell'ambiente. Esse si propagano in maniera più o meno intensa, in qualunque tipo di mezzo, senza bisogno di avere continuità elettrica. Sono dovute a sorgenti naturali (sulle quali non si può agire direttamente), ed a sorgenti artificiali, come ad esempio i trasformatori, i motori elettrici (a causa di scariche impulsive), le lampade fluorescenti, i radar e molte altre apparecchiature presenti a bordo di un mezzo navale.

Le *interferenze elettromagnetiche condotte*, sono dovute ad irregolarità delle forme d'onda delle grandezze di rete e si propagano attraverso i conduttori che provvedono all'alimentazione elettrica delle varie utenze. Esse sono causate principalmente da:

1. Presenza di componenti armoniche ed interarmoniche nella forma d'onda delle tensioni e delle correnti di rete.

2. Variazioni eccessive della tensione e della frequenza.
3. Dissimmetrie delle componenti trifasi della tensione generata.

Si focalizzerà l'attenzione sulle interferenze elettromagnetiche condotte, ed in particolare su quelle causate dalle armoniche e dalle interarmoniche (che rappresentano senz'altro la fonte maggiore di interferenze elettromagnetiche condotte).

La grandezza indice del grado di vulnerabilità di una apparecchiatura o di un sistema, alle EMI, prende il nome di suscettività elettromagnetica, spesso indicata con la sigla *EMS* (acronimo di *ElectroMagnetic Susceptibility*). Le interferenze elettromagnetiche sono generate attraverso l'emissione di energia elettromagnetica (*EME - ElectroMagnetic Emission*).

A loro volta le quantità EME ed EMS, possono essere suddivise in base al fatto che siano riferite alle rispettive grandezze condotte o irradiate, Figura 11.1.

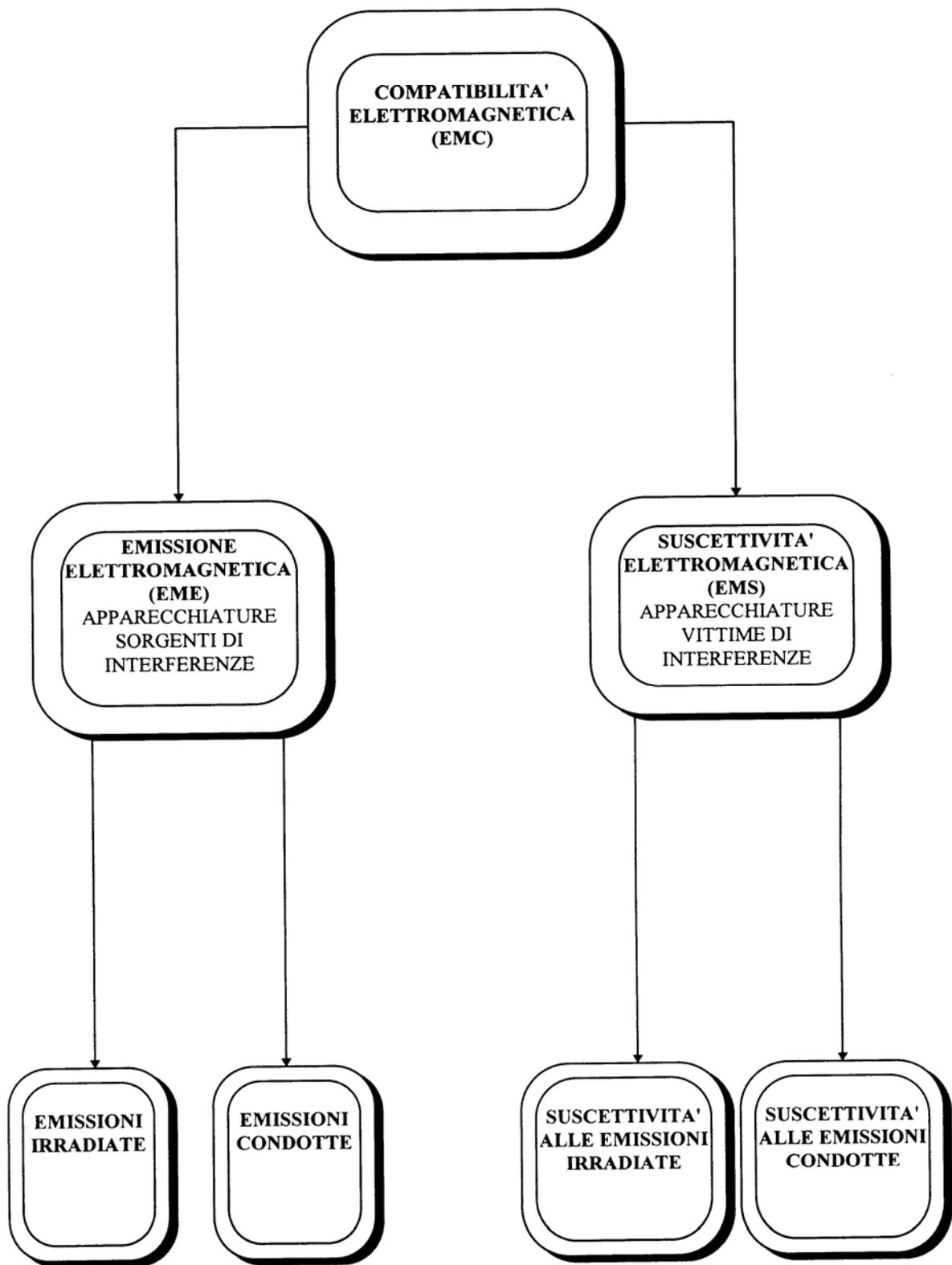


Figura 11.1: Schema a blocchi riassuntivo della compatibilità elettromagnetica.

Le suscettività delle apparecchiature o dei sistemi e i disturbi degli ambienti in cui sono inserite, possono essere trattate come grandezze aleatorie, permettendo così la trattazione a livello probabilistico della EMC.

## **8.2 STUDIO DELLA COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA NEL CONTESTO NAVALE.**

Il problema della EMC in ambito navale è reso più complesso dal fatto che le interazioni, lo scambio di informazioni e le retroazioni tra i fornitori di apparecchiature o sistemi potenzialmente generatrici o vittime di EMI ed il cantiere navale, sono tutt'altro che ottimali, se non addirittura del tutto assenti in certi casi.

Ciò è motivato dal fatto che le due entità operano in luoghi che quasi sempre sono distinti, e spesso sono anche molto distanti tra loro.

Si può comunque prevedere una soluzione almeno parziale a questo tipo di incomunicabilità, grazie all'uso più massiccio di tecniche di trasmissione di informazioni a distanza, consentite dai recenti progressi nel campo dell'informatica e della telematica.

Ulteriori complicazioni derivano dal fatto che le interferenze elettromagnetiche irradiate, possono trasformarsi facilmente in interferenze elettromagnetiche condotte. Inoltre per alcune apparecchiature, non vengono fornite nemmeno le curve probabilistiche di EME ed EMS.

Una soluzione completa delle problematiche di EMC in sede di progetto in ambito navale è praticamente impossibile, perché la geometria esatta della rete elettrica di bordo è nota solo nella fase finale della realizzazione. Ciò avviene perché durante la costruzione, ci sono continue ed inevitabili modifiche (ad esempio nel percorso di stesura dei cavi), causate dai contrasti tra le innumerevoli esigenze che si hanno soprattutto per grossi mezzi navali.

Le fasi principali in cui si suddivide il progetto e la realizzazione, sono le seguenti:

- Richieste ai fornitori delle curve di EMS ed EME per le varie apparecchiature.
- Valutazione qualitativa delle possibili situazioni di mancata EMC: in questa fase si prescinde dal posizionamento e dalla interconnessione elettrica delle apparecchiature fornite e dalla presenza delle numerose strutture metalliche di bordo.
- Analisi qualitativa delle situazioni di possibile rischio di malfunzionamenti, mediante l'utilizzo di software applicativi.
- Risoluzione da parte di specialisti di EMC dei problemi che hanno elevata probabilità di verificarsi in base ai risultati forniti dall'analisi qualitativa.

- Montaggio definitivo dell'impianto elettrico e verifica sperimentale con prove di EMC.
- Fornitura dei dati ricavati con prove sperimentali alla banca dati.

È importante rilevare che eventuali problemi di mancata EMC, rilevati sperimentalmente dopo che è stato ultimato il montaggio definitivo dell'impianto elettrico, non sono praticamente più risolvibili. Lo scopo di tali verifiche è quindi soltanto quello di arricchire la banca dati, per evitare di incorrere in errori simili nelle realizzazioni future.

## ***CONCLUSIONI.***

Si può notare che l'impianto elettrico navale, pur avendo caratteristiche in comune con quelli terrestri, presenta in realtà differenze rilevanti.

Ciò è dovuto ad una serie di vincoli e di esigenze particolari che si presentano su ogni tipo di unità navale. Quindi nella maggior parte dei casi è sconsigliabile utilizzare le tecniche progettuali e le apparecchiature concepite per applicazioni diverse, cercando poi di fare adattamenti all'uso navale, dato che in parecchi casi si rivelano inefficaci.

Esistono numerosi tipi di guasti comuni agli impianti elettrici terrestri, che però a bordo di mezzi navali possono provocare conseguenze ben più gravi, a causa del loro isolamento e delle condizioni avverse in cui possono trovare ad operare.

Esempi a tale riguardo sono rappresentati dalla mancanza di alimentazione ai motori elettrici di propulsione, che causano l'ingovernabilità della nave, e dai pericoli di incendi a bordo provocati dai corto circuiti.

Per arrivare ad ottenere i risultati voluti in termini di sicurezza a bordo, si deve quindi procedere alla duplicazione della linea d'alimentazione (per le utenze fondamentali), all'utilizzo di cavi atossici, all'utilizzo di complicati impianti antincendio, alla separazione del quadro principale, alla progettazione della centrale d'emergenza, ecc. Infatti, le condizioni di lavoro degli apparecchi a bordo, a causa delle vibrazioni, della temperatura ambiente più elevata, dell'umidità e salinità dell'aria sono proibitive e non basta assumere le stesse precauzioni assunte per gli impianti terrestri.

I cavi atossici ad esempio assumono un ruolo fondamentale in quanto la nave rimane un ambiente assolutamente isolato dal resto del mondo, quindi con possibilità di fuga più limitate, è quindi necessario avere, in caso di incendi provocati magari da corto circuiti, dei

cavi il cui isolamento e la cui guaina protettiva non sprigionano fumi tossici (come tuttora succede con il PVC).

Sempre a causa delle difficili condizioni di lavoro, si deve porre particolare attenzione al dimensionamento e alla taratura dei relè di protezione i quali, seppure identici a quelli utilizzati sugli impianti terrestri, devono essere declassati e tarati in modo tale da permettere l'avviamento dei grossi motori asincroni (tipicamente quelli di propulsione).

Un altro aspetto fondamentale dei sistemi navali è la protezione catodica, fondamentale per conservare lo scafo e le eliche in un ambiente che favorisce la corrosione e che porterebbe, se trascurata, alla distruzione di tutte le parti metalliche a contatto o in vicinanza dell'acqua. Mentre nelle imbarcazioni minori lo scafo viene protetto tramite verniciatura o protezioni passive (come anodi sacrificabili), sulle grandi navi da crociera, la protezione catodica diventa vero e proprio motivo di studio ingegneristico, essendo questo tipo di navi protette da protezioni attive.

L'utilizzo d'energia elettrica per le più svariate applicazioni ed in proporzioni sempre maggiori, va diffondendosi rapidamente a bordo dei vari tipi di mezzi navali.

Le motivazioni di tale fenomeno sono da imputarsi principalmente al grande sviluppo dell'elettronica di potenza ed alle conseguenti realizzazioni d'azionamenti elettrici, con tutti i vantaggi che ciò comporta soprattutto in termini d'affidabilità, di modularità, di possibilità di regolazione e d'erogazione di coppia, rispetto ai sistemi totalmente meccanici.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] . *Impianti elettrici*. E. Tironi, E. Campanari, G. Gola. Edizioni Cus.
- [2] *Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica*. N. Faletti, P. Chizzolini. Edizioni Patron (1985).
- [3] *Impianti elettrici vol. 1*. F. Illiceto. Edizioni Patron.
- [4] *Le correnti di corto circuito negli impianti elettrici*. V. Medved, R. Schinco. Edizioni Delfino Milano (1993).
- [5] *Norma IEC 61363: Short circuit current evaluation with special regard to installations in ships and offshore drilling units (revisione aggiornata al Gennaio 1996)*.

- [6] *RINA (Registro Italiano Navale): Regolamentazione per la costruzione e la classificazione delle navi. Sezione D: Regolamento degli impianti elettrici (1997).*
- [7] *La regolamentazione del RINA relativa agli impianti elettrici in alta tensione ed agli impianti di propulsione elettrica a bordo di navi.* A. Cogliolo, G. Rebaudengo. Atti della giornata di studio: Propulsione e sistemi elettrici in ambito navale (Genova 16 Giugno 1994).
- [8] *Produzione e distribuzione dell'energia elettrica a bordo di navi. Esami dei sistemi oggi impiegati.* G. Zanolla Atti della giornata di studio: Propulsione e sistemi elettrici in ambito navale (Genova 16 Giugno 1994).
- [9] *INTERNATIONAL STANDARD IEC 60092-352: Electrical installation in ships - Choice and installation of cables for low voltage power system.* (1997).
- [10] *Macchine elettriche.* Olivieri e Ravelli. Edizioni Cedam.
- [11] *Apparecchi elettrici.* F. Pardini. Edizioni Città studi.
- [12] *Macchine elettriche.* S. Crepez. Edizione Città studi. (1990).
- [13] *Il calcolo delle correnti di corto circuito negli impianti elettrici a bordo di navi.* F. Castelli Dezza, S. Massucco, A. Silvestri, D. Zaninelli. Riunione annuale AEI, Genova 22-25 Settembre 1991.
- [14] *Il calcolo delle correnti di corto circuito secondo recenti documenti IEC.* A. Silvestri. L'elettrotecnica, Aprile 1991.
- [15] *Contributo dei motori al corto circuito. Risultato delle prove eseguite in laboratorio ed a bordo di una nave militare.* D. Fabrizi. L'elettrotecnica, Maggio 1963.
- [16] *Contributo dei motori asincroni alle correnti di corto circuito.* F. Tosato, G. Zucchi. L'energia elettrica, n° 4 1987.
- [17] *L'interruzione di correnti di corto circuito con elevata componente asimmetrica. Problematiche e possibili soluzioni per un interruttore di macchina in media tensione.* G. Acquasaliente, R. Berto, E. Bordignon. Riunione annuale AEI, Genova 22-25 Settembre 1991.
- [18] *Sistemi di distribuzione a 660 V a bordo delle navi.* F. Cornago, A. Pagaccini, G. Rebaudengo. Riunione annuale AEI, Genova 22-25 Settembre 1991.
- [19] *Le protezioni degli impianti elettrici di bordo.* D. Fabrizi L'elettrotecnica, Novembre 1960.