
Valutazione della selettività avanzata a bordo nave

Fabio D'Agostino, Federico Silvestro *Università di Genova* - Antonio Fidigatti, Enrico Ragaini *ABB SpA*

Le moderne navi con propulsione elettrica stanno diventando sistemi sempre più complessi. In questo lavoro il contributo innovativo è l'indagine della dinamica a breve termine a seguito di un guasto su una semi-sbarra con un modello elettrico dettagliato dell'intera rete

Al giorno d'oggi la modellazione e l'analisi dei sistemi di alimentazione di bordo stanno acquistando sempre più rilevanza. È necessario, infatti, studiare il comportamento del sistema di alimentazione della nave a partire dalla fase di progettazione iniziale. Infatti, le navi sono sistemi elettrici isolati in cui la generazione, la distribuzione e i carichi coesistono in un ambiente ristretto e ostile.

Il vettore energia elettrica è diventato ancora più importante per le navi in cui tutte le esigenze energetiche, dalla propulsione all'hotel, sono fornite tramite l'energia elettrica nella logica della soluzione AES (*All Electric Ship*). Questa visione ha avuto particolare successo nelle applicazioni con vincoli di spazio, comfort e prestazioni come passeggeri e navi di tipo *offshore*, dove possono essere presenti un forte accoppiamento tra le diverse modalità operative. Inoltre, il sistema elettrico di bordo presenta alcune caratteristiche significative come la vicinanza tra carichi e generatori, la dimensione simile tra loro e la presenza sempre più significativa di convertitori [1]. Pertanto c'è la necessità di un maggiore funzionamento coordinato e intelligente tra generatori e carichi, al fine di

migliorare le prestazioni e l'efficienza energetica complessiva [2].

Il posizionamento dinamico (DP), ovvero la capacità della nave di rimanere in una posizione specifica, deve essere progettato per avere un certo livello di affidabilità e ridondanza [3-4]. Per una nave con classe DP3, una perdita di posizione non può verificarsi in caso di singolo guasto in qualsiasi componente o sistema attivo, compresa la perdita completa di un compartimento a causa di incendio o falla, così come definito dall'Organizzazione Marittima internazionale (IMO) [5]. Fondamentalmente, l'analisi DP esamina la modalità di guasto nella peggiore situazione possibile, quando i restanti motori di propulsione devono essere in grado di mantenere la posizione in base ai criteri di progettazione ambientale definiti per la classe. Devono essere organizzati servizi essenziali per i generatori e i loro principali motori, come l'acqua di raffreddamento e i sistemi di olio combustibile, in modo che, in caso di un singolo guasto nei sistemi o della perdita di un singolo compartimento, sia disponibile potenza sufficiente a fornire i carichi essenziali, i carichi operativi critici e di mantenere la posizione all'interno dell'involucro operativo post guasto specificato.

Secondo l'*International Marine Contractors Association* (IMCA), circa il 10-24% degli incidenti di DP nel periodo compreso tra il 2000 e il 2009, sono stati causati da guasti nella centrale elettrica [6]. L'introduzione della nuova classe DNV DP DYNPOS ER richiede che l'assetto in posizionamento dinamico sia realizzato con il congiuntore chiuso con la necessità di introdurre logiche di selettività superiori per isolare il guasto [7].

Pertanto, è necessario valutare il comportamento della rete di distribuzione nel suo complesso, tenendo conto anche delle protezioni che sempre più rappresentano sia un livello di protezione ma anche di controllo per permettere una corretta sequenza di regolazione.

Modello della nave, ambiente e propulsori in DP3

La nave di riferimento è la 833 Havyard Leirvik NB1111/P201115 ed è stata modellata nelle sue caratteristiche principali.

La funzione principale di una nave di rifornimento è di servire piattaforme e impianti eolici *offshore*. Le PSV (*Platform Supply Vessel*) trasportano forniture (ad es., materiali di lavoro, personali e disposizioni) dalla base operativa agli impianti offshore, avanti e indietro. È normale, per questo tipo di navi, essere in grado di svolgere altri compiti come il servizio antincendio (fi/fi), la lotta agli sversamenti di petrolio e la manutenzione degli

Tabella 1 - Classificazione DP

DP	Non ha ridondanza. La perdita di posizione può verificarsi in caso di singolo guasto.
DP2	Ha ridondanza in modo che nessun singolo malfunzionamento in un sistema attivo causerà un guasto del sistema. La perdita di posizione non deve verificarsi da un singolo difetto di un componente attivo o di un sistema come generatori, propulsore, centrale, valvole telecomandate, ecc. Ma può verificarsi dopo il guasto di un componente statico quali cavi, tubi, valvole manuali, ecc.
DP3	Deve anche resistere al fuoco o falla in qualsiasi compartimento senza mandare in guasto il sistema. La perdita di posizione non deve originarsi da un singolo guasto, tra cui una zona antincendio o un compartimento

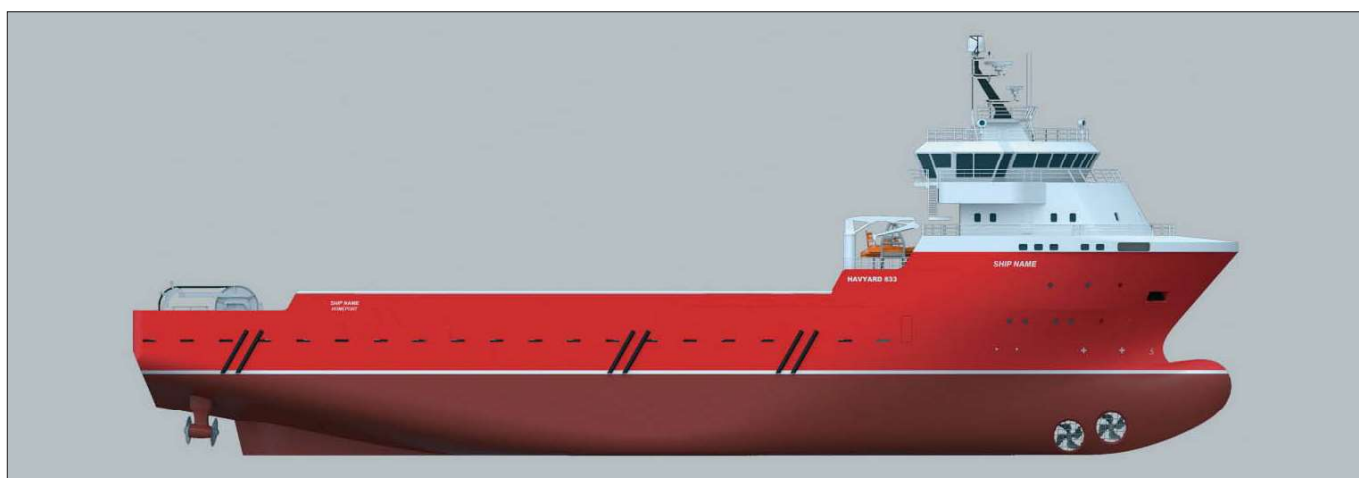


Figura 1 Havyard Leirvik vista laterale

impianti. Dato il loro ruolo polivalente, a differenza di qualsiasi altra nave, devono essere progettate per funzionare in molte condizioni operative e differenti scenari (ovvero condizioni meteorologiche e profili operativi diversi).

Per motivi operativi e di sicurezza, una PSV deve essere in grado di mantenere la sua posizione (cioè la capacità di mantenimento della posizione), controllare i movimenti (cioè la capacità di mantenimento del mare) e manovrare in condizioni di fuga per periodi prolungati. Tutte queste caratteristiche di controllo della nave sono incluse nel sistema di posizionamento dinamico (DP). Il sistema DP funziona combinando il sistema di controllo (cioè i sistemi di riferimento e il controllo della posizione dei sensori), i sistemi di propulsione (cioè i propulsori) e i sistemi elettrici (ovvero la centrale elettrica).

Negli ultimi anni, con l'introduzione da parte dell'IMO di nuove normative e linee guida per le navi con sistemi DP, questa non è più diventata un'opzione per le nuove costruzioni. Queste navi sono configurate come navi DP nella classe DP1, DP2 o DP3 a seconda della loro capacità e sicurezza nel mantenimento della posizione e nel controllo del movimento, come mostrato nella Tabella 1.

Al giorno d'oggi, DP1 è quasi uno standard per le nuove costruzioni, invece DP2 e DP3 sono riservati in caso di maggiore affidabilità e scenari operativi speciali.

Dovendo studiare il comportamento dei sistemi di alimentazione a bordo in caso di guasti quando la nave sta lavorando in scenari pesanti, è essenziale sviluppare un modello per il sistema di posizionamento dinamico.

Inoltre, le dinamiche ambientali sono più lente rispetto a quelle della nave (ad es., in genere le dinamiche elettriche sono nell'ordine dei 1 a 100 millisecondi, quelle della nave sono nell'ordine dei secondi fino a 10 minuti per il posizionamento dinamico e, d'altra parte, infine le dinamiche ambientali sono nell'ordine dei secondi fino a un mese). In questo contesto, non è necessario considerare le dinamiche delle navi e dell'ambiente per studiare il comportamento del sistema elettrico. Tuttavia, vi è la necessità di valutare, in conformità con la normativa [7], il peggior scenario ambientale possibile in cui il sistema di alimentazione dovrebbe rimanere in funzione in caso di guasto. Pertanto, nello studio è possibile rappresentare la dinamica della nave come equilibrio statico tra le

forze ambientali e le uscite del propulsore. In [8] è riportato il modello dettagliato per maggiori approfondimenti.

La centrale elettrica è composta da sette sbarre principali collegate da interruttori e trasformatori che consentono diverse configurazioni. I livelli di tensione sono 690 V per la generazione e propulsione, mentre le sbarre di carico sono a 440 V e 230 V con frequenza di rete 60 Hz.

Come si vede nella figura 2, quattro generatori diesel, con potenza elettrica nominale pari a 1.900 kVA ciascuno, compongono l'impianto di generazione.

Le macchine asincrone sotto convertitore compongono la propulsione principale. La potenza nominale è di 1.900 kW per i due motori di propulsione (MP1, MP2), 880 kW per i due propulsori a prua (BT1, BT2) e 800 kW per il propulsore retrattile (RT).

L'architettura del sistema di controllo implementata considera le funzionalità più significative del *Power Management System* (PMS) e *DPS* (*Dynamic Positioning System*).

Il PMS controlla il sistema di alimentazione al fine di massimizzare le prestazioni della nave, soddisfacendo al contempo i requisiti di prevenzione da blackout e di consumo di combustibile.

L'invio dei riferimenti di potenza attiva e reattiva, la limitazione del carico di propulsione e la prevenzione del blackout sono i compiti principali.

Il DPS controlla gli azionamenti del propulsore per controllare la posizione della nave.

A. Generazione elettrica

I generatori di potenza utilizzati principalmente nell'applicazione navale sono motori diesel. Per poter valutare il comportamento dinamico nei primi istanti sono state modellate le macchine sincrone, il motore primo e i regolatori. In particolare, il regolatore di tensione rappresenta uno dei problemi chiave per modellare correttamente il primo transitorio dopo un guasto. Le prestazioni del regolatore influenzano la forma e il valore di picco della corrente di guasto, che dipende dalla capacità di supportare la tensione transitoria nella sbarra di generazione. I generatori diesel appartengono alla classe dei motori che utilizzano pistoni per convertire la pressione in un movi-

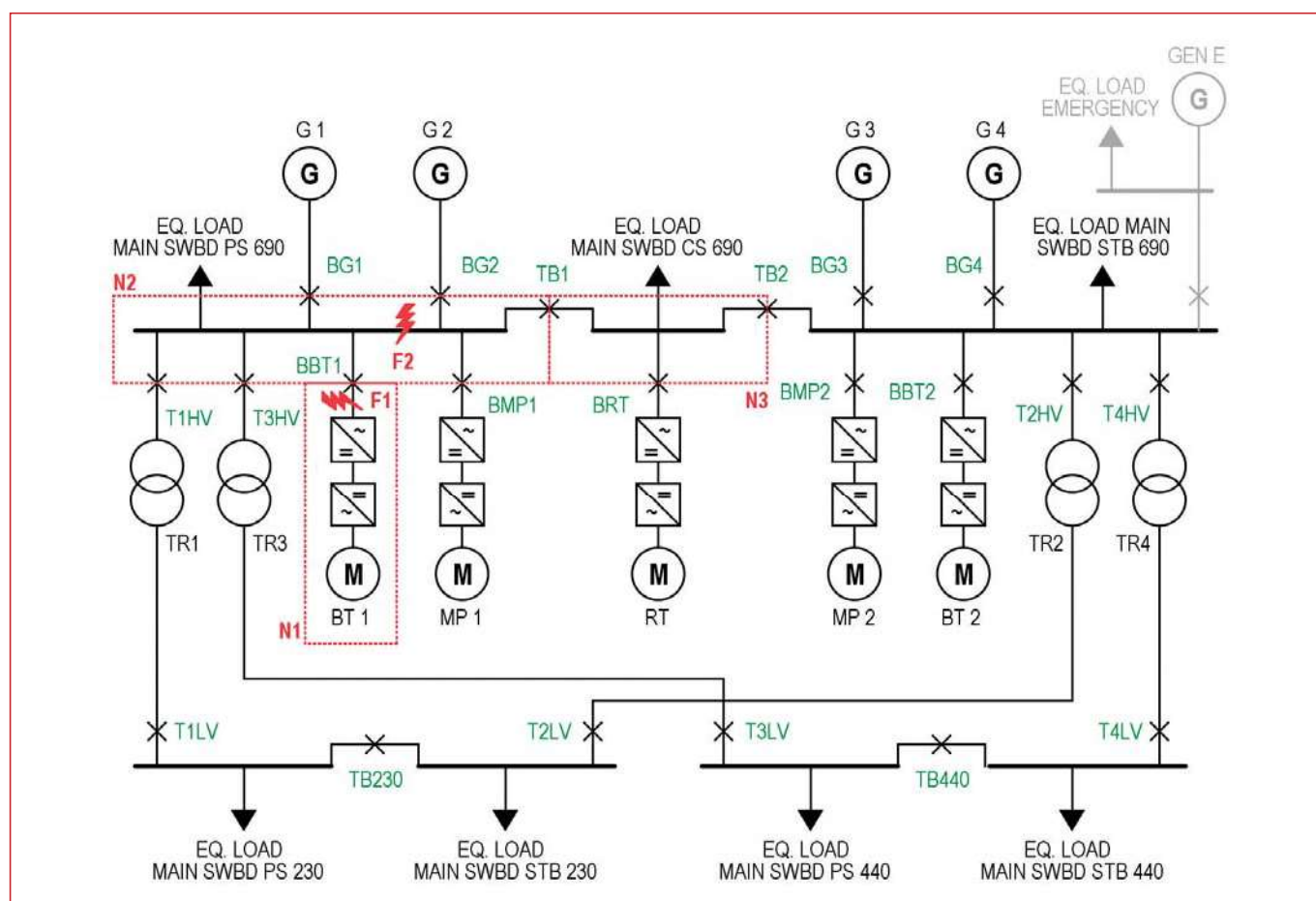


Figura 2 Sistema di alimentazione a bordo

mento rotante. La struttura generale del sistema di attuatori del carburante è solitamente rappresentata con un ritardo del primo ordine, che è caratterizzata da guadagno e tempo costante. Il flusso di combustibile viene convertito in coppia meccanica dal motore dopo un ritardo e una coppia costante. L'attuatore controlla la velocità del motore regolando l'assunzione del carburante. Esistono diversi tipi di attuatori, come meccanico-idraulico, meccanico diretto, elettroidraulico, elettronico e a microprocessore.

B. Propulsione principale e propulsori

I motori principale di propulsione sono stati implementati usando un modello elettromeccanico dei motori asincroni guidati da convertitore con un semplice controllo scalare (V/Hz) per controllare la velocità dei motori di propulsione. Poiché l'obiettivo del lavoro è di descrivere correttamente il transitorio nei primi secondi dopo una perturbazione, è stato adottato un modello fasoriale per il convertitore. A una frequenza fondamentale, il convertitore ideale senza perdita può essere modellato da una fonte di tensione alternata control-

lata dalla tensione continua conservando la potenza attiva tra lato alternata e continua.

Modello di sistema di protezione

I dispositivi di protezione sono stati modellati in base alle caratteristiche dei relè reali e degli interruttori installati a bordo. I modelli delle protezioni statici e dinamici completano la piattaforma di simulazione, consentendo gli studi sulle condizioni di guasto. L'analisi statica del cortocircuito consente la verifica del dimensionamento degli interruttori e del coordinamento del sistema di protezione. Il modello permette di calcolare i contributi al guasto che scrono in ogni dispositivo di protezione, valutando il tempo di intervento corrispondente. La taratura elettronica permette ormai attraverso i microprocessori installati a bordo delle protezioni di definire una curva molto puntuale in funzione della classica curva cronamperometrica [Sovraccarico (L), Selettivo (S), Istantaneo (I)] come descritto in figura 4.

Tuttavia, per alcune soluzioni impiantistiche, ormai non è più possibile realizzare una corretta selettività senza tenere conto della comunicazione

Figura 3 Sistema PMS e DPS

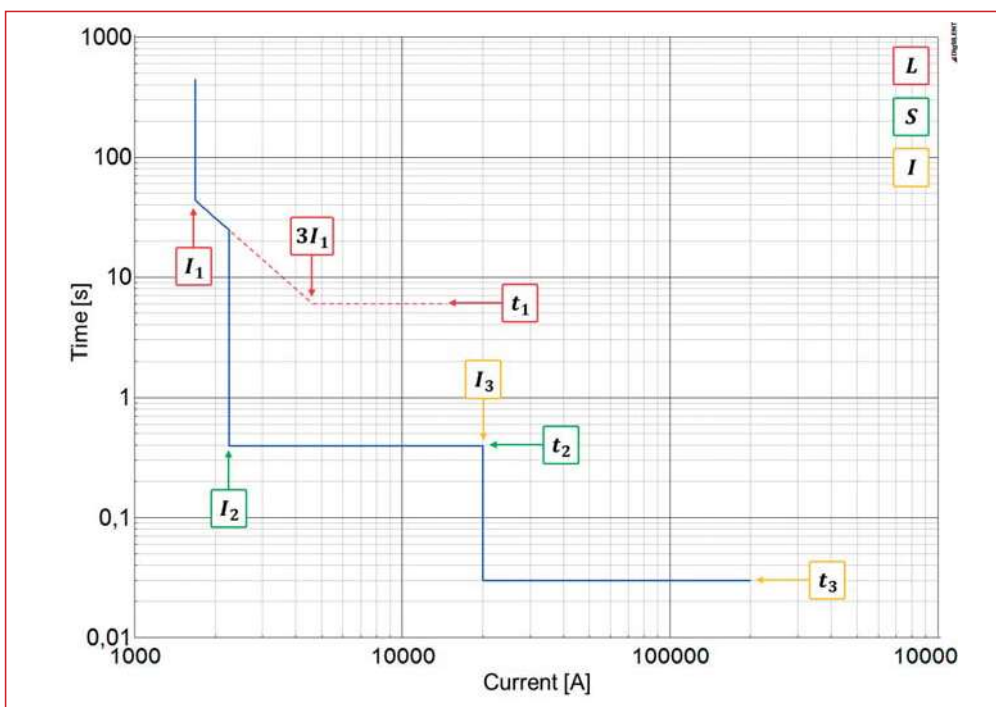
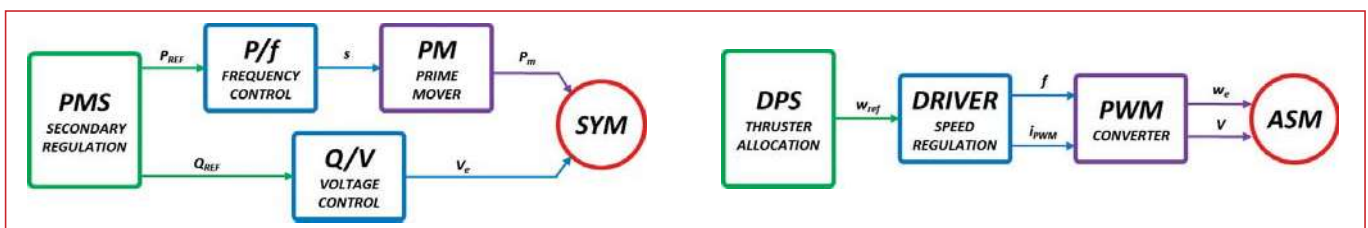


Figura 4 Caratteristica del relè di protezione

tra i dispositivi e introducendo una selettività logica. Per tale motivo è necessario fare uso di modelli dinamici dei dispositivi di protezione, che permettono di descrivere il comportamento anche della comunicazione tra dispositivi.

La figura 5 mostra il diagramma di flusso logico adottato per la modellazione del relè. Il segnale di comunicazione rappresenta lo stato di protezione, ovvero il comando per l'attuazione dell'interruttore.

In questo modo è possibile modellare sia i tempi di apertura, sia la comunicazione di consenso tra i dispositivi. Un'istanza del modello proposto è stata implementata per ogni protezione installata, in base alla reale configurazione dei dispositivi.

La filosofia di selettività nodale consiste nel coordinamento degli interruttori di confine, che identificano i nodi logici. Se i contributi alla corrente a corto circuito sembrano fluire dall'esterno all'interno del nodo, gli interruttori di confine devono aprirsi contemporaneamente. Se i contributi al

guasto sembrano transitare nel nodo, gli interruttori di limite devono attendere l'intervento del nodo di guasto.

Simulazioni

Le simulazioni mostrano le prestazioni del sistema di protezione con la selettività logica, in modo da valutare gli effetti del corto circuito in termini di velocità e deviazioni della potenza delle eliche, in condizioni operative di DP. Infatti, la verifica dei guasti dovrebbe essere basata su calcoli e simulazioni dinamiche del sistema di alimentazione in funzionamento normale e durante tutte le condizioni di guasto più gravose.

La figura 2 mostra lo schema del sistema di alimentazione a bordo, in cui F1 e F2 indicano la posizione dei guasti, corrispondenti ai due casi di studio proposti. N1, N2 e N3 indicano i tre nodi logici, coinvolti negli scenari proposti.

In condizioni operative normali (nessun guasto), il modulo PMS e DPS calcola i riferimenti di velocità

Figura 5 ▶

Grafico di flusso del modello di relè

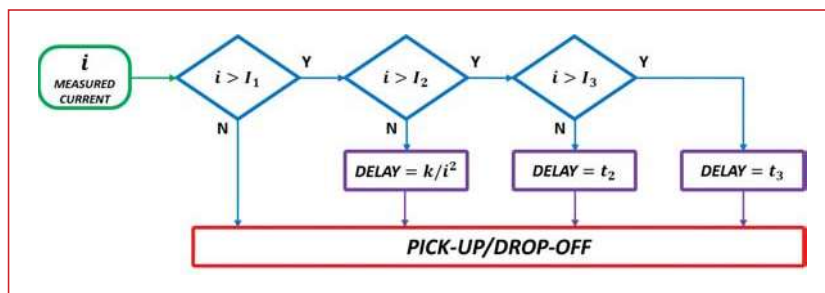
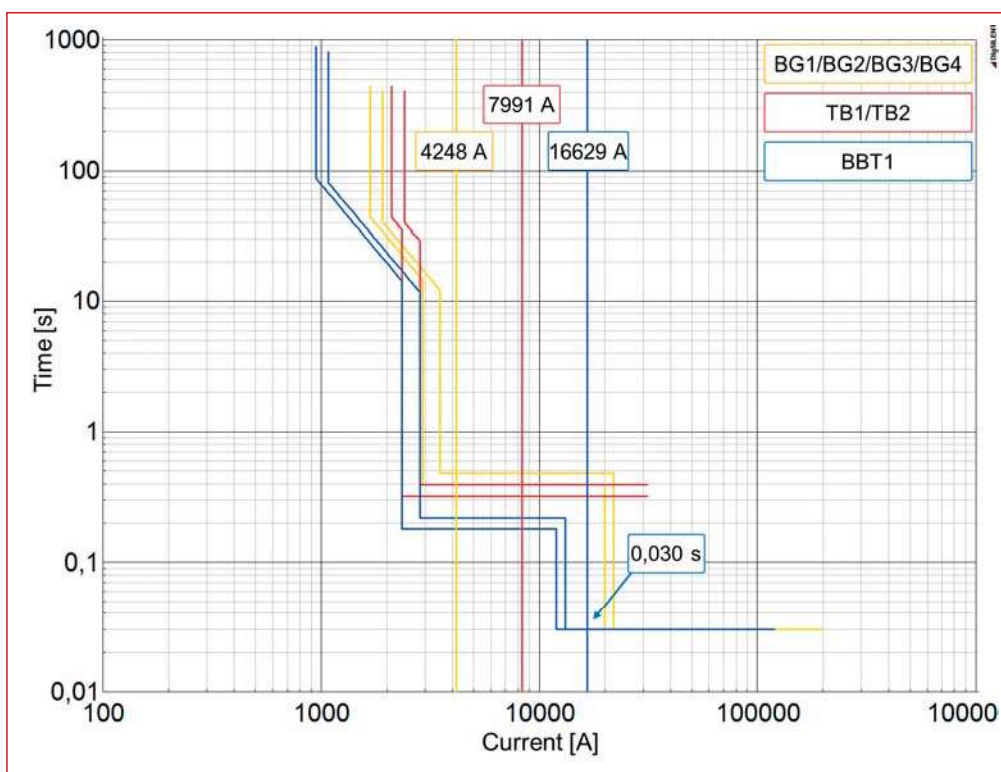


Figura 6 ▶

Grafico tempo - corrente - Guasto 1



(espressi in p.u.) per la propulsione principale e i propulsori ausiliari (Tabella 2).

Caso di studio 1 - Guasto 1

Un cortocircuito trifase con impedenza resistiva è stato simulato sulla sbarra di partenza della linea del Bow Thruster 1 (F1).

Il relè dell'interruttore BBT 1 presenta il più alto contributo di guasto e il tempo minimo di intervento, corrispondente alla curva di intervento istantaneo, come presentato in figura 6.

Pertanto, la selettività cronometrica sembra essere l'efficace nel coordinare l'intervento F1. Il cortocircuito determina la disconnessione del Bow Thruster 1 (BT 1).

Il DPS del propulsore calcola le condizioni di post-guasto, considerando l'indisponibilità di un motore asincrono.

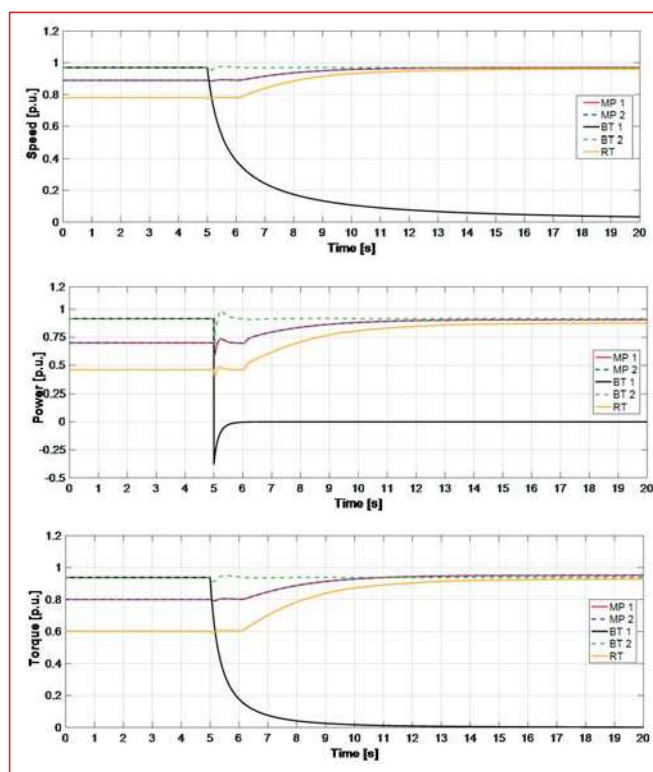
La Tabella 3 riporta i nuovi riferimenti di velocità generati per i dispositivi di spinta attivi.

Tabella 2 - Richieste di velocità

MP 1	BT 1	Rt	BT 2	MP 2
0,89 p.u.	0,97 p.u.	0,78 p.u.	0,97 p.u.	0,89 p.u.

Tabella 3 - Richieste di velocità

MP 1	BT 1	Rt	BT 2	MP 2
0,97 p.u.	-	0,96 p.u.	0,97 p.u.	0,97 p.u.



La figura 7 mostra la velocità e i transitori di potenza attiva per tutti i motori di propulsione. Il guasto si verifica dopo 5 secondi ed è possibile vedere gli effetti dinamici dell'intervento del cortocircuito e dell'interruttore.

La riserva disponibile sugli altri motori può coprire le nuove richieste di spinta e il resistore di frenatura del Bow Thruster 1 (BT 1) dissipa l'energia prodotta dalla grave decelerazione del motore.

La figura 7 mostra le rampe e le velocità del motore e la capacità del sistema di raggiungere il nuovo set di velocità-punto aggiornato da PMS dopo 1 secondo rispetto allo scenario DP 3.

In figura 8 sono riportate le velocità del generatore e tensioni in questa condizione di guasto.

Caso di studio 2 - Guasto 2

Come mostrato in [7], DYNPOS-AUTRO e DPS 3 sono basati su congiuntori chiusi e pertanto hanno bisogno di considerazioni speciali. Per il funzionamento con sistema interconnesso, il sistema di alimentazione deve essere progettato con interruttori che possano separarsi automaticamente in caso di guasti, garantendo un livello di integrità paragonabile a un sistema basato su congiuntore aperto.

Le simulazioni del sistema di protezione, qui riportate, si concentrano su un cortocircuito trifase situato sulla barra laterale della sbarra dell'impianto: il *Main Switch Board Port Side* (MAIN SWBD PS 690).

Figura 7

Velocità di propulsione, velocità di potenza e transitori di coppia - Guasto 1

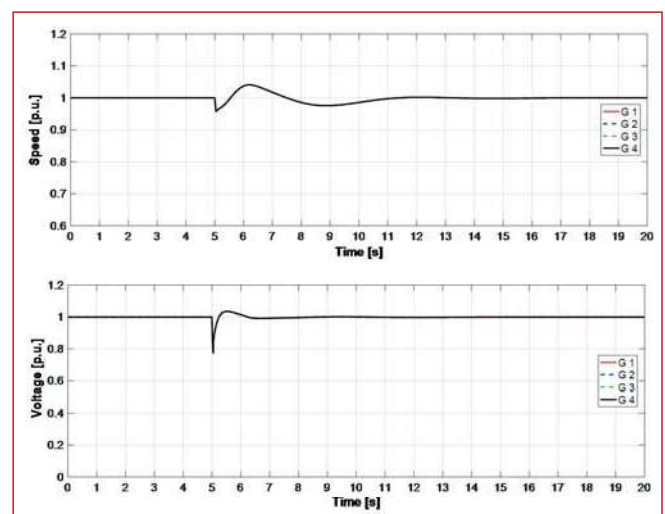


Figura 8 Velocità e comportamento della tensione per i generatori G 1 - G 4

Come evidente nel diagramma tempo-corrente (Figura 9) e i contributi al guasto rilevati dai relè Tb1 e TB2 sono gli stessi e la selettività cronometrica può fallire, causando la perdita dell'intera sezione principale (MAIN SWBD CS 690), e quindi il Thruster retrattile (RT).

Il coordinamento della protezione di nodo è quindi necessario, al fine di salvare una parte critica della centrale elettrica. Gli interruttori di confine del nodo N3 rilevano che il guasto si trova all'esterno del nodo e definiscono il cosiddetto segnale di blocco, inibendo l'intervento del TB2. Gli

Figura 9

Grafico temporale - corrente
- Guasto 2

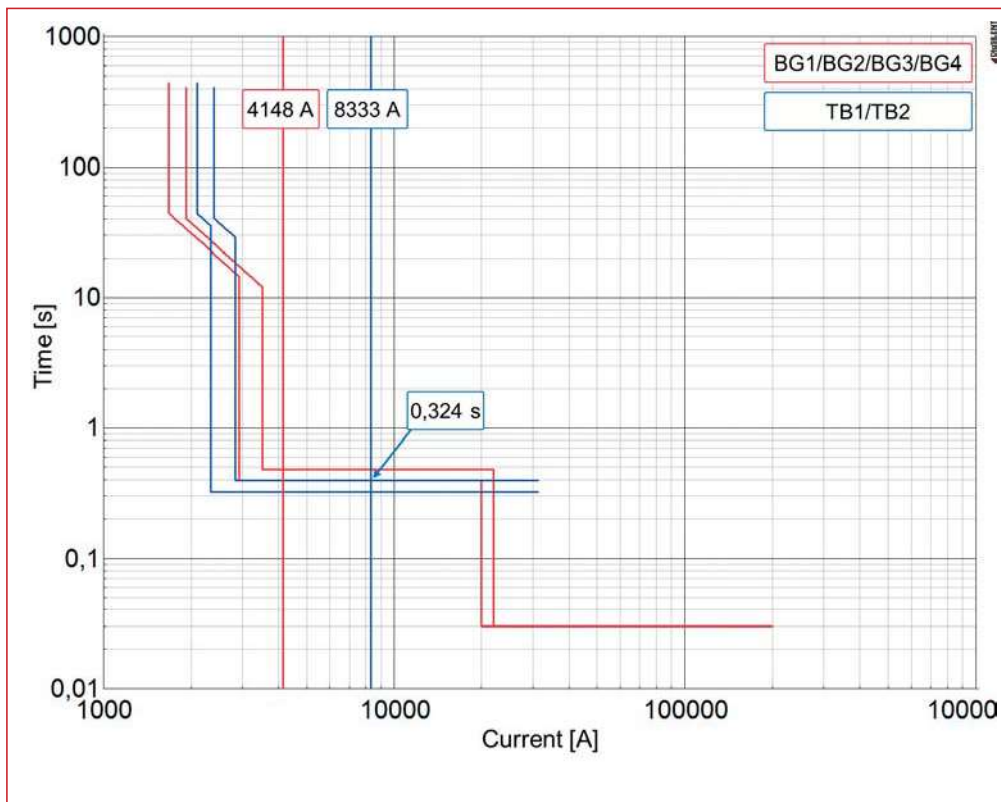


Figura 10

Velocità di propulsione e transistori di potenza - Guasto 2

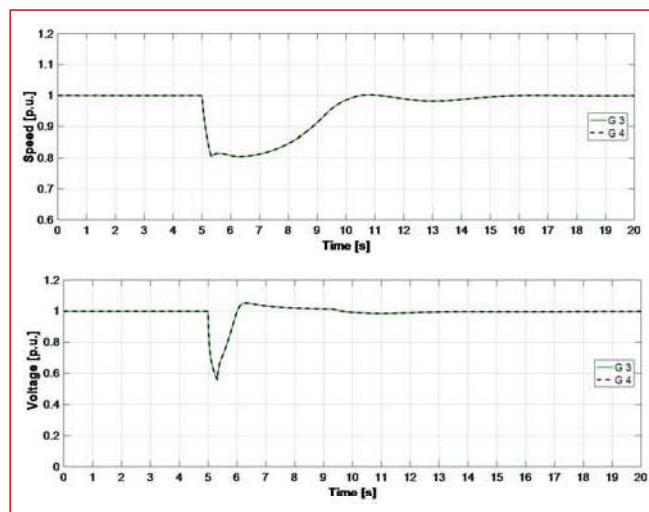
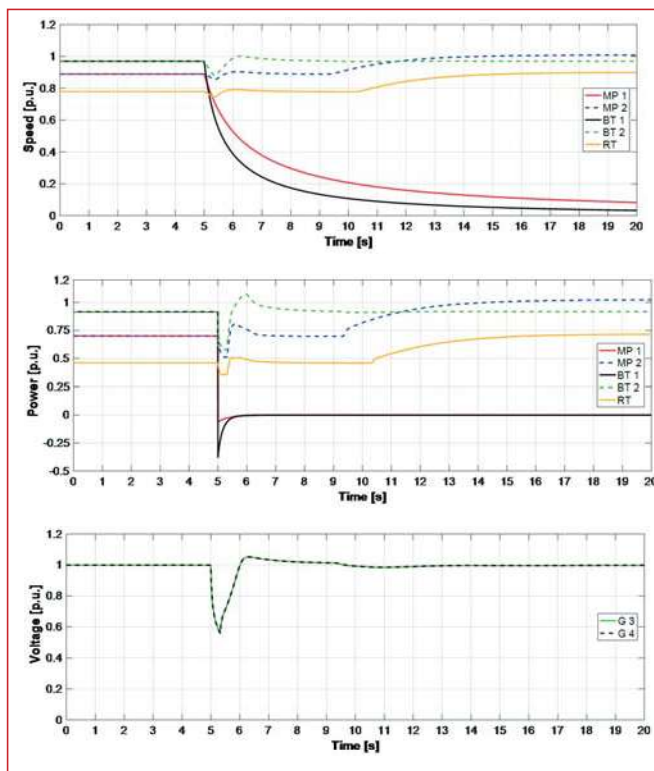


Figura 11 Frequenza del generatore e transitori di tensione

Tabella 4 - Richieste di velocità

MP 1	BT 1	Rt	BT 2	MP 2
-	-	1,15 p.u.	1,10 p.u.	1,11 p.u.
-	-	0,90 p.u.	0,97 p.u.	1,01 p.u.

interruttori di confine del nodo N1 rivelano la presenza del guasto all'interno del nodo e si aprono contemporaneamente isolando la sbarra interessata da guasti.

L'effetto del guasto è la disconnessione dei motori MP 1, BT 1 e dei generatori G 1, G 2. Il modulo di allocazione del propulsore calcola i nuovi riferimenti di velocità per i motori disponibili. A causa della mancanza di generazione, la riserva di potenza non è sufficiente per soddisfare i nuovi requisiti di velocità. La PMS limita l'assorbimento di potenza dei propulsori all'interno della capacità della generazione disponibile, perseguendo la prevenzione del blackout nell'implementazione di azioni di distacco del carico. La Tabella 4 riporta i riferimenti di velocità ideali e quelli ottenuti (evidenziati).

La figura 10 mostra la velocità di propulsione e i transitori di potenza dei dispositivi di propulsione. L'azione limitante di PMS è visibile anche nei primi effetti transitori.

La simulazione dinamica consente di valutare le sollecitazioni elettriche e meccaniche di tutte le macchine collegate alla rete.

Questo tipo di studi permette di apprezzare le conseguenze del guasto in termini di stabilità elettrica e sollecitazioni meccaniche. La figura 11 riporta la frequenza e la tensione transitoria del generatore G3 e G4.

Conclusioni

Il documento ha presentato un modello dinamico di una nave con propulsione diesel-elettrica, operante in posizionamento dinamico. DP è una tecnologia matura e l'attuale tendenza è dedicata a migliorare l'efficienza energetica, la durata

delle apparecchiature e a operare in modo più sicuro nelle condizioni più difficili. Pertanto, l'introduzione della nuova classe DNV DP DYNPOS ER permette di operare a sbarre congiunte, operando i gen-set diesel in parallelo con una migliore efficienza e prestazioni. Questo però richiede la corretta identificazione del guasto e la corretta gestione della protezione della zona attraverso l'impiego di protezioni avanzate che permettano uno scambio informativo ed efficace tra loro. Le simulazioni hanno dimostrato chiaramente la necessità di studiare la dinamica a breve termine dopo i guasti di sbarra con un modello elettrico dettagliato dell'intera rete, tenendo conto delle protezioni del sistema di alimentazione zonale e delle azioni di distacco del carico. Il sistema di alimentazione a bordo rappresenta sempre più un sistema complesso che richiede un modello integrato delle diverse funzionalità per catturare meglio la vera dinamica del sistema completo, tenendo anche conto degli aspetti di comunicazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Cupelli et al.: Power Flow Control and Network Stability in an All-Electric Ship, *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, n. 12, dicembre 2015, pp. 2355-2380.
- [2] A. P. Boveri, F. Silvestro, P. Gualeni: Decision Support System for Power Generation Management for an 110000 + GRT Cruise Ship, *Accepted by RINA International Journal of Maritime Engineering (IJME)*, 2015.
- [3] P. Johannessen, E. Mathiesen: *Advanced Failure Detection and Handling in Power Management System. Dynamic Positioning Conference*, ottobre 2009.
- [4] T.A. Johansen, T.I. Bo, E. Mathiesen, A. Veksler, A.J. Sorensen: Dynamic Positioning System as Dynamic Energy Storage on Diesel-Electric Ships, *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 29, n. 6, novembre 2014, pp. 3086-3091.
- [5] IMO: MSC/Circ.645 *Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning (DP) Systems*, 1994.
- [6] IMCA: *A Guide to DP Electrical Power Control Systems, International Marine Contractors Association (IMCA)*, www.imca-int.com/documents/publications.html
- [7] DNV: Dynamic Positioning System-Enhanced Reliability DYNPOS-ER, *Technical Report Rules for Classification of Ships, Part. 6, Ch. 7, Appendix B*, 2003.

