p-ISSN: 2502-1621
e-ISSN: 2656-1611

Jurnal 7 Samudra
Politeknik Pelayaran Surabaya
Vol. 11, No. 2, 14 November 2026
Hal: 96–102

Analisis Arus Hubung Singkat dan Pemilihan Pengaman Jaringan Distribusi Kapal Tanker 17.500 LDWT Berbasis Matriks Impedansi Bus (Zbus)

Alvin Arlian Irfanda[1], Edy Prasetyo Hidayat[1], Mat Syai'in[1]
Program Studi D4 Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya[1]
Email korespondensi: alvin.irfanda@gmail.com

ABSTRAK

Kapal dengan total daya sumber listrik 500 kVA atau lebih wajib dilengkapi perhitungan arus hubung singkat sebagai dasar menentukan kapasitas pemutus (breaking capacity) pengaman. Penelitian ini menganalisis arus hubung singkat tiga fasa dan menentukan pengaman pada jaringan distribusi kapal tanker 17.500 LDWT berpanjang 154 m yang dibangun PT PAL Indonesia (Persero), dengan tiga generator utama 813 kVA dan satu generator darurat 120 kVA pada 440 V, 60 Hz. Matriks impedansi bus (Zbus) disusun dari matriks admitansi bus dengan MATLAB, lalu dibandingkan dengan perhitungan IEC 61363 dan simulasi ETAP 19.0.1 pada empat kondisi beban.

Arus hubung singkat subtransien terbesar terjadi saat bongkar muat, yaitu 34,087 kA di MSB 440 V, 33,650 kA di generator utama, dan 33,219 kA di cargo pump, sedangkan pada kondisi darurat 2,182 kA. Perhitungan IEC 61363 berselisih 0,25–5,6% dari ETAP. Zbus dengan impedansi gangguan non-nol memberi 11,726 kA di bus generator dan 25,7 kA bila gangguan diasumsikan langsung (76% dari ETAP), sehingga Zbus berguna untuk memetakan tingkat gangguan antarbus tetapi memerlukan basis arus bersama untuk bus beban. Breaking capacity yang ditetapkan adalah 50 kA untuk cargo pump, 55 kA untuk generator utama, dan 20 kA untuk hydraulic pump kemudi dan generator darurat, dengan margin 1,5 sampai 15,2 kali arus gangguan.

Kata kunci: *Hubung Singkat; Matriks Impedansi Bus (Zbus); IEC 61363; Breaking Capacity; Kapal Tanker*

1. PENDAHULUAN

Sistem kelistrikan adalah faktor penting agar kapal dapat beroperasi, dan setiap sistem kelistrikan berisiko mengalami hubung singkat (*short circuit*). Hubung singkat terjadi ketika dua titik atau lebih dalam rangkaian terhubung dengan impedansi yang sangat rendah, sehingga arus naik berkali-kali lipat dari arus nominal. Gangguan ini diamankan oleh *fuse* dan *circuit breaker* (CB), dan kapasitas pemutus (*breaking c72apacity*) CB harus lebih besar daripada arus gangguan yang mungkin terjadi di titik pemasangannya (Goh et al., 2017).

Standar klasifikasi mewajibkan perhitungan ini. Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) mensyaratkan analisis hubung singkat untuk kapal dengan total daya sumber listrik 500 kVA atau lebih, mencakup gangguan pada generator, bus utama, serta bus *main switchboard* (MSB) dan *emergency switchboard* (ESB), dengan rujukan prosedur IEC 61363-1 (Panji et al., 2017; IEC, 2002).

Kapal tanker 17.500 LDWT yang diteliti memiliki panjang 154 m dan dibangun PT PAL Indonesia (Persero) dengan tiga generator utama 813 kVA dan satu generator darurat 120 kVA, sehingga dokumen perhitungan hubung singkat menjadi syarat pengurusan kelas.

Penelitian terdahulu umumnya memakai simulasi perangkat lunak untuk menghitung arus hubung singkat pada kapal AHTS (Sarwito et al., 2022), kapal trimaran (Kusuma et al., 2019), derek kontainer (Sarwito & Sastri, 2020), dan pembangkit darat (Sampeallo & Fischer, 2019). Metode matriks impedansi bus (Zbus), yang menyajikan impedansi ekuivalen tiap bus dalam satu matriks (Saadat, 1999), jarang dipakai bersama penentuan *breaking capacity* pada jaringan distribusi kapal. Pertanyaan yang belum terjawab adalah seberapa jauh Zbus dapat mendukung penentuan pengaman bila dibandingkan dengan IEC 61363 dan simulasi.

Penelitian ini bertujuan (1) menghitung arus hubung singkat tiga fasa pada tiap bus jaringan distribusi kapal tanker 17.500 LDWT pada empat kondisi beban, (2) menentukan *breaking capacity* pengaman, dan (3) membandingkan hasil Zbus dengan IEC 61363 dan ETAP. Kontribusinya adalah rekap arus gangguan empat kondisi beban, rekomendasi pengaman untuk 141 sirkuit, serta analisis sensitivitas Zbus terhadap impedansi gangguan dan basis arus.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hubung Singkat Tiga Fasa dan IEC 61363-1

IEC 61363-1 mengatur prosedur menghitung arus hubung singkat pada instalasi listrik arus bolak-balik tiga fasa di kapal dan unit lepas pantai, pada 50 atau 60 Hz, yang berisi generator, motor, transformator, kabel, dan konverter (IEC, 2002). Untuk gangguan tiga fasa simetris, hanya komponen urutan positif yang diperhitungkan, dan hasilnya adalah perkiraan arus prospektif maksimum. Besaran yang dihitung adalah arus awal simetris (I''_k, subtransien), arus transien (I'_k), arus tunak (I_k), komponen searah (I_{dc}), dan arus puncak (I_p).

2.2 Matriks Admitansi dan Impedansi Bus

Pada metode Zbus, setiap impedansi cabang z_{ij} diubah menjadi admitansi y_{ij} (Persamaan 1). Matriks admitansi bus (Ybus) memuat jumlah admitansi yang terhubung ke bus pada diagonal dan negatif admitansi antarbus di luar diagonal. Zbus diperoleh dengan membalik Ybus (Persamaan 2), dan elemen diagonalnya Z_{kk} adalah impedansi ekuivalen gangguan di bus k (Saadat, 1999).

Arus gangguan di bus k ditentukan oleh tegangan prafault $V_k(0)$, Z_{kk}, dan impedansi gangguan Z_f (Persamaan 3). Tegangan bus lain saat gangguan mengikuti Persamaan 4, dan arus pada cabang antara bus i dan j adalah $(V_i(F) - V_j(F)) / z_{ij}$. Hasil dalam per-unit (p.u.) dikonversi ke ampere dengan arus dasar I_b (Persamaan 5).

2.3 Persyaratan Pengaman

Kapasitas pemutus perangkat proteksi tidak boleh kurang dari arus hubung singkat maksimum di titik pemasangannya, dan kapasitas penutupan (*making capacity*) tidak boleh kurang dari nilai puncaknya (ketentuan klasifikasi seperti NK). Bila data mesin berputar tidak tersedia, kontribusi motor ditambahkan ke arus generator. Jenis pengaman yang dipakai adalah *air circuit breaker* (ACB) untuk arus besar dan *moulded*

case circuit breaker (MCCB) untuk arus menengah (Goh et al., 2017).

3. METODE PENELITIAN

3.1 Objek dan Data

Objek penelitian adalah kapal tanker minyak 17.500 LDWT berkelas NK dengan panjang antarperpendikuler 154 m, lebar 26 m, sarat 7 m, dan kecepatan 13 knot yang dibangun PT PAL Indonesia (Persero). Data diperoleh melalui wawancara, observasi, dan dokumentasi pada Departemen *Electric and Electronic Outfitting* Divisi Desain PT PAL, sesuai *building specification contract*. Data mencakup tabel konsumsi daya (Tabel 1; PT PAL Indonesia, 2022), generator, transformator, kabel, dan *circuit breaker*.

Tiga generator utama STAMFORD S6L1M-H4 masing-masing 813 kVA (650 kW, cos φ 0,8), 440 V, 60 Hz bekerja bergantian sesuai kebutuhan beban, dan satu generator darurat STAMFORD UCM274H 120 kVA (96 kW) (STAMFORD, 2010). Dua transformator utama 75 kVA (440/230 V, impedansi 4%) dan tiga transformator darurat 12,5 kVA satu fasa melayani beban 220 V. Kabel berpenghantar tembaga berisolasi XLPE sesuai IEC 60092-360.

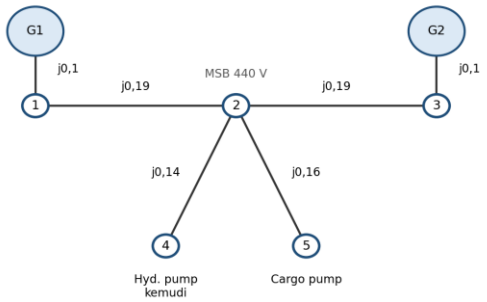
Tabel 1. Kondisi beban dan generator yang beroperasi

Kondisi	Beban (kW)	Generator	LF (%)
Normal sea going	485,52	1 × 650 kW	74,69
Leaving & arriving	541,63	2 × 650 kW	41,66
Cargo unloading	1.103,90	2 × 650 kW	84,92
At in port	294,36	1 × 650 kW	45,29
Emergency	74,74	1 × 96 kW	77,86

LF: load factor generator. Sumber: generator load balance PT PAL (2022).

3.2 Tahapan Analisis

Analisis dilakukan dalam lima tahap pada gangguan tiga fasa simetris. Pertama, arus hubung singkat di setiap bus disimulasikan dengan ETAP 19.0.1 memakai metode IEC 61363 pada empat kondisi: beban maksimum (*cargo unloading*), normal (*normal sea going*), minimum (*at in port*), dan darurat. Kedua, arus puncak dihitung manual menurut IEC 61363 untuk motor *cargo pump*, motor *hydraulic pump* kemudi, generator utama, dan generator darurat, lalu dibandingkan dengan ETAP. Ketiga, jaringan disederhanakan menjadi diagram reaktansi lima bus (Gambar 1), diubah menjadi Ybus, dan Zbus dihitung dengan MATLAB. Keempat, arus gangguan Zbus dibandingkan dengan ETAP. Kelima, *breaking capacity* dipilih dan diverifikasi dengan kurva waktu-arus (*time current curve*, TCC).



Gambar 1. Diagram reaktansi lima bus (p.u.)

Bus 1 dan 3: generator utama; bus 2: MSB 440 V; bus 4: hydraulic pump kemudi; bus 5: cargo pump.

3.3 Persamaan yang Digunakan

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (1)$$

$$Z_{bus} = {Y_{bus}}^{-1} \quad (2)$$

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_f} \quad (3)$$

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} I_k(F) \quad (4)$$

$$I_b = \frac{S}{\sqrt{3} \times U}, \; I\,(A) = I\,(p.u.) \times I_b \quad (5)$$

$$BC \geq I_k'', \; margin = \frac{BC}{I_k''} \qquad (6)$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Arus Hubung Singkat Hasil Simulasi ETAP

Tabel 2 meringkas arus subtransien tiga fasa pada empat kondisi beban. Arus terbesar terjadi pada kondisi *cargo unloading*: 34,087 kA di MSB 440 V, 33,650 kA di generator utama, dan 33,219 kA di bus *cargo pump* (BUS 76). Pada kondisi ini dua generator beroperasi dan motor besar ikut menyumbang arus. Pada kondisi normal dan pelabuhan dengan satu generator, arus turun menjadi sekitar setengahnya (15,970 dan 14,244 kA di generator), dan pada kondisi darurat hanya 2,182 kA karena generator darurat berdaya 120 kVA.

Tabel 2. Arus hubung singkat subtransien tiga fasa (kA, rms)

Kondisi	Generator	MSB/ESB	Beban terbesar
Cargo unloading	33,650	34,087	33,219 (cargo pump)
Normal sea going	15,970	15,897	15,425 (trafo utama)
At in port	14,244	14,152	12,785 (kompresor udara)
Emergency	2,182	2,181	2,170 (trafo darurat)

4.2 Perbandingan IEC 61363 Manual dan ETAP

Perhitungan manual IEC 61363 pada empat peralatan (Tabel 3) menghasilkan nilai yang dekat dengan ETAP. Selisih total ketiga komponen (subtransien, transien, tunak) adalah 2,6% untuk *cargo pump*, 5,3% untuk *hydraulic pump* kemudi, 0,25% untuk generator utama, dan 5,6% untuk generator darurat. Kesesuaian ini mendukung penggunaan ETAP sebagai acuan penentuan *breaking capacity*.

Tabel 3. Perbandingan ETAP dan IEC 61363 manual (kA)

Peralatan	ETAP (sub/trans/tunak)	Manual	Selisih
Cargo pump	33,219 / 29,810 / 3,998	32,870 / 29,024 / 3,384	2,6%
Hyd. pump kemudi	1,313 / 1,312 / 0,817	1,304 / 1,142 / 0,812	5,3%
Generator utama	33,650 / 30,045 / 4,005	33,300 / 30,155 / 4,070	0,25%
Generator darurat	2,182 / 1,777 / 0,296	1,974 / 1,761 / 0,252	5,6%

4.3 Analisis dengan Zbus

Dari admitansi cabang pada Gambar 1, Ybus disusun dan dibalik menjadi Zbus. Elemen diagonal yang diperoleh adalah $Z_{11} = Z_{33} \approx$ j0,083, Z_{22} = j0,145, Z_{44} = j0,285, dan Z_{55} = j0,305 p.u. Bus generator memiliki impedansi terkecil, sehingga tingkat gangguannya tertinggi, sedangkan bus beban di ujung cabang memiliki impedansi lebih besar.

Dengan impedansi gangguan Z_f non-nol sebagaimana dipakai dalam tugas akhir, yaitu sama dengan reaktansi peralatan di bus tersebut, arus gangguan di bus generator adalah 5,5 p.u. atau 11,726 kA dengan I_b = 2.132 A. Pada bus *hydraulic pump* kemudi didapat 2,38 p.u. (0,058 kA, I_b = 24,6 A) dan pada bus *cargo pump* 2,17 p.u. (2,669 kA, I_b = 1.230 A). Nilai ini jauh di bawah ETAP (Tabel 4).

Tabel 4. Arus gangguan Zbus dan ETAP

Bus	Z_{kk} (p.u.)	Z_f non-nol: p.u. / kA	$Z_f = 0$: p.u. / kA	ETAP (kA)
Generator	0,083	5,5 / 11,73	12,05 / 25,7	33,650
Hyd. pump	0,285	2,38 / 0,058	3,51 / 0,086	1,313
Cargo pump	0,305	2,17 / 2,669	3,28 / 4,03	33,219

Arus dasar: generator 2.132 A, hyd. pump 24,6 A, cargo pump 1.230 A.

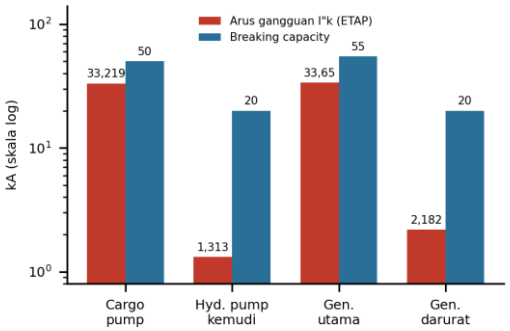
Ada dua penyebab selisih yang dapat diidentifikasi dari data penelitian. Pertama, Z_f non-nol memperkecil arus. Bila gangguan diasumsikan langsung ($Z_f = 0$), arus di bus generator menjadi 12,05 p.u. atau sekitar 25,7 kA, yakni 76% dari hasil ETAP, dan selisih sisanya dapat berasal dari kontribusi motor yang beroperasi serta perbedaan parameter antara jaringan lima bus yang disederhanakan dan model ETAP lengkap. Kedua, pada bus beban, arus p.u. dikonversi dengan arus nominal tiap motor sebagai basis. Padahal gangguan pada bus beban dialirkan oleh seluruh sistem 440 V, sehingga basis arus seharusnya sama untuk semua bus. Karena itu hasil Zbus untuk bus beban pada Tabel 4 tidak dapat dibandingkan langsung dengan ETAP.

4.4 Penentuan Pengaman

Penentuan *breaking capacity* dalam penelitian ini bertumpu pada ETAP dan IEC 61363, dengan Zbus sebagai pemeriksa tingkat gangguan antarbus. Arus subtransien terbesar dipakai sebagai syarat Persamaan 6 dan dipilih peringkat standar di atasnya (Tabel 5, Gambar 2). Perangkat dipilih dari katalog Schneider Electric (2022). *Cargo pump* dilindungi ACB 3 kutub 1.600 A dengan *breaking capacity* 50 kA, dan generator utama ACB ET5S rating 4.000/1.600 A dengan 55 kA. *Hydraulic pump* kemudi memakai MCCB NSX100-B 100/32 A dan generator darurat MCCB NSX250-B 250/200 A, keduanya 20 kA. Kurva TCC menunjukkan gangguan terputus dalam 0,02 detik pada ACB *cargo pump* dan generator utama, dan kurang dari 0,01 detik pada MCCB kemudi.

Tabel 5. Rekomendasi pengaman

Beban	I"k (kA)	BC (kA)	Margin	Perangkat
Cargo pump	33,219	50	1,5×	ACB 1.600 A
Hyd. pump kemudi	1,313	20	15,2×	MCCB NSX100-B
Generator utama	33,650	55	1,6×	ACB ET5S 4.000/1.600 A
Generator darurat	2,182	20	9,2×	MCCB NSX250-B



Gambar 2. Arus gangguan dan breaking capacity

Untuk seluruh 141 sirkuit pada MSB dan ESB, rekomendasi mengikuti arus gangguan masing-masing bus: 126 sirkuit pada 20 kA, 11 sirkuit pada 35 kA, satu sirkuit (*cargo pump*) pada 50 kA, dan tiga generator utama pada 55 kA. Jadi mayoritas sirkuit cukup memakai pengaman 20 kA, dan hanya sirkuit di dekat generator atau beban bermotor besar yang memerlukan kapasitas tinggi.

4.5 Pembahasan

Pertama, *breaking capacity* ditentukan oleh kondisi *cargo unloading* dan bus dekat generator. Kondisi darurat dan pelabuhan tidak menjadi penentu, tetapi tetap perlu diperiksa untuk menjamin pengaman bekerja pada arus gangguan yang lebih kecil. Kedua, Zbus bermanfaat untuk menunjukkan bahwa tingkat gangguan tertinggi berada di bus generator dan menurun ke arah beban, tetapi akurasi kuantitatifnya bergantung pada pemodelan. Untuk keperluan penetapan peringkat, Zbus perlu memakai basis arus bersama, $Z_f = 0$ untuk gangguan langsung, dan kontribusi motor yang eksplisit.

Keterbatasan penelitian ini adalah hanya meninjau gangguan tiga fasa simetris, sehingga gangguan antarfasa dan fasa ke badan kapal belum dihitung. Perhitungan manual IEC 61363 pada Tabel 3 memakai parameter peralatan di bus terkait, dan perbandingannya dengan keluaran ETAP yang berupa nilai RMS subtransien perlu diverifikasi lebih lanjut dengan menyamakan definisi besaran (nilai puncak dan RMS). Jaringan Zbus hanya lima bus dan konfigurasi generator mengikuti *load balance* (satu atau dua unit), sedangkan kasus tiga generator paralel tidak dianalisis. Verifikasi TCC dilakukan pada empat perangkat representatif, bukan pada seluruh sirkuit.

5. KESIMPULAN

Arus hubung singkat subtransien tiga fasa terbesar pada jaringan distribusi kapal tanker 17.500 LDWT terjadi pada kondisi *cargo unloading*: 34,087 kA di MSB 440 V, 33,650 kA di generator utama, dan 33,219 kA di *cargo pump*. Pada kondisi darurat, arus terbesar 2,182 kA di generator darurat. Perhitungan manual IEC 61363 berselisih 0,25–5,6% dari ETAP.

Breaking capacity yang ditetapkan adalah 50 kA untuk *cargo pump*, 55 kA untuk generator utama, dan 20 kA untuk *hydraulic pump* kemudi dan generator darurat, dengan margin 1,5 sampai 15,2 kali arus gangguan. Dari 141 sirkuit, 126 cukup 20 kA, 11 sirkuit 35 kA, satu 50 kA, dan tiga 55 kA.

Zbus memetakan tingkat gangguan antarbus dengan baik. Dengan Z_f non-nol dan basis arus peralatan, hasilnya jauh di bawah ETAP (11,726 kA terhadap 33,650 kA di bus generator). Dengan $Z_f = 0$, hasilnya 25,7 kA atau 76% dari ETAP. Penelitian lanjutan perlu memakai basis arus bersama pada Zbus, menambahkan gangguan antarfasa dan fasa ke badan kapal, membandingkan dengan perangkat lunak lain seperti DIgSILENT, dan mengkaji pengaturan *trip unit* pengaman.

DAFTAR PUSTAKA

Goh, H. H., Sim, S. Y., bin Hamzah, N. I., bin Mazlan, S., Ling, C. W., Chua, Q. S., & Goh, K. C. (2017). Types of circuit breaker and its application in substation protection. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 8*(1), 213–220. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v8.i1.pp213-220

International Electrotechnical Commission. (2002). *IEC 61363-1: Electrical installations of ships and mobile and fixed offshore units – Part 1: Procedures for calculating short-circuit currents in three-phase a.c.* IEC.

Kusuma, I. R., Sarwito, S., Sanuri, S., Zaman, M. B., & Primasandy, A. P. (2019). Analisa drop voltage dan short circuit pada kapal trimaran. *Seminar Nasional Kelautan XVI*.

Panji, P. A. A., Raditya, A. H., & Indrawan, T. (2017). Short-circuit current calculation application for A.C 3 phase on marine and mobile offshore installations based on IEC-61363 standard. *Procedia Engineering, 194*, 545–552. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.183

PT PAL Indonesia (Persero). (2022). *Perhitungan konsumsi daya listrik dan*

generator load balance [Dokumen internal, Lampiran 3].

Saadat, H. (1999). *Power system analysis*. McGraw-Hill.

Sampeallo, A. S., & Fischer, P. J. (2019). Analisis gangguan hubung singkat pada jaringan pemakaian sendiri PLTU Bolok PT. SMSE (IPP) unit 3 dan 4 menggunakan software ETAP 12.6.0. *Jurnal Media Elektro, 8*(1).

Sarwito, S., & Sastri, A. P. (2020). Analisa gangguan short circuit serta pengaturan koordinasi proteksi pada container crane disuplai dengan energi terbarukan berbasis simulasi. *Jurnal Teknik ITS, 9*.

Sarwito, S., Kusuma, I. R., Kurniawan, A., & Prananda, J. (2022). Short circuit analysis on AHTS ship due to use of closed circuit electrical system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 972*(1), 012057. https://doi.org/10.1088/1755-1315/972/1/012057

Schneider Electric. (2022). *PacT Series MasterPact MTZ catalog numbers and spare parts 2022: Air circuit breakers and switch-disconnectors*. https://www.se.com

STAMFORD. (2010). *UCM274H – Winding 311*. Cummins Generator Technologies.