

Diode Clamped Multilevel Inverter Berbasis Fuzzy Logic Sebagai Peredam Harmonik pada Sistem Kelistrikan Kapal Akibat Propulsi Elektrik

Thoriq Huda¹, Istiyo Winarno²

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah Surabaya

E-mail: hthoriqul@gmail.com¹, istiyo.winarno@hangtuah.ac.id²

Abstrak— Transportasi merupakan salah satu hal yang penting dalam kehidupan saat ini. Kapal merupakan salah satu transportasi yang digunakan. Umumnya kapal masih menggunakan propulsi bertenaga diesel yang mana saat kecepatan meningkat akan membutuhkan konsumsi bahan bakar yang lebih banyak. Dengan menggunakan propulsi elektrik dapat mengurangi konsumsi bahan bakar, pengaturan kecepatan yang mudah melalui konverter frekuensi. Timbulnya harmonik distorsi pada sistem kelistrikan kapal mengakibatkan berkurangnya kualitas daya listrik pada kapal dan gangguan yang tidak diinginkan. Dalam penelitian ini untuk meredam besar harmonik menggunakan *diode clamped multilevel inverter* (DCMLI) tiga tingkat dengan *fuzzy logic* sebagai kontrol keseimbangan tegangan pada kapasitor DCMLI. Menunjukkan kondisi THDi yang lebih baik setelah menggunakan kontrol *fuzzy logic* untuk keseimbangan tegangan kapasitor DCMLI. Analisa besar *total harmonic distortion* (THD) dilakukan dengan penggunaan propulsi elektrik Main propulsion dan Bow Thruster, dengan rata-rata besar THD pada Main propulsion 0.44% THDv dan 208.53% THDi sebelum dengan kontrol *fuzzy logic*, dan sesudah dengan kontrol *fuzzy logic* 7.86% THDv dan 92.55% THDi. Pada Bow Thruster rata-rata THD sebesar 0.90% THDv dan 208.68% THDi saat sebelum dengan kontrol *fuzzy logic*, dan sesudah dengan kontrol *fuzzy logic* 6.62% THDv dan 62.51% THDi.

Kata kunci : *Diode Clamped Multilevel Inverter*, *Fuzzy Logic*, Propulsi Elektrik Kapal, *Total Harmonic Distortion* (THD)

Abstract— Transportation is one of the important things in life today. Ship is one of the transportation used. Generally, ships still use diesel-powered propulsion, which when the speed increases will require more fuel consumption. Using electric propulsion can reduce fuel consumption, easy speed regulation via a frequency converter. The appearance of harmonic distortion in the ship's electrical system results in reduced quality of electric power on the ship and unwanted disturbances. In this study, to reduce the amount of harmonics using a three-level diode clamped multilevel inverter (DCMLI) with fuzzy logic as a control of the voltage balance of the DCMLI capacitor. Shows a better THDi condition after using fuzzy logic control for DCMLI capacitor voltage balance. Total harmonic distortion (THD) analysis was performed using electric propulsion Main propulsion and Bow Thruster, with the average THD on Main propulsion 0.44% THDv and 208.53% THDi before using fuzzy

logic control, and after using fuzzy logic control 7.86% THDv and 92.55% THDi. In Bow Thruster, the average THD is 0.90% THDv and 208.68% THDi before using fuzzy logic control, and after using fuzzy logic control it is 6.62% THDv and 62.51% THDi.

Keyword: Diode Clamped Multilevel Inverter, Fuzzy Logic, Ship Electric Propulsion, Total Harmonic Distortion (THD)

I. PENDAHULUAN

Transportasi merupakan salah satu hal yang penting dalam kehidupan saat ini. Salah satunya transportasi laut yang menggunakan kapal sebagai medianya. Pada umumnya pada kapal masih menggunakan propulsi bertenaga diesel yang mana pada saat meningkatkan kecepatan maka akan membutuhkan konsumsi bahan bakar yang lebih banyak. Meningkatnya harga bahan bakar beberapa tahun terakhir mendorong pencarian solusi agar dapat menekan biaya konsumsi bahan bakar dengan menggunakan system yang lebih hemat energi, murah, dan mudah perawatannya.

Penggunaan propulsi elektrik merupakan salah satu solusi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar, dengan pengaturan kecepatan yang mudah melalui konverter frekuensi, dan juga mudah dalam perawatan. Propulsi elektrik merupakan salah satu beban yang terbesar pada jaringan sistem kelistrikannya, seperti timbulnya harmonik distorsi yang akan mempengaruhi kualitas daya listrik dan dapat mempengaruhi peralatan listrik yang lainnya. Faktanya harmonik distorsi telah ditetapkan standarnya yakni total harmonik distorsi (THD) baiknya harus dibawah 8% [1]. Jika harmonik distorsi pada sistem kelistrikan tidak segera ditangani dan diperbaiki akan menimbulkan masalah berkurangnya *lifetime* peralatan dan dapat merusak peralatan listrik lainnya.

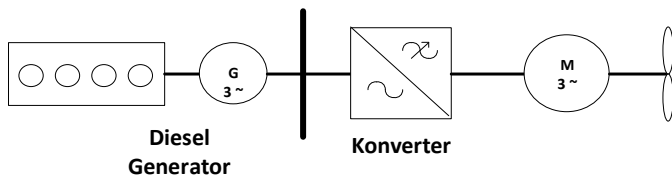
Untuk meredam timbulnya harmonik distorsi yang besar pada propulsi listrik kapal digunakanlah inverter bertingkat [2]–[4], yang mana semakin banyak tingkatan maka harmonik yang dihasilkan semakin kecil karena bentuk gelombangnya semakin mendekati sinusoidal. Karena hal itu pada penelitian ini untuk mengatasi masalah harmonik yang terjadi pada sistem kelistrikan kapal akibat propulsi elektrik dapat diredam

menggunakan inverter bertingkat jenis *diode clamped multilevel inverter* (DCMLI) tiga tingkat dengan *fuzzy logic* sebagai kontrol keseimbangan tegangan pada kapasitor DCMLI.

II. DASAR TEORI

A. Propulsi Elektrik pada Kapal

Propulsi elektrik pada kapal (Gbr. 1) telah menggantikan propulsi konvensional yang masih menggunakan tenaga diesel. Propulsi elektrik menggunakan motor listrik induksi yang diumpankan melalui konverter frekuensi sebagai penggerak baling-baling pada kapal. Keunggulan menggunakan propulsi elektrik yang mana mudah dalam segi perawatan, dinamika yang baik dalam segi pengaturan variasi kecepatan [5]. Hal ini mengakibatkan berkurangnya konsumsi bahan bakar karena diesel generator bekerja secara konstan dan tidak membutuhkan perubahan tenaga saat terjadi variasi kecepatan dan berkurangnya getaran mesin.



Gbr. 1 Skema propulsi elektrik pada kapal.

B. Harmonik

Harmonik merupakan bentuk tegangan ataupun arus sinusoidal yang memiliki kelipatan frekuensi dari bilangan bulat frekuensi fundamentalnya (50Hz, 60Hz). Harmonik merupakan jenis gangguan yang ada pada sistem kelistrikan akibat karakteristik beban non-linier yang mengakibatkan harmonik pada tegangan dan arus[6].

Besar harmonik diukur dalam besaran THD dalam persen (%). THD merupakan akar kuadrat rata-rata (rms) dari harmonik fundamentalnya, dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \tag{1}$$

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \tag{2}$$

Dimana:

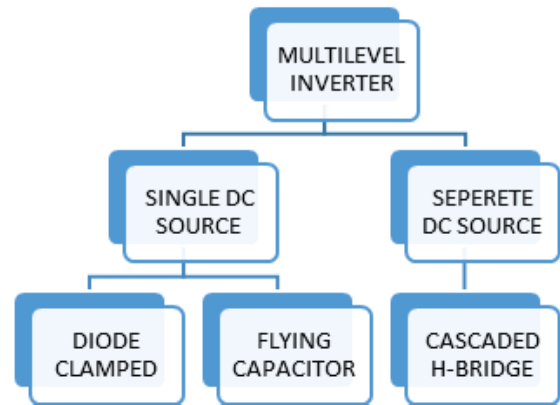
V_n = tegangan rms frekuensi pada orde ke-n

V_1 = tegangan rms frekuensi fundamental

C. Multilevel Inverter

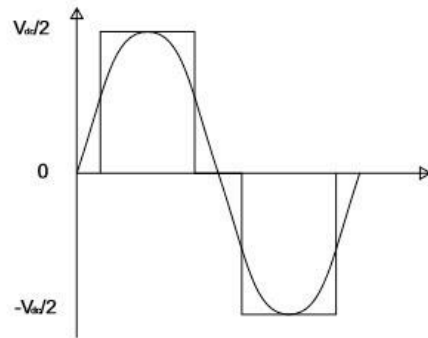
Multilevel inverter (MLI) salah satu jenis konverter yang merubah DC-AC dengan hasil tegangan yang lebih dari dua tingkat. Semakin banyak tingkatan pada MLI maka tegangan

akan mendekati sinusoidal murni [7]–[9]. MLI terbagi beberapa jenis tergantung sumber tegangan yang digunakan, seperti *diode clamped*; *flying capacitor*; *cascade H-bridge* (Gbr. 2).



Gbr. 2 Jenis *multilevel inverter*

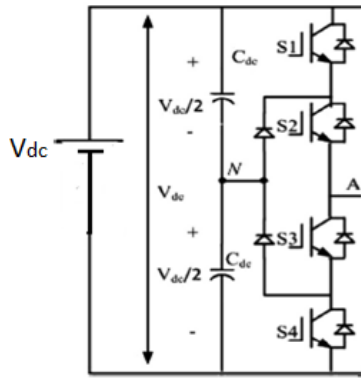
Diode clamped dengan tiga merupakan MLI yang banyak digunakan, dimana keluarannya menghasilkan tegangan positif, tegangan nol, dan tegangan negatif (Gbr. 3) yang dihasilkan dari empat buah saklar daya.



Gbr. 3 Gelombang tegangan tiga tingkat

Topologi jenis ini menggunakan diode sebagai penjepit tegangan rangkaian, tipe ini dinilai sangat praktis (Gbr. 4). Tegangan DCMLI tiga tingkat menghasilkan tegangan $+V_{dc}/2$, 0 , $-V_{dc}/2$, dan titik N sebagai titik netral, dengan prinsip kerja seperti berikut:

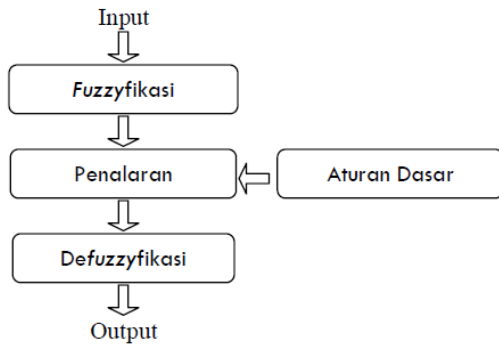
- Ketika S1 dan S2 tertutup maka $V_{AN} = +V_{dc}/2$
- Ketika S2 dan S3 tertutup maka $V_{AN} = 0$
- Ketika S3 dan S4 tertutup maka $V_{AN} = -V_{dc}/2$



Gbr. 4 Konfigurasi diode clamped multilevel inverter tiga tingkat

D. Fuzzy Logic

Fuzzy logic merupakan logika dengan konsep ketidakpastian. Logika fuzzy memiliki rentang nilai 0 sampai 1 sehingga logika ini paling mudah dipahami oleh manusia, berbeda dengan logika tegas yang hanya mempunyai nilai 0 dan 1 [10]. Dalam logika fuzzy terdapat sistem kendali yang disebut fuzzy inference system dengan beberapa metode diantaranya metode Mamdani, dan metode Sugeno. Fuzzy logic memiliki beberapa tahapan yang harus dilalui untuk mendapatkan hasil yang akurat (Gbr. 5), yaitu himpunan fuzzy (fuzzyfikasi); aturan dasar; penalaran; dan defuzzyfikasi.



Gbr. 5 Proses kendali fuzzy logic

III. METODELOGI

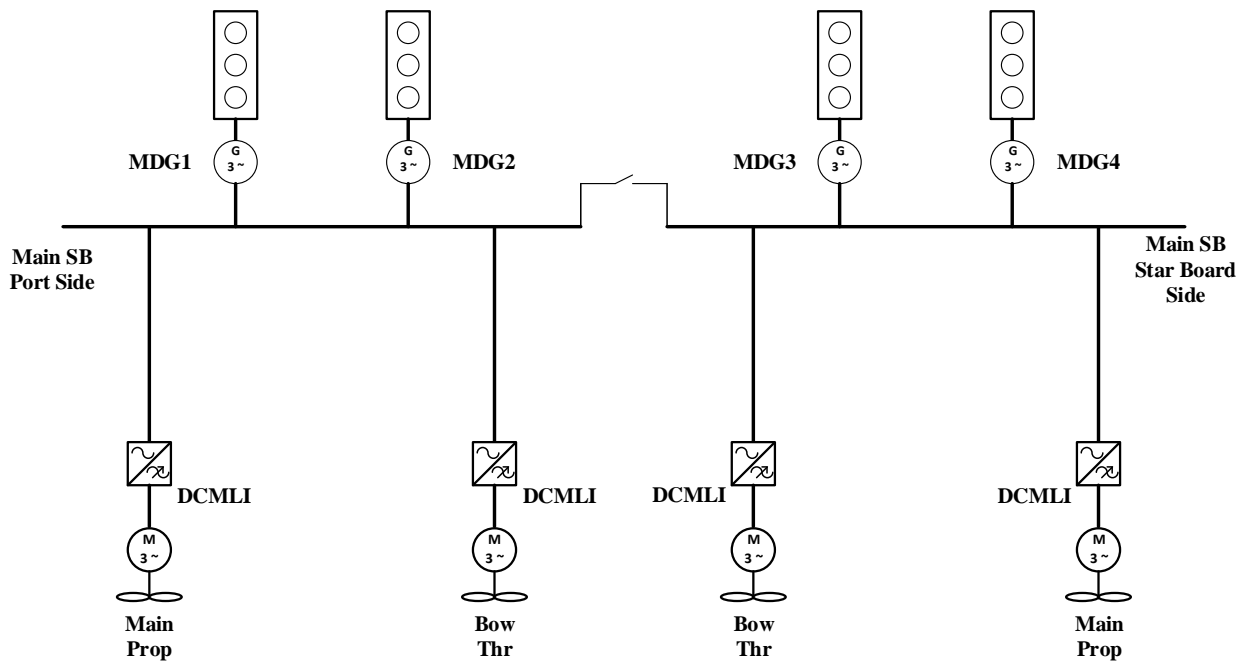
Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki kualitas daya listrik pada kapal dengan cara meredam timbulnya harmonik distorsi akibat propulsi elektrik. Dengan menggunakan DCMLI tiga tingkat dengan kontrol fuzzy logic sebagai control keseimbangan tegangan kapasitor pada DCMLI.

A. Konfigurasi Sistem Tenaga Listrik Kapal

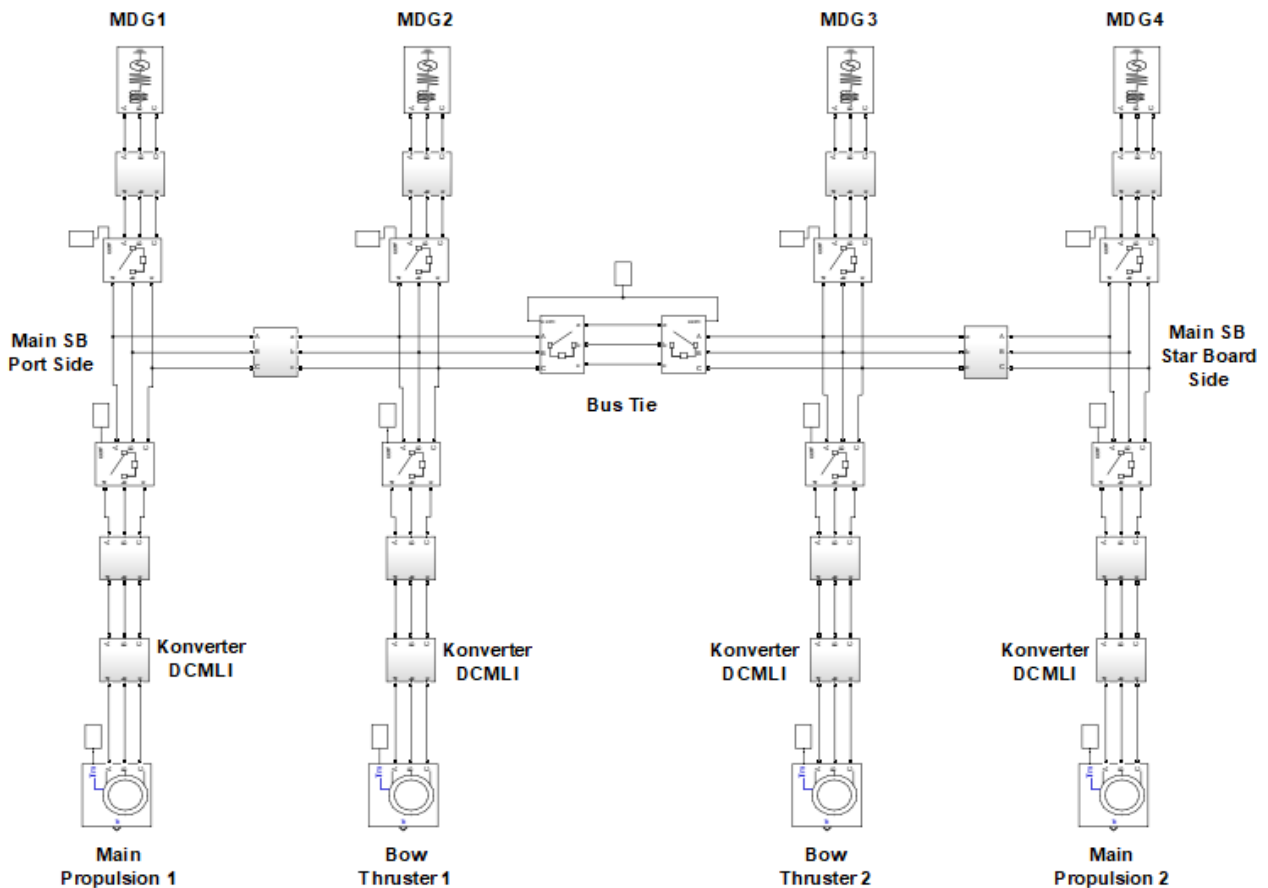
Sistem kelistrikan kapal (Gbr. 6) menggunakan dua bus ganda yang dilengkapi dengan tenaga listrik tiga fasa dengan tegangan nominal 690V dan frekuensi 60Hz. Dengan dua buah propulsi elektrik dan diesel generator di sebelah starboard side dan dua buah propulsi elektrik dan diesel generator di sebelah port side, dengan parameter tenaga pada Tabel I. Agar dapat mengetahui analisa besar THD yang ada pada sistem kelistrikan kapal akibat penggunaan propulsi elektrik, maka merancang terlebih dahulu konfigurasi sistem tenaga listrik kapal pada software Matlab R2013a dengan menggunakan Simulink (Gbr.7).

TABEL I
PARAMETER TENAGA LISTRIK

Parameter	Diesel Generator		Propulsi Elektrik		
	MDG 1 MDG 4	MDG 2 MDG 3	Main Prop 1 Main Prop 2	Bow Thruster 1	Bow Thruster 2
Tegangan (V)	690	690	675	690	690
Frekuensi (Hz)	60	60	50	60	60
Daya (kW)	4000	3000	5250	1500	1050
Power Faktor	0.8	0.8	0.85	0.85	0.85
Jumlah Kutub	10	10	10	6	6



Gbr. 6 Konfigurasi sistem tenaga listrik kapal



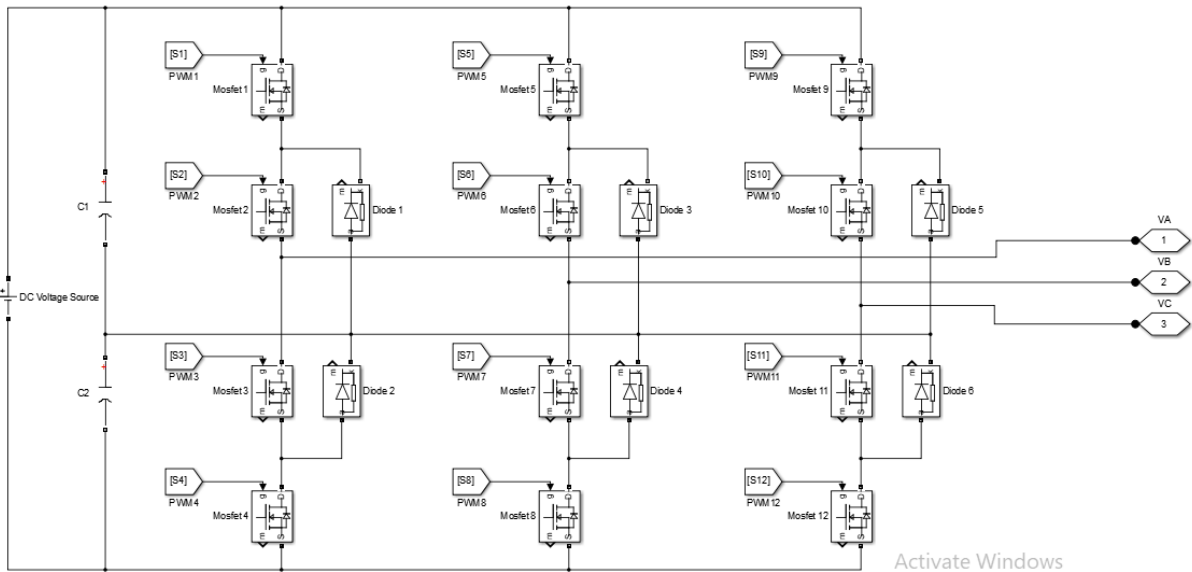
Gbr. 7 Konfigurasi sistem tenaga listrik kapal pada Simulink

B. Diode Clamped Multilevel Inverter

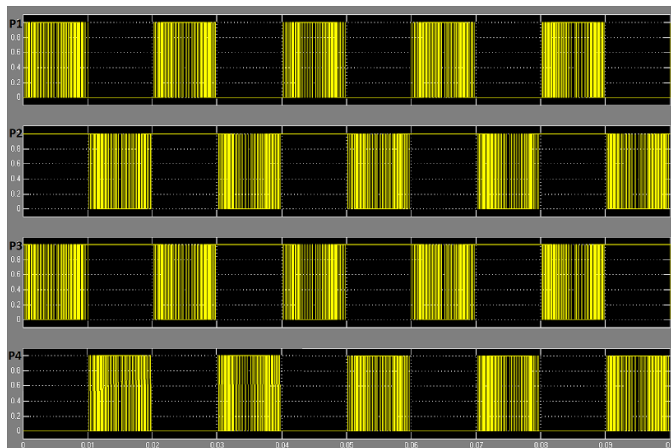
Dalam penelitian ini bagaimana peredaman harmonik pada sistem kelistrikan kapal akibat penggunaan propulsi elektrik digunakanlah DCMLI dengan tiga tingkat (Gbr. 8).

Struktur dari DCMLI tiga tingkat terdiri dari 4 buah saklar daya (S1, S2, S3, S4) disetiap fasanya yang digunakan untuk membentuk gelombang sinusoidal (Gbr. 10) dan dikendalikan

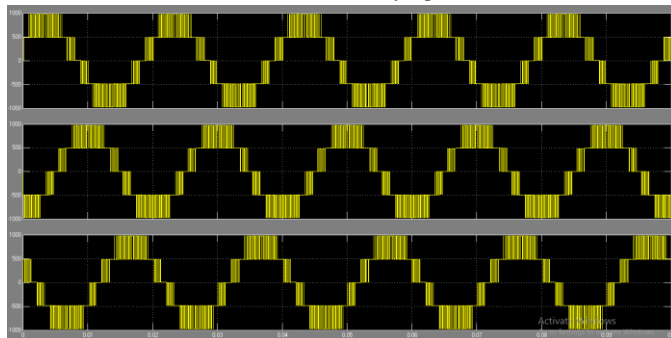
on/off menggunakan sinyal pulsa yang dimodulasi (P1, P2, P3, P4) (Gbr. 9).



Gbr. 8 Rangkaian DCMLI tiga tingkat



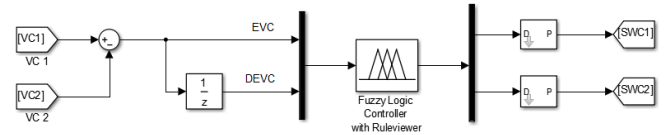
Gbr. 9 Bentuk sinyal pulsa



Gbr. 10 Bentuk gelombang tegangan tiga fasa

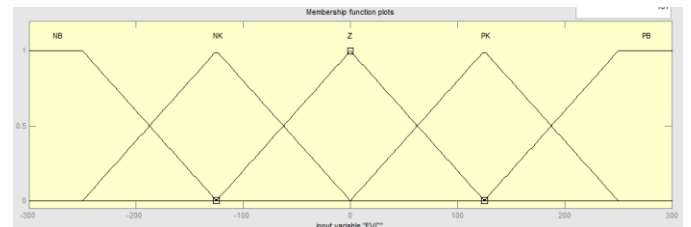
tegangan titik netral harus sama dengan nol. Penambahan saklar (Gbr. 11) sebagai pengontrol tegangan pada masing-masing kapasitor bertujuan agar tegangan kapasitor seimbang.

Untuk mengatur keseimbangan digunakan kontrol *fuzzy logic* (Gbr. 12) yang memiliki dua variabel *input*, yaitu EVC (*error voltage capasitor*) yang didapatkan dari perbandingan dua nilai tegangan kapasitor, sehingga menghasilkan *error* dan DEVC (*delta error voltage capasitor*).



Gbr. 12 Fuzzy logic sebagai control keseimbangan kapasitor

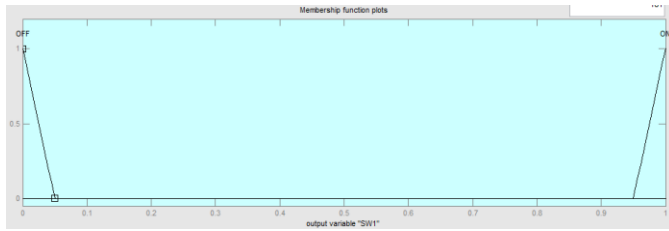
Membership fuction pada variabel *input* (Gbr. 13) terdapat lima skala yang berbeda, seperti negatif besar (NB), negatif kecil (NK), nol (Z), positif kecil (PK), dan positif besar (PB). Untuk varibel *output* (Gbr.14) terdapat dua skala saja, yaitu ON dan OFF.



Gbr. 13 Input EVC membership fuction

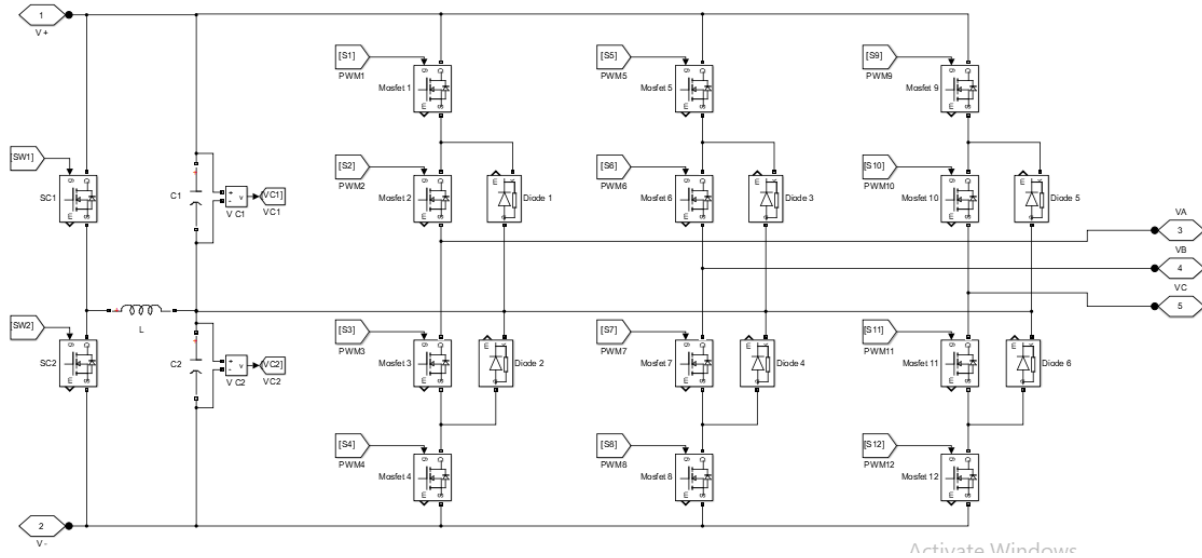
C. Kontrol Fuzzy logic

Pada DCMLI timbul masalah perbedaan tegangan pada kapasitor atas (C1) dan kapasitor bawah (C2), yang mana



Gbr. 14 Output SW1 membership function

Aturan-taturan dasar pada umumnya menggunakan pernyataan *if – then* yang digunakan sebagai respon *fuzzy logic*, penelitian ini memiliki aturan seperti pada Tabel II maka dapat ditulis *if (ECV is NB) and (DEVC is NB) then (SW1 is OFF)(SW2 is ON)* dan seterusnya.



Gbr. 11 Rangkaian DCMLI dengan saklar penyeimbang kapasitor

TABEL II
RULE BASE

SW1						
DEVC \ EVC	NB	NK	Z	PK	PB	
NB	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	
NK	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	
Z	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	
PK	ON	OFF	OFF	ON	ON	
PB	ON	OFF	OFF	ON	ON	

SW2						
DEVC \ EVC	NB	NK	Z	PK	PB	
NB	ON	ON	OFF	OFF	ON	
NK	ON	ON	OFF	OFF	ON	
Z	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	
PK	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	
PB	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	

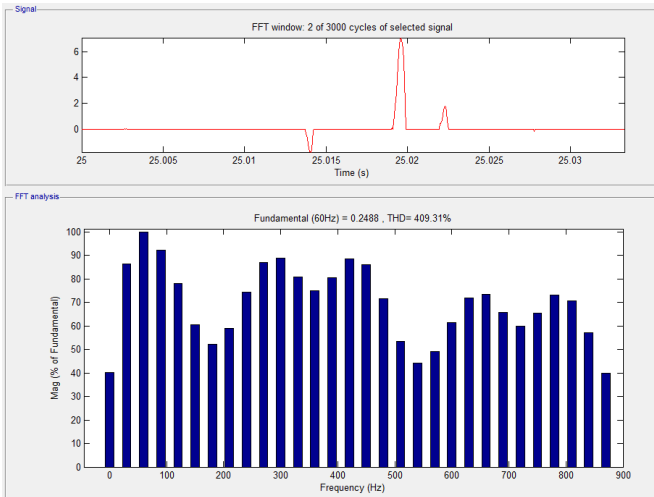
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan pembuatan rangkaian mulai dari sistem kelistrikan kapal sampai dengan desain DCMLI, Kemudian dilakukan simulasi untuk mendapatkan hasil besar THD pada sistem kelistrikan kapal.

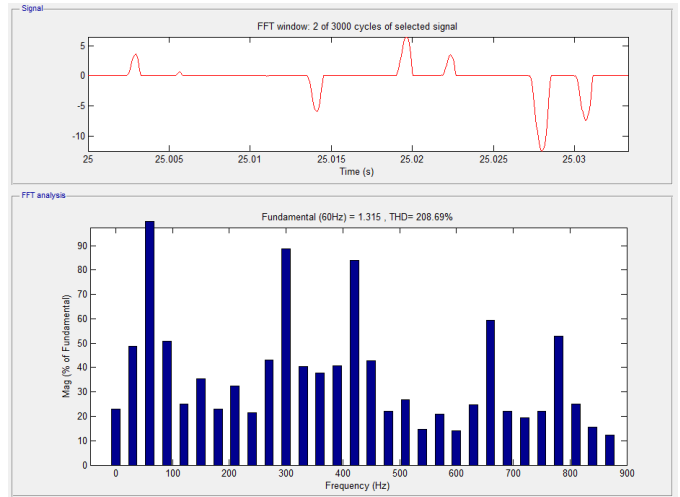
Analisa besar THD dilakukan dengan beberapa kondisi penggunaan propulsi elektrik, seperti pada saat hanya menggunakan Main propulsion 1 dan 2, dan pada saat hanya menggunakan Bow Thruster 1 dan 2. Dari kedua kondisi tersebut juga akan melihat besar THD yang muncul saat sebelum dan sesudah menggunakan kontrol *fuzzy logic*.

A. THD Main Propulsion 1 dan 2

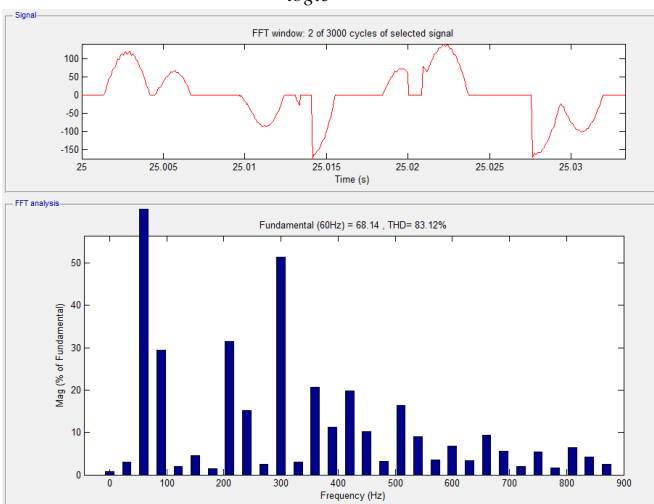
Pada kondisi ini hanya menggunakan propulsi elektrik utama, yaitu Main propulsion 1 dan 2. Analisa dilakukan pada titik PCC (*point of common coupling*) dekat dengan beban propulsi elektrik. Pada titik Main prop. 2 menghasilkan besar nilai THD pada sistem kelistrikan kapal saat sebelum kontrol *fuzzy logic* THDi 409.31% (Gbr. 15) dan sesudah kontrol *fuzzy logic* THDi 82.12% (Gbr. 16). Untuk titik PCC yang lain terlihat pada Tabel III yang menyajikan saat sebelum dan sesudah menggunakan kontrol *fuzzy logic*.



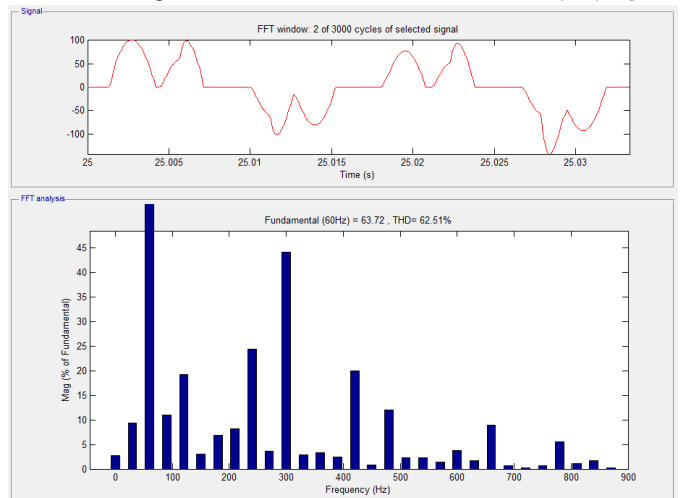
Gbr. 15 THDi pada titik PCC Main propulsi 2 sebelum kontrol *fuzzy logic*



Gbr. 17 THDi pada titik PCC Bow thruster 2 sebelum kontrol *fuzzy logic*



Gbr. 16 THDi pada titik PCC Main propulsi 2 sesudah kontrol *fuzzy logic*



Gbr. 18 THDi pada titik PCC Bow thruster 2 sesudah kontrol *fuzzy logic*

TABEL III

BESAR THD SAAT MENGGUNAKAN MAIN PROPULSION 1 DAN 2

Titik PCC	Tanpa <i>fuzzy logic</i>		Dengan <i>fuzzy logic</i>	
	THDv	THDi	THDv	THDi
MDG 1	0.44%	389.63%	7.85%	67.67%
MDG 2	0.44%	389.31%	7.85%	67.67%
MDG 3	0.44%	388.93%	7.85%	67.62%
MDG 4	0.44%	388.97%	7.85%	67.62%
Main Propulsi 1	0.44%	7.75%	7.87%	101.99%
Main Propulsi 2	0.44%	409.31%	7.86%	83.12%

B. THD Bow Thruster 1 dan 2

Pada kondisi ini propulsi elektrik yang digunakan hanya propulsi bantu, yaitu Bow thruster 1 dan 2. Pada titik PCC Bow thruster 2 saat sebelum menggunakan kontrol *fuzzy logic* menghasilkan besar THDi 208.69% (Gbr. 17) dan sesudah kontrol *fuzzy logic* THDi 62.51% (Gbr. 18). Tabel IV menunjukkan besar THD pada titik PCC yang lainnya.

TABEL IV

BESAR THD SAAT MENGGUNAKAN BOW THRUSTER 1 DAN 2

Titik PCC	Tanpa <i>fuzzy logic</i>		Dengan <i>fuzzy logic</i>	
	THDv	THDi	THDv	THDi
MDG 1	0.90%	208.69%	6.61%	62.51%
MDG 2	0.90%	208.67%	6.61%	62.51%
MDG 3	0.90%	208.67%	6.61%	62.51%
MDG 4	0.90%	208.69%	6.61%	62.51%
Bow Thruster 1	0.90%	208.67%	6.62%	62.51%
Bow Thruster 2	0.90%	208.69%	6.62%	62.51%

Dari hasil analisa besar THD pada titik PCC Main propulsi 1 dan 2, Bow thruster 1 dan 2 terlihat pada saat sebelum menggunakan kontrol *fuzzy logic* menunjukkan THDi yang lebih besar, hal ini menunjukkan penggunaan kontrol *fuzzy logic* mendapatkan hasil yang lebih baik. Dengan rata-rata besar THD pada setiap jenis propulsi elektrik seperti pada Main propulsi saat sebelum kontrol *fuzzy logic* menghasilkan 0.44%THDv dan 208.53%THDi, dan saat

sesudah kontrol *fuzzy logic* menghasilkan 7.86%THDv dan 92.55%THDi. Rata-rata besar THD pada propulsi elektrik Bow thruster saat sebelum kontrol *fuzzy logic* menghasilkan 0.90%THDv dan 208.68%THDi, saat sesudah kontrol *fuzzy logic* 6.62%THDv dan 62.51%THDi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dari simulasi dan analisa besar THD pada sistem kelistrikan kapal akibat propulsi elektrik dengan *diode clamped multilevel inverter* dengan kontrol *fuzzy logic*, sehingga menarik beberapa kesimpulan :

1. Pada saat sebelum dan sesudah menggunakan kontrol *fuzzy logic* menghasilkan rata-rata besar THD dari setiap jenis propulsi elektrik menghasilkan:
Main propulsion
Sebelum 0.44% THDv, 208.53% THDi
Sesudah 7.86% THDv, 92.55% THDi
Bow Thruster
Sebelum 0.90% THDv, 208.68% THDi
Sesudah 6.62% THDv, 62.51% THDi
2. Pada saat sebelum dan sesudah menggunakan kontrol *fuzzy logic* menghasilkan THDv dan THDi yang berbeda. Pada saat sebelum menggunakan kontrol *fuzzy logic* menghasilkan THDv yang rendah namun menghasilkan THDi yang lebih tinggi daripada setelah menggunakan kontrol *fuzzy logic*
3. Semakin banyak propulsi elektrik yang bekerja, maka semakin besar THD yang ada pada sistem kelistrikan kapal.

REFERENSI

- [1] IEEE Std 519, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Stand. Assoc.*, vol. 2014, 2014.
- [2] A. Corso, F. D'Agostino, D. Gardella, M. Mazzucchelli, and F. Silvestro, "Analysis of the impact of AFE active front end on the THD on a shipboard power system: A comparison study using different simulation approaches," *2016 Int. Conf. Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propuls. Road Veh. Int. Transp. Electr. Conf. ESARS-ITEC 2016*, 2017, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841401.
- [3] A. Abdel Hamid Mansour, "Harmonic Reduction of Islanded Microgrid Ships Using Fuzzy Controlled DCMLI," *2018 20th Int. Middle East Power Syst. Conf. MEPCON 2018 - Proc.*, pp. 152–156, 2019, doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635222.
- [4] D. V. Umyarov, I. V. Gulyaev, and V. G. Titov, "High-Power Electric Ship Propulsion Systems with Advanced Frequency Converters," *Russ. Electr. Eng.*, vol. 91, no. 1, pp. 16–25, 2020, doi: 10.3103/S1068371220010113.
- [5] G. Sulligoi, A. Vicenzutti, and R. Menis, "All-electric ship design: From electrical propulsion to integrated electrical and electronic power systems," *IEEE Trans. Transp. Electr.*, vol. 2, no. 4, pp. 507–521, 2016, doi: 10.1109/TTE.2016.2598078.
- [6] IEEE Std 1159, *IEEE Recommended Practice for Monitoring*

- [7] H. Matalata and I. Hamid, "Pengembangan Topologi Inverter Multilevel Tiga Tingkat Satu Fasa Tipe Diode Clamped Dengan Mereduksi Komponen Saklar daya," no. 3, 2016.
- [8] A. K. Koshti and M. N. Rao, "A brief review on multilevel inverter topologies," *2017 Int. Conf. Data Manag. Anal. Innov. ICDMAI 2017*, pp. 187–193, 2017, doi: 10.1109/ICDMAI.2017.8073508.
- [9] V. D. Juyal, N. Upadhyay, K. V. Singh, A. Chakravorty, and A. K. Maurya, "Comparative harmonic analysis of Diode clamped multi-level inverter," *Proc. - 2018 3rd Int. Conf. Internet Things Smart Innov. Usages, IoT-SIU 2018*, no. c, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/IoT-SIU.2018.8519887.
- [10] A. Saelan, "Logika Fuzzy," *Strukt. Disk.*, vol. 1, no. 13508029, pp. 1–5, 2009.