

Analisis Penerapan Tapis LC pada *Inverter Static* Tiga Tingkat di PT INKA Madiun

Lailiyana Tri Rahmawati¹, Hidayat Nur Isnianto^{1*}, Achmad Sugandi²

¹Teknologi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol, Universitas Gadjah Mada; lailiyanatrirahmawati17@mail.ugm.ac.id

²Sistem Komponen Tier 1 dan 2, PT. Industri Kereta Api; achmad.sugandi@inka.co.id

*Korespondensi: hnIsnianto@ugm.ac.id

Abstract – *The use of three tingkat inverters in the SIV series in this research can support the operation of KRL and KRDE in Indonesia, especially when PT INKA can produce the system independently. In this LC filter value analysis research, the author used two parameters in the comparative analysis of L and C filter components, namely the Zheta and THD parameters. THD (total harmonic distortion) is the percentage value between the harmonic quantity compared to the fundamental quantity. Zheta is a parameter obtained from the derivative of the LC filter equation at order 2. Zheta plays a role in determining the LC value input process and for analyzing bad harmonic values at multiples of 50Hz (the basic frequency used by the system). From the research results, if the inductance and capacitance are reduced, it can be concluded that the optimum ACL and ACC values are the ACL value is 300 μ H and the ACC value is 300 μ F with the previous switching frequency value of 1000 Hz changed to 3000 Hz. Because with the values above, when simulated, an output graph is obtained that matches what is needed. This can also be seen from the FFT signal, that at a multiple of 3000 there is no significant increase in the graph. It could be said to be an ideal value because the ACPTU value when the THD is 50Hz with load and no load conditions is below 10%.*

Keywords – *SIV, three level inverter, zheta, thd, inductance, capacitance*

Intisari – Penggunaan KRL dan KRDE di daerah Sumatra dan Jawa memudahkan mobilisasi masyarakat dan membantu dalam mengurangi penggunaan transportasi pribadi dan dapat mengurangi tingkat kemacetan, sehingga sistem pendistribusian dan pengendalian daya listrik yang baik pada KRL dan KRDE merupakan salah satu hal penting yang digunakan dalam pengoperasian kereta. Sistem kelistrikan yang digunakan kereta di PT INKA pada saat ini masih berupa SIV dua tingkat yang memiliki kelemahan pada keluarannya berupa gelombang harmonik yang belum sesuai dengan yang dibutuhkan. Oleh karena itu perlu dirancang rangkaian elektrik *inverter* nilai filter LC yang tepat sehingga dapat menghasilkan *total harmonic distortion* (THD) yang sesuai untuk sistem kelistrikan kereta agar sistem dapat berjalan dengan baik dan stabil. Pada penelitian ini akan dilakukan analisis nilai filter LC menggunakan dua parameter yaitu Zheta dan THD. Dari hasil penelitian jika induktansi dan kapasitansi diturunkan, maka nilai optimum ACL adalah 300 μ H dan nilai ACC 300 μ F dengan nilai frekuensi *switching* yang sebelumnya 1.000 Hz diganti menjadi 3.000 Hz, karena saat disimulasikan didapatkan grafik *output* yang sesuai dengan yang dibutuhkan dan sinyal FFT pada kelipatan 3.000 tidak ada peningkatan grafik yang signifikan, sehingga nilai ACPTU pada saat frekuensi 50 Hz, nilai THD dengan keadaan berbeban dan tidak berbeban dibawah 10%.

Kata kunci – *SIV, inverter tiga tingkat, zheta, thd, induktansi, kapasitansi*

I. PENDAHULUAN

Penggunaan Kereta Rel Listrik (KRL) dan Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) di Jabodetabek serta beberapa daerah di Sumatra dan Jawa memudahkan mobilisasi masyarakat dapat membantu dalam mengurangi penggunaan transportasi pribadi sehingga dapat mengurangi tingkat kemacetan. Menurut data dari PT. Kereta Api Indonesia (PT KAI) per Februari 2023, sekitar 77% pengguna jasa layanan KRL Jabodetabek dari PT KAI merupakan pengguna sehari-hari yang berjumlah sekitar delapan juta penumpang dan diperkirakan akan terus meningkat [1]. Oleh karena itu, sangat banyak orang yang memiliki ketergantungan atas kelancaran perjalanan menggunakan KRL maupun KRDE. Dengan demikian, sistem pendistribusian dan pengendalian daya listrik yang baik pada KRL dan KRDE merupakan salah satu hal penting yang digunakan dalam pengoperasian kereta.

Untuk sistem kelistrikan yang digunakan kereta di PT INKA pada saat ini masih *static inverter* (SIV) dua tingkat [2], [3] yang memiliki kelemahan pada keluarannya terdapat gelombang harmonik yang belum sesuai dengan yang dibutuhkan. Oleh karena itu untuk menurunkan gelombang harmonik dirancang *inverter* dengan filter LC yang tepat agar

dapat menghasilkan *total harmonic distortion* (THD) yang sesuai untuk sistem kelistrikan kereta, sehingga sistem dapat berjalan dengan baik dan stabil.

Perancangan rangkaian *inverter* tiga tingkat yang dikombinasikan dengan filter LC dan sistem kontrol loop tertutup ini memiliki tujuan utama untuk mendapatkan THD yang sesuai dengan dibutuhkan dan tidak memiliki permasalahan pada berat atau massa. Integrasi ini penting karena untuk mendapatkan tegangan berkualitas tinggi, sehingga tidak memicu adanya permasalahan lainnya pada sistem kelistrikan kereta, misalnya menurunnya efisiensi sistem kelistrikan kereta disebabkan beratnya beban filter LC. Peningkatan *inverter* dari dua tingkat menjadi tiga tingkat merupakan cara yang dinilai paling tepat untuk mengatasi permasalahan yang sedang terjadi pada sistem kelistrikan kereta [4], nilai filter LC yang tepat dapat menghasilkan gelombang harmonik (THD) yang sesuai untuk sistem kelistrikan kereta sehingga dapat berjalan dengan stabil. [5]

Filter LC dapat mengurangi harmonik tegangan keluaran dan mendapatkan THD sesuai yang diprasyaratkan [6]. Untuk meningkatkan kinerja dan meminimalkan THD, maka,

desain filter dapat dioptimalkan menggunakan model kontrol prediktif (MPC) [7]. Penggunaan filter LCL pada *inverter* tiga level telah terbukti mengurangi harmonisa secara signifikan, mencapai tingkat THD di bawah 5% dalam aplikasi praktis [8][9].

Selain perancangan filter LC dan sistem kontrol loop tertutup pada *inverter* tiga tingkat, juga diamati pengaruh disipasi pada komponen IGBT (*insulated gate bipolar transistor*) [10], [11] yang merupakan jumlah daya yang diubah menjadi energi panas pada saat IGBT bekerja. Hasil disipasi akan dijadikan perbandingan pada rancangan *inverter* dua tingkat dan rangkaian *inverter* tiga tingkat. Rangkaian *inverter* dua tingkat tiga fase yang masih digunakan dalam sistem kelistrikan kereta diketahui jika nilai disipasi IGBT yang dihasilkan masih cukup besar, hal ini dapat menimbulkan gangguan suhu yang cukup tinggi ke lingkungan sekitar menjadi lebih panas dan mengganggu komponen-komponen lainnya.

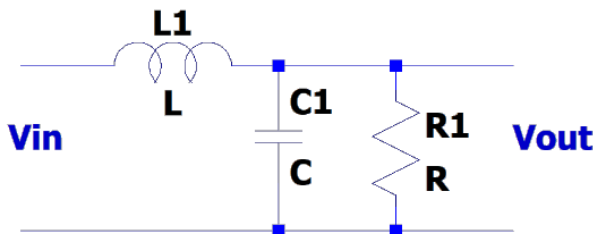
Penggunaan *inverter* tiga tingkat pada rangkaian SIV mendukung pengoperasian KRL dan KRDE di Indonesia terutama saat PT INKA telah dapat memproduksi sistem tersebut secara mandiri [12]. Dengan sistem tersebut, diharapkan pengoperasian kereta dapat tetap berjalan dan dapat mengantarkan penumpang dengan aman dan nyaman sampai tujuan.

II. METODOLOGI

Terdapat dua parameter dalam analisis perbandingan komponen filter L C, yaitu parameter Zheta dan THD. THD adalah nilai persentase antara besaran harmonik berbanding dengan besaran fundamental [13], [14]. THD adalah suatu cara kuantifikasi besarnya distorsi harmonik terhadap sistem distribusi yang dapat dinyatakan dengan (1):

$$THD = \frac{\Sigma V_{harmoni k}}{\Sigma V_{fundamental}} \quad (1)$$

Zheta merupakan sebuah parameter yang didapatkan dari turunan persamaan filter LC pada orde dua dengan rangkaian seperti pada Gambar 1. Sistematika filter LC seperti Gambar 1, dapat diselesaikan dengan (2), (3), (4)



Gambar 1. Rangkaian filter LC

$$Z_0 = \frac{X_C}{R}; X_C = \frac{1}{S_C} \quad (2)$$

$$Z_{tot} = Z_0 + X_C = Z_0 + S_C = \frac{R}{SRC + 1} + S_C \frac{(SRC + 1)}{SRC + 1}$$

$$Z_0 = \frac{X_C \times R}{X_C + R} = \frac{1/S_C \times R}{1/S_C + R} = \frac{R/S_C}{1/S_C + R} \times \frac{S_C}{S_C} = \frac{R}{SRC + 1} \quad (3)$$

$$Z_{tot} = \frac{R + S_C(SRC + 1)}{SRC + 1}$$

$$Z_{tot} = \frac{R + S^2 LRC + S_C}{SRC + 1}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Z_0}{Z_{tot}} = \frac{\frac{R}{SRC + 1}}{\frac{R + S^2 LRC + S_C}{SRC + 1}} = \frac{R}{S^2 LRC + S_C + R}$$

$$= \frac{1}{S^2 LC + \frac{SL}{R} + 1} \times \frac{\frac{1}{LC}}{\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

$$\frac{Z_0}{Z_{tot}} = \frac{\frac{1}{LC}}{S^2 + S \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}}$$

Persamaan filter LC orde 2 dituliskan pada (5):

$$G(s) = \frac{\omega n^2}{s^2 + 2\zeta \omega n s + \omega n^2} \approx \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + S \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (5)$$

dengan diketahui bahwa $\omega n^2 = \frac{1}{LC}$, $\omega n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ maka jika diambil nilai Zheta akan didapatkan (6), (7):

$$2\zeta \omega n = \frac{1}{RC}$$

$$2\zeta = \frac{1}{RC \omega n} = \frac{1}{RC \frac{1}{\sqrt{LC}}} = \frac{\sqrt{LC}}{RC} = \frac{\sqrt{C}\sqrt{L}}{R\sqrt{C}\sqrt{C}} \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7)$$

Simbol ζ di sini berperan dalam menentukan saat proses *input* nilai L dan C. Dari (7) dapat diketahui bahwa nilai Zheta sebanding dengan L dan berbanding terbalik dengan C. Nilai Zheta dapat juga digunakan untuk analisis nilai harmonik yang buruk pada frekuensi kelipatan 50 Hz yang merupakan frekuensi dasar yang digunakan sistem.

Sistem kontrol *inverter* terdiri dari kontrol loop tertutup dan transformasi ABC to DQ. Transformasi ABC ke DQ merupakan kombinasi dari transformasi Clark (ABC ke $\alpha\beta$) dan transformasi Park ($\alpha\beta$ ke DQ). Transformasi Clarke (ABC ke $\alpha\beta$) merupakan transformasi yang mengubah tegangan maupun arus tiga fase menjadi tegangan atau arus dua fase ($\alpha\beta$) dalam sistem koordinat stasioner. Transformasi Clarke adalah transformasi yang mengubah tegangan maupun arus dua fase ($\alpha\beta$) pada sistem koordinat stasioner menjadi dua fase (DQ) menjadi sistem koordinat yang berputar sinkron. Untuk persamaan matriks transformasi sumbu ABC to DQ pada (8) dan (9).

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{pmatrix} \quad (9)$$

Keluaran SIV memiliki keluaran gelombang sinus 3 fase, maka dibutuhkan sesuatu untuk mendiamkan gelombang tersebut. Proses transformasi ABC to DQ ini dapat mengendalikan gelombang AC yang bergerak menggunakan gelombang DC yang diam.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

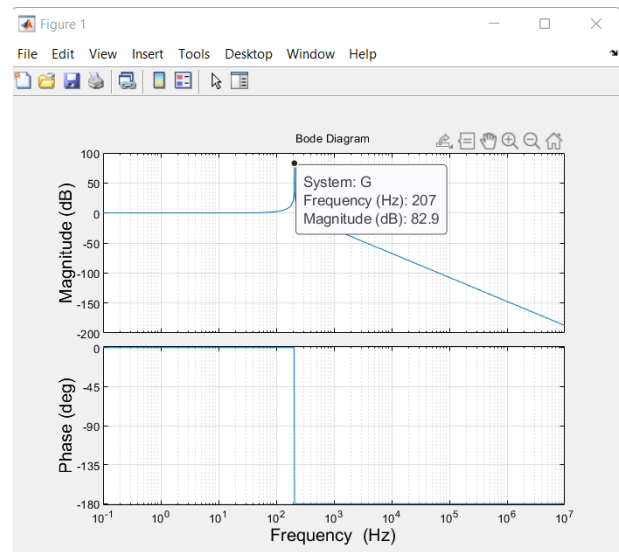
Dalam percobaan yang dilakukan, terdapat empat macam kondisi filter LC yang terdiri dari kondisi normal yaitu kondisi filter LC terpasang, kemudian kondisi penurunan nilai L dari nilai kondisi normal, penurunan nilai C dari nilai kondisi normal, dan penurunan kedua nilai komponen LC.

Setiap kondisi memiliki dua perbedaan yaitu tanpa beban dan dengan beban. Beban yang dimaksudkan adalah nilai dari resistor beban yang memberikan efek redaman dari gelombang yang akan dihasilkan dengan harapan mampu meredam gain yang muncul pada gelombang *output* filter LC. Berikut merupakan kondisi serta analisis yang telah dilakukan:

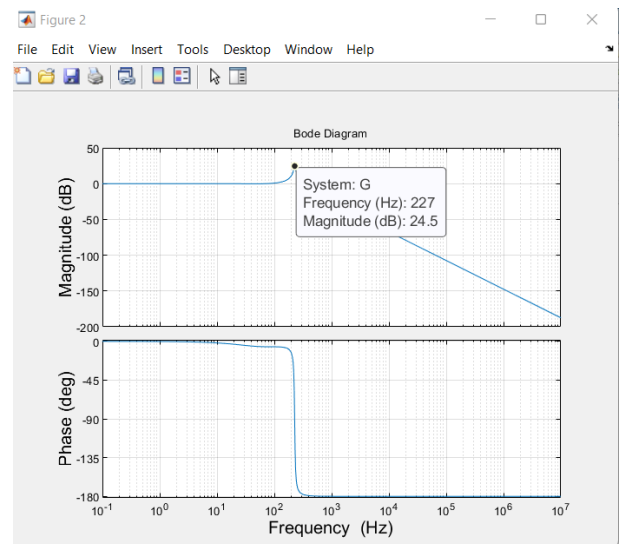
A. Kondisi Normal

Inverter tiga tingkat dengan filter LC, yang terdiri dari induktor (L) 600 μ H dan kapasitor (C) 1.080 μ F, memiliki karakteristik yang berbeda dalam keadaan tidak berbeban dan berbeban. Ketika *inverter* tiga tingkat tidak memiliki beban yang terhubung, karakteristik filter LC akan dominan. Filter LC bertujuan untuk meredam harmonisa yang mungkin dihasilkan oleh *inverter* tiga tingkat. Grafik tanggapan respons dari sitem dala kondisi tak berbeban dan berbeban disajikan dalam Gambar 2 dan Gambar 3. Magnitudo diplot dalam desibel (dB) sedangkan fase diplot dalam derajat ($^\circ$). Untuk kedua plot, sumbu horizontal adalah frekuensi (f) atau frekuensi sudut (ω), masing-masing diukur dalam Hz atau rad/s. Sumbu horizontal dalam skala logaritmik (yaitu meningkat dengan faktor 10).

Pada Gambar 2 ketika kondisi tidak berbeban, nilai fase stabil sampai pada frekuensi *cut off* dari filter LC, dan menurun secara tajam diatas frekuensi *cut off*nya, tetapi ketika dalam kondisi berbeban, maka ketika frekuensi dinaikkan mendekati frekuensi *cut off*, maka fasenya cenderung menurun, dan akan menurun tajam diatas frekuensi *cut off* seperti terlihat pada Gambar 3. Sehingga terlihat perbedaan kondisi tanpa beban dan berbeban pada fiter LC yang dipasang.



Gambar 2. Hasil bode diagram kondisi normal saat tidak berbeban

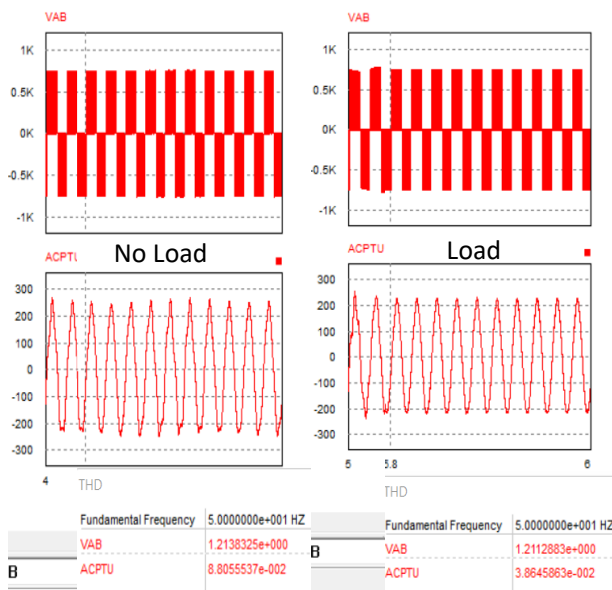


Gambar 3. Hasil bode diagram kondisi normal saat berbeban

Workspace		Workspace	
Name ^	Value	Name ^	Value
frek	206.5033	frek	206.5033
zheta	3.5681e-05	zheta	0.3398

Gambar 4. Hasil Zheta kondisi normal saat tidak berbeban dan berbeban

Nilai Zheta menurut Persamaan (7) digunakan untuk analisis nilai harmonik pada frekuensi kelipatan dasar dari 50 Hz yang nilainya sebanding dengan L dan berbanding terbalik dengan C, maka dari Gambar 4 diketahui bahwa kondisi berbeban nilai harmoniknya semakin bertambah besar dari kondisi tanpa beban.



Gambar 5. Hasil output VAB dan ACPTU beserta nilai THD saat tidak berbeban dan berbeban

Gelombang VAB seperti pada Gambar 5 merupakan keluaran inverter, sedangkan gelombang VBC, dan VCA pada inverter sama dengan VAB hanya memiliki beda fase 120° . Pada Gambar 5 juga disajikan perbandingan THD dan ACPTU dalam kondisi tidak berbeban dan berbeban. Dalam keadaan tidak berbeban maka Induktor (L) dengan nilai 600 μH akan menyediakan impedansi yang relatif tinggi terhadap frekuensi-frekuensi tinggi. Hal ini mengakibatkan filter LC memberikan penyaringan yang baik terhadap harmonisa tinggi yang dihasilkan oleh *switching inverter*. Kapasitor (C) 1.080 μF akan bekerja sebagai penyaring untuk tegangan DC yang mungkin ada pada *output inverter*. Kapasitor ini membantu mempertahankan tegangan rata-rata pada tingkat yang diinginkan dan meredam fluktuasi tegangan DC yang mungkin terjadi.

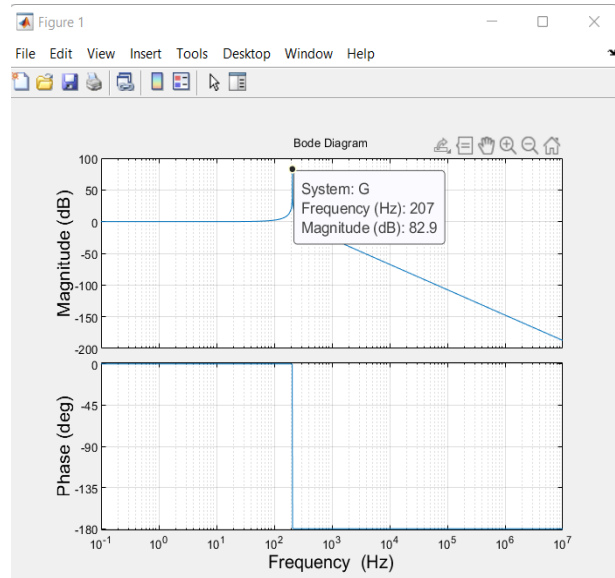
Ketika *inverter* tiga tingkat memiliki beban yang terhubung, karakteristik sirkuit akan berubah maka Induktor (L) 600 μH akan tetap berfungsi sebagai bagian dari filter LC, namun reaktansinya akan mempengaruhi arus yang mengalir ke beban. Induktor akan membantu menyediakan arus yang lebih stabil dan mengurangi lonjakan arus saat beban beralih. Kapasitor (C) 1.080 μF akan tetap berfungsi untuk menyaring tegangan DC dan mengompensasi fluktuasi tegangan yang mungkin terjadi akibat perubahan beban.

B. Kondisi Saat Induktansi Diturunkan

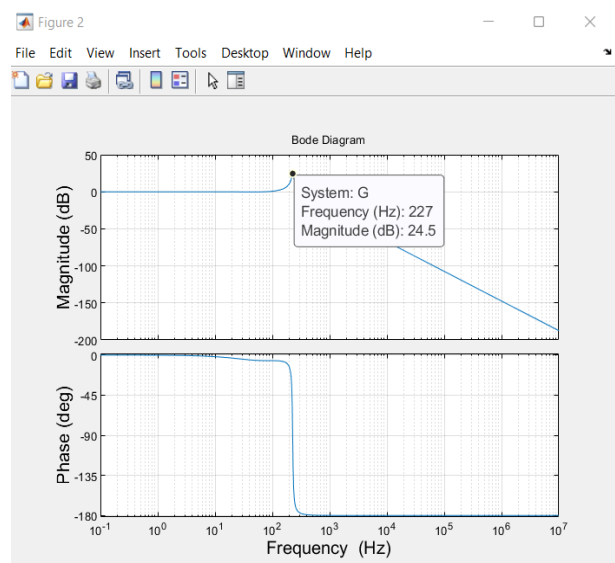
Hasil simulasi dengan nilai $L = 550 \mu\text{H}$ dan $C = 1.080 \mu\text{F}$ dalam bentuk grafik frekuensi respon dari sistem disajikan dalam Gambar 6 ketika kondisi tidak berbeban, nilai fase stabil sampai pada frekuensi cut off dari filter LC, dan menurun secara tajam diatas frekuensi cut offnya, tetapi ketika dalam kondisi berbeban, maka ketika frekuensi dinaikkan mendekati frekuensi *cut off*, maka fasenya cenderung menurun, dan akan menurun tajam diatas frekuensi cut off seperti terlihat pada Gambar 7. Sehingga terlihat

perbedaan kondisi tanpa beban dan berbeban pada filter LC yang dipasang.

Nilai Zheta yang dihasilkan ketika nilai induktans diturunkan sesuai (7) diperoleh seperti pada Gambar 8 di mana kondisi berbeban nilai harmoniknya semakin bertambah besar dibandingkan dengan ketika kondisi tanpa beban.



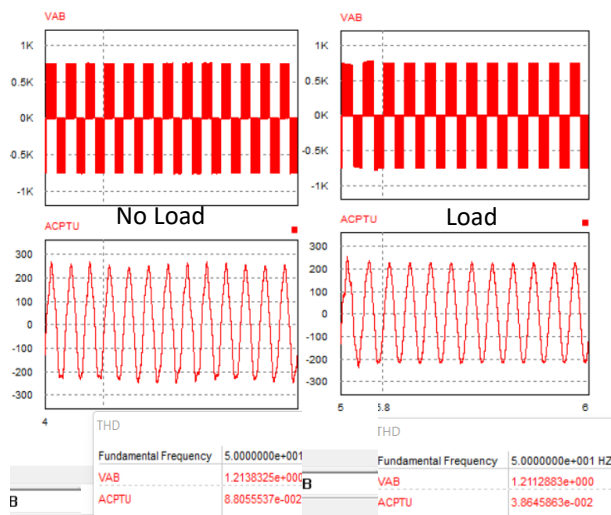
Gambar 6. Hasil bode diagram kondisi normal saat tidak berbeban.



Gambar 7. Hasil bode diagram kondisi normal saat berbeban.

Workspace		Workspace	
Name	Value	Name	Value
frek	206.5033	frek	206.5033
zheta	3.5681e-05	zheta	0.3398

Gambar 8. Hasil Zheta kondisi saat tidak berbeban dan berbeban



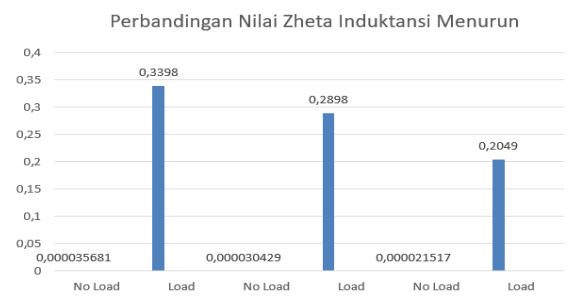
Gambar 9. Hasil output VAB dan ACPTU beserta nilai THD saat tidak berbeban dan berbeban

Pada Gambar 9 ditunjukkan bentuk gelombang keluaran inverter posisi VAB. Selain itu juga disajikan perbandingan THD dan ACPTU dalam kondisi tidak berbeban dan berbeban. Dalam keadaan tidak berbeban, maka induktor (L) 550 μH akan menghasilkan impedansi yang tinggi pada frekuensi tinggi. Hal ini mengakibatkan filter LC memberikan penyaringan yang baik terhadap harmonisa tinggi yang dihasilkan oleh *switching inverter*. Kapasitor (C) 1.080 μF akan bekerja sebagai penyaring untuk tegangan DC pada output inverter, sehingga membantu mempertahankan tegangan rata-rata pada tingkat yang diinginkan dan meredam fluktuasi tegangan DC. Hasil pengujian ketika nilai induktansi (L) pada filter LC diturunkan disajikan pada Tabel 1.

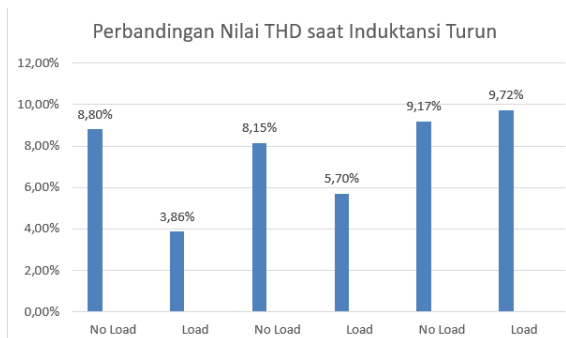
Tabel 1. Kondisi saat nilai induktansi diturunkan

L (μH)	Kondisi	f (Hz)	MATLAB		PSIM THD ACPTU (%)
			Mag (dB)	Zheta	
600	NO	242	84,3	3,04e-05	8,00
	LOAD	260	28,3	0,289	5,73
550	NO	342	87,3	2,15e-05	9,17
	LOAD	345	64,2	0,2049	9,72

Dari Tabel 1 diketahui bahwa nilai zheta mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya nilai induktansi, menunjukkan bahwa zheta berbanding lurus dengan induktansi, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan $\zeta = 1/2R\sqrt{L/C}$. Selain itu, nilai THD cenderung meningkat ketika nilai induktansi menurun. Hal ini disebabkan oleh penurunan impedansi filter pada frekuensi-frekuensi tinggi (frekuensi harmonik) akibat berkurangnya induktansi, sehingga sinyal harmonik lebih mudah lolos melalui filter dan bercampur dengan sinyal fundamental, yang pada akhirnya menyebabkan kenaikan nilai THD.



Gambar 10. Perbandingan nilai Zheta induktansi turun



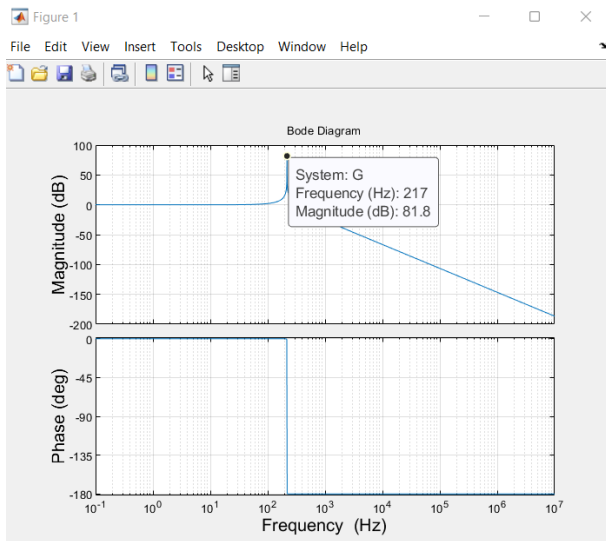
Gambar 11. Perbandingan nilai THD induktansi turun

Dari Gambar 10 dapat diketahui bahwa nilai Zheta akan semakin turun seiring dengan turunnya nilai induktansi, hal ini membuktikan bahwa nilai Zheta sebanding dengan nilai induktansi, sesuai dengan Persamaan (7). Selanjutnya dari Gambar 11 diketahui nilai THD dengan *No Load* biasanya lebih besar dibanding dengan yang *Load* apabila penurunan nilai induktansi terjadi secara signifikan (sedikit-sedikit). Tapi ada juga keadaan yang menyebabkan nilai THD pada *Load* lebih besar dibanding dengan yang *No Load* (hal ini biasanya terjadi jika nilai induktansi menurun drastis mendekati nilai 0). Hal ini dapat terjadi karena dengan menurunnya nilai induktansi maka impedansi filter pada frekuensi-frekuensi tinggi (frekuensi harmonik) juga akan menurun. Ini memungkinkan sinyal harmonik untuk lebih mudah melewati filter dan dicampurkan dengan sinyal fundamental, sehingga mempengaruhi nilai THD.

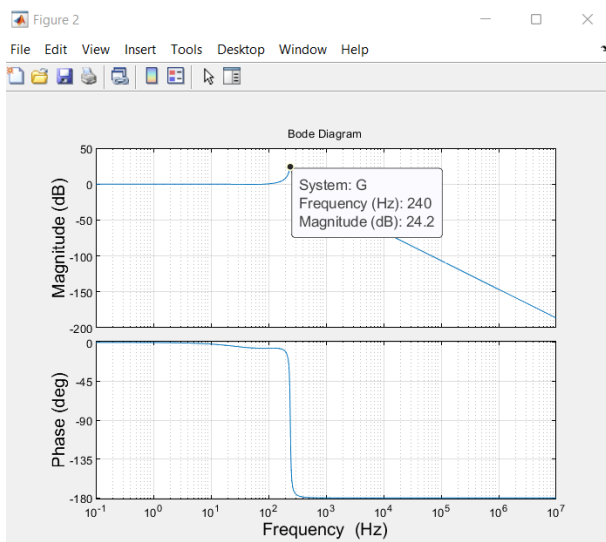
C. Kondisi Saat Kapasitans Diturunkan

Hasil Simulasi dengan nilai L= 600 μH dan C = 900 μF . Jika nilai Zheta dengan beban dan tanpa beban akan semakin tinggi seiring dengan turunnya nilai kapasitans, hal ini membuktikan bahwa nilai Zheta berbanding terbalik dengan nilai kapasitans, di mana sesuai dengan (7).

Nilai THD akan semakin meningkat seiring dengan menurunnya nilai kapasitans yang digunakan oleh rangkaian. Hal ini dapat terjadi karena dengan menurunnya nilai kapasitans maka impedansi filter pada frekuensi-frekuensi tinggi (frekuensi harmonik) juga akan menurun. Hal ini memungkinkan sinyal harmonik untuk lebih mudah melewati filter dan dicampurkan dengan sinyal fundamental, sehingga mempengaruhi nilai THD.



Gambar 12. Hasil bode diagram kondisi normal saat tidak berbeban.



Gambar 13. Hasil bode diagram kondisi normal saat berbeban.

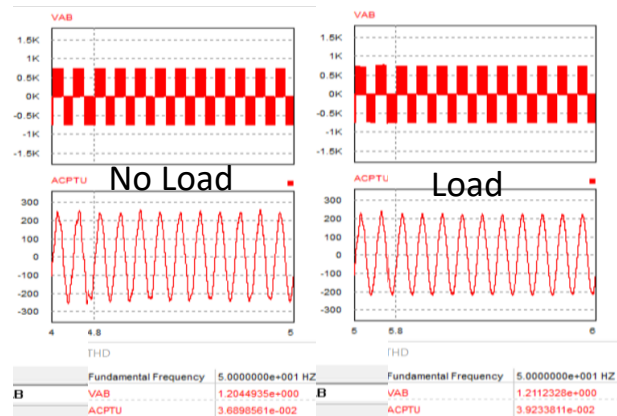
Pada Gambar 12 nilai fase stabil sampai pada frekuensi *cut off* dari filter LC, dan menurun secara tajam diatas frekuensi *cut off*nya, tetapi dalam kondisi berbeban ketika frekuensi dinaikkan mendekati frekuensi *cut off*, maka fasenya cenderung menurun, dan akan menurun tajam diatas frekuensi *cut off* seperti terlihat pada Gambar 13.

Workspace		Workspace	
Name ▲	Value	Name ▲	Value
frek	216.5824	frek	216.5824
zheta	4.0825e-05	zheta	0.3887

Gambar 14. Hasil Zheta kondisi saat tidak berbeban dan berbeban

Nilai Zheta menurut (7) diketahui bahwa kondisi berbeban nilai harmoniknya semakin bertambah besar dari kondisi tanpa beban seperti pada Gambar 14. Gelombang VAB seperti pada Gambar 15 merupakan keluaran inverter,

sedangkan gelombang VBC, dan VCA pada inverter sama dengan VAB hanya memiliki beda fase 120°. Pada Gambar 15 juga disajikan perbandingan THD dan ACPTU tidak berbeban dan berbeban.



Gambar 15. Hasil output VAB dan ACPTU beserta nilai THD saat tidak berbeban dan berbeban

Hasil pengujian ketika nilai kapasitans (C) pada filter LC diturunkan disajikan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 diketahui bahwa nilai zheta mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya nilai kapasitans, menunjukkan bahwa zheta berbanding terbalik dengan kapasitans, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan $\zeta = 1/2R\sqrt{L/C}$. Selain itu, nilai THD cenderung meningkat ketika nilai kapasitans menurun. Hal ini disebabkan oleh kenaikan impedansi filter pada frekuensi tinggi (frekuensi harmonik) akibat berkurangnya kapasitans, sehingga sinyal harmonik lebih mudah lolos melalui filter dan bercampur dengan sinyal fundamental, yang pada akhirnya menyebabkan kenaikan nilai THD.

Tabel 2. Kondisi saat nilai kapasitans diturunkan

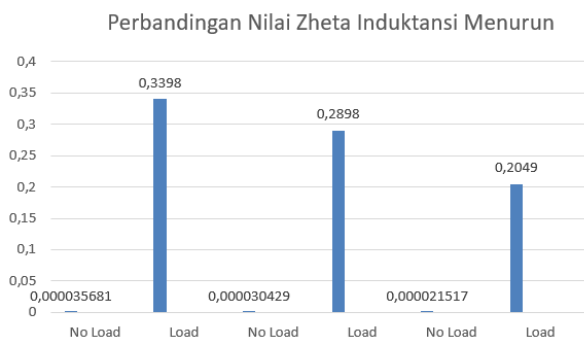
C (μF)	Kondisi	f (Hz)	MATLAB		PSIM THD ACPTU (%)
			Mag (dB)	Zheta	
1080	NO	237	81	4,47e-05	6,00
	LOAD	263	24,9	0,4258	4,73
900	NO	265	80	5e-05	8,76
	LOAD	294	25,7	0,4761	14,00

Dari Gambar 16 dapat diketahui bahwa nilai Zheta akan semakin naik seiring dengan turunnya nilai kapasitans, hal ini membuktikan bahwa nilai Zheta berbanding terbalik dengan nilai kapasitans yang sesuai dengan (7). Selanjutnya dari Gambar 17 diketahui nilai THD dengan *No Load* lebih besar dibanding dengan yang *Load* apabila penurunan nilai kapasitans terjadi secara signifikan.

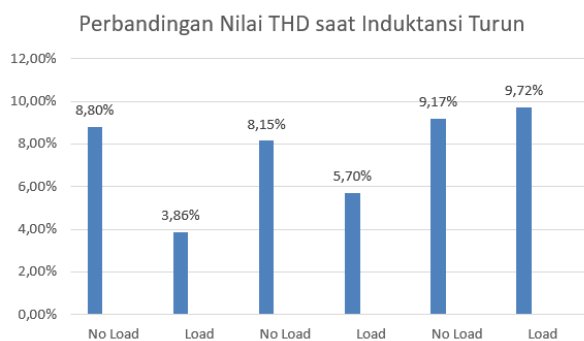
D. Kondisi Saat Induktansi dan Kapasitor Diturunkan

Hasil simulasi dengan nilai L= 300 μH dan C = 300 μF dalam bentuk grafik frekuensi respon dari sistem disajikan dalam Gambar 18 dan Gambar 19. Pada Gambar 18 ketika

kondisi tidak berbeban, nilai fase stabil sampai pada frekuensi *cut off* dari filter LC, dan menurun secara tajam di atas frekuensi *cut off*-nya, tetapi ketika dalam kondisi berbeban, maka ketika frekuensi dinaikkan mendekati frekuensi *cut off*, maka fasenya cenderung menurun, dan akan menurun tajam di atas frekuensi *cut off* seperti terlihat pada Gambar 19. Sehingga terlihat perbedaan kondisi tanpa beban dan berbeban pada filter LC yang dipasang.



Gambar 16. Perbandingan nilai Zheta Induktansi Turun

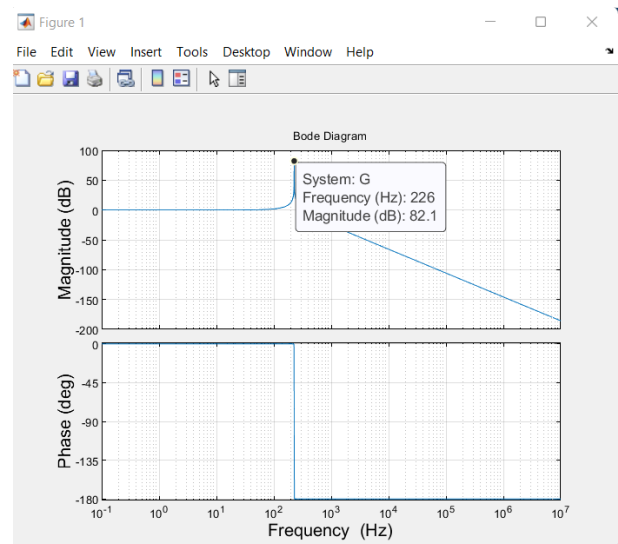


Gambar 17. Perbandingan nilai THD induktansi turun

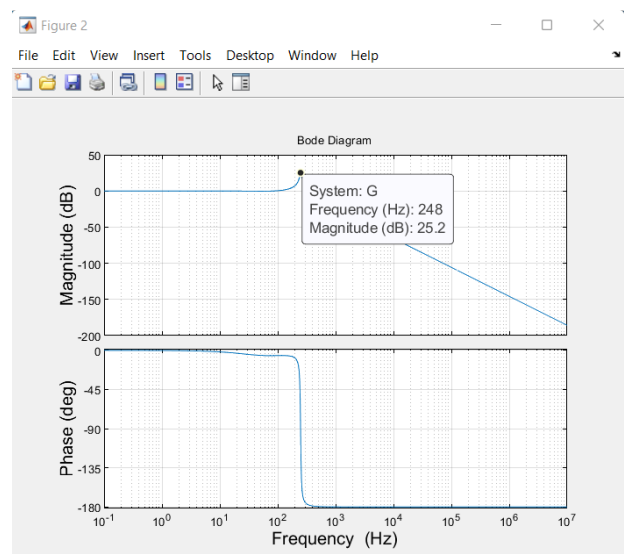
Pada Gambar 20, nilai Zheta sesuai (7) diketahui bahwa kondisi berbeban nilai harmoniknya semakin bertambah besar dari kondisi tanpa beban. Gelombang VAB seperti pada Gambar 21 merupakan keluaran *inverter*, sedangkan gelombang VBC, dan VCA pada *inverter* sama dengan VAB hanya memiliki beda fase 120°.

Pada Gambar 21 juga disajikan perbandingan THD dan ACPTU tidak berbeban dan berbeban. Hasil pengujian ketika nilai kapasitans dan induktans diturunkan disajikan pada Tabel 3. Dari Tabel 3 diketahui bahwa nilai zheta mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya nilai induktansi dan kapasitans, hal ini menunjukkan bahwa zheta berbanding lurus dengan induktansi dan berbanding terbalik dengan kapasitans. Selain itu, nilai THD cenderung meningkat ketika nilai induktansi dan kapasitans menurun. Hal ini disebabkan oleh penurunan impedansi filter pada frekuensi tinggi (frekuensi harmonik) sehingga sinyal harmonik lebih mudah lolos melalui filter dan bercampur dengan sinyal fundamental, yang pada akhirnya menyebabkan kenaikan nilai THD.

Dari Gambar 22 diketahui bahwa tinggi rendahnya nilai Zheta apabila kedua komponen diturunkan adalah dengan cara membagi nilai induktansi dengan kapasitans sesuai dengan persamaan, dengan begitu nilai Zheta akan sebanding dengan hasil bagi antara induktansi dengan kapasitans, sesuai dengan (7).



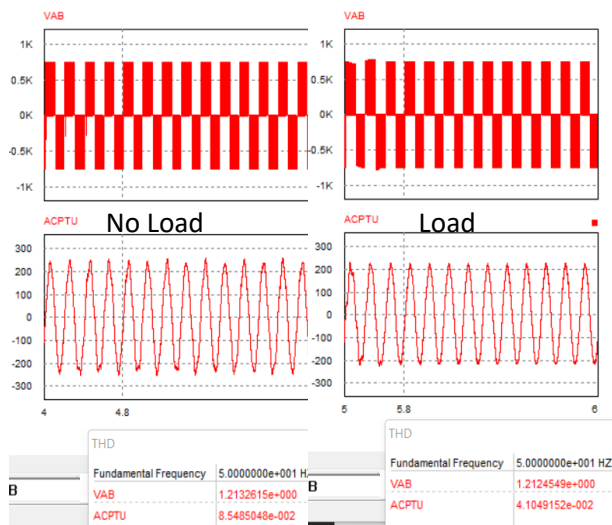
Gambar 18. Hasil bode diagram kondisi normal saat tidak berbeban



Gambar 19. Hasil bode diagram kondisi normal saat berbeban

Workspace		Workspace	
Name ▲	Value	Name ▲	Value
frek	226.2130	frek	226.2130
zheta	3.9087e-05	zheta	0.3722

Gambar 20. Hasil Zheta kondisi saat tidak berbeban dan berbeban

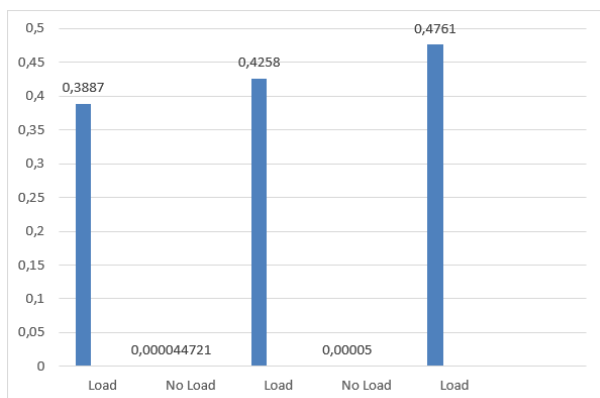


Gambar 21. Hasil output VAB dan ACPTU beserta nilai THD saat tidak berbeban dan berbeban

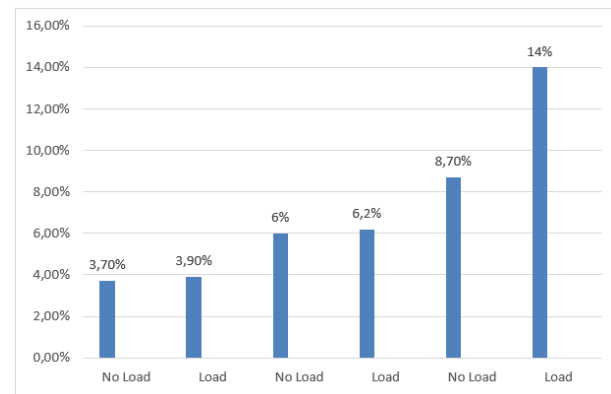
Selanjutnya adalah nilai THD dengan *No Load* biasanya lebih besar dibanding dengan yang *Load* apabila penurunan nilai induktansi terjadi secara signifikan (sedikit-sedikit) seperti pada Gambar 23. Tapi ada juga keadaan yang menyebabkan nilai THD pada *Load* lebih besar dibanding dengan yang *No Load* (hal ini biasanya terjadi jika nilai induktansi menurun drastis mendekati nilai 0).

Tabel 3. Kondisi saat induktansi dan kapasitor diturunkan

L (μH) dan C (μF)	Kondisi	F (Hz)	MATLAB Mag (dB)	ZHETA	PSIM THD ACPTU (%)
L=600 C=1080	NO	291	80,8	4,56e-05	19,00
	LOAD	317	27,9	0,4346	9,80
L=300 C=300	NO	531	80	5e-05	29,00
	LOAD	561	37,1	0,4761	30,00



Gambar 22. Perbandingan nilai Zheta ketika L dan C turun



Gambar 23. Perbandingan nilai THD ketika L dan C turun

IV. SIMPULAN

Dari simulasi yang telah dilakukan, didapatkan nilai optimum dari ACL 300 μ H dan ACC 300 μ F dengan frekuensi *switching* 1.000 Hz diganti menjadi 3.000, karena dapat dilihat dari FFT gelombang harmonik pada kelipatan 3.000 tidak ada peningkatan yang signifikan. Selain itu, nilai ACPTU pada saat THD bernilai 50 Hz ketika tidak berbeban nilai THD nya 7,5 % dan kondisi ketika berbeban nilai THD nya adalah 1,4 %, keduanya di bawah 10 %.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa syukur dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT Industri Kereta Api (INKA) Madiun yang telah memberikan kesempatan, dukungan, dan fasilitas dalam penelitian ini terutama pada divisi Sistem Komponen Tier 1 dan 2.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Saidah, "Kualitas pelayanan *Commuter Line*" *J. Manaj. Transp. Logistik (JMTRANSLOG)*, vol. 4, no. 1, pp. 51–58, 2017.
- [2] P. Ray and K. R. Satyajit, "A novel approach towards static inverter circuit design," *PIICON 2020 - 9th IEEE Power India Int. Conf.*, pp. 5–8, 2020, doi: 10.1109/PIICON49524.2020.9112889.
- [3] A. Andang, T. A. Pamungkas, N. Busaeri, R. S. Hartati, I. B. G. Manuaba, and I. N. S. Kumara, "Three-phase Four-leg Inverter LC Filter Using FCS MPC," *ICSGTEIS 2021 - 2021 Int. Conf. Smart-Green Technol. Electr. Inf. Syst. Adv. Smart Green Technol. Towar. Soc. 5.0, Proc.*, no. October, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1109/ICSGTEIS53426.2021.9650376.
- [4] N. Fadhillah, "Implementasi sistem kendali dengan metode sinusoidal pulse width modulation (SPWM) pada inverter 3 level 3 phase untuk static inverter (SIV)," Proyek Akhir, Universitas Gadjah Mada, 2020.
- [5] S. Ridha, "Perancangan rangkaian three level inverter untuk sistem static inverter (SIV) pada kereta rel diesel elektrik (KRDE)," Proyek Akhir, Universitas Kristen Duta Wacana, 2020. [Online]. Available: <https://katalog.ukdw.ac.id/6167/>
- [6] F. Herrera, A. Mora, R. Cárdenas, M. Díaz, J. Rodríguez, and M. Rivera, "An optimal switching sequence model predictive control scheme for the 3L-NPC converter with output LC filter," *Processes*, vol. 12, no. 2, p. 348, 2024, doi: 10.3390/pr12020348.
- [7] Y. Yang, Y. Xiao, M. Fan, K. Wang, X. Zhang, and J. Hu, "A novel continuous control set model predictive control for LC-filtered three-phase four-wire three-level voltage-source inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 38, no. 4, pp. 4572–4584, Apr. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3233995.

-
- [8] Y. H. Yeoh, T. J. Liang, K. H. Chen, W. C. Chen, Y. F. Chen, and G. T. Peng, "Design and implementation of three-phase three-level T-type inverter with grid-following control," *2023 IEEE Int. Future Energy Electron. Conf. (IFEEC)*, Sydney, Australia, 2023, pp. 473–477, doi: 10.1109/IFEEC58486.2023.10458660.
- [9] Z. X. Xiao, G. X. Zheng, H. F. Xue, J. J. Xiong, W. L. Liu, and J. Gao, "Design and development of three-level inverter," *2023 Int. Conf. Power Syst. Technol. (PowerCon)*, Jinan, China, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/PowerCon58120.2023.10330920..
- [10] J. Zhang, X. Du and S. Zheng, "Condition Monitoring of IGBT Module and Forced Air Cooling System Using Time Constants of Heat Sink Temperature Cooling Curve," *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, New Orleans, LA, USA, 2020, pp. 2554–2558, doi: 10.1109/APEC39645.2020.9124134.
- [11] Y. Wen and L. Ruan, "Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Fully-immersed Evaporative Cooling IGBT," *2022 Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2022*, pp. 1–4, 2022, doi: 10.1109/ICEMS56177.2022.9982874.
- [12] S. D. Ratrey, A. Hota, V. Sonti, and S. Jain, "A New Three-Phase Three-Level Inverter Obtained From Two-Level Inverter By Considering the Effect of Device Junction Capacitance Across the Switch," *2023 IEEE 3rd Int. Conf. Sustain. Energy Futur. Electr. Transp. SeFet 2023*, pp. 1–5, 2023, doi: 10.1109/SeFeT57834.2023.10245984.
- [13] J. Li, H. Dong, P. Yang, Y. Shi, and J. Liu, "Research on the Service Life of High-Voltage Vacuum Circuit Breaker of High-speed Train," *Proc. 2021 IEEE 4th Int. Electr. Energy Conf. CIEEC 2021*, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510823.
- [14] A. P. Andrienko, A. A. Andrienko, L. Zhorniak, O. Maksymovych, and V. Sichenko, "An Electric Drive Traction Transmission of Diesel Train Based on The Induction Motor with A Phase Rotor," *Proc. 5th Int. Conf. Mod. Electr. Energy Syst. MEES 2023*, pp. 1–5, 2023, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402534.
-