

Analisis Karakteristik Harmonisa Pada Sistem Elektrikal Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Tambak Lorok Blok 2

Meilinda Estevani Hutagalung¹, I Made Wiwit Kastawan², Apip Pudin³

¹²³Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, 40012

¹Email : meilinda.estevani.tptl19@polban.ac.id, wiwit.kastawan@polban.ac.id, apip.pudin@polban.ac.id

ABSTRAK

Beban non-linier secara masif digunakan pada berbagai industri termasuk pembangkit tenaga listrik. Penggunaan beban non-linier banyak digunakan karena memiliki efisiensi energi yang tinggi, namun dampak lainnya timbulnya harmonisa pada sisi sumber sistem kelistrikan. Perusahaan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Tambak Lorok blok 2 menggunakan konverter AC/DC tiga fasa gelombang penuh untuk sistem DC power sebagai sumber daya utama pada peralatan DC pembangkit. Dikarenakan permintaan suplai daya DC yang tinggi, sehingga diperlukan pengoperasian konverter AC/DC tiga fasa gelombang penuh dengan kapasitas yang besar. Harmonisa yang ditimbulkan memiliki karakteristik yang berbeda-beda tergantung dari jenis beban non-linier yang digunakan. Maka dari itu, diperlukan kajian pemodelan sistem elektrikal dan beban-beban non-linier untuk mengetahui karakteristik dan nilai harmonisa pada sistem elektrikal pembangkit tersebut. Hasil pendekatan ekivalen menunjukkan bahwa penggunaan konverter tersebut membangkitkan harmonisa arus pada sisi sumber dengan orde ganjil. Pendekatan ekivalen sistem elektrikal dengan simulasi *Mallab* didapatkan THD_i pada busbar 400V Essential Service PDC 4 sebagai titik sambung bersama sebesar 16,65%, sedangkan melalui simulasi *Psim* didapatkan THD_i sebesar 21,47%. Lalu, THD_i pada busbar 400V Auxilliary Power Panel 11B berdasarkan *Matlab* sebesar 41,25% dan 42,23%. Hasil simulasi ini melewati persentase standar harmonisa yang diizinkan oleh IEEE 519 - 1992. Harmonisa ini dapat berdampak negatif seperti pembebanan lebih pada motor-motor induksi, kabel dan transformator sehingga temperatur berlebih pada alat dan penurunan *life time*.

Kata Kunci : Harmonisa, beban non-linear, Konverter AC/DC, IEEE 519-1992, THD.

1. PENDAHULUAN

PT. Indonesia Power Semarang *PGU* merupakan perusahaan yang bergerak dalam bidang pembangkitan tenaga listrik. Salah satu unit perusahaan tersebut yaitu PLTGU Tambak Lorok blok 2, merupakan pembangkit siklus kombinasi yang menjadi unit utama berkapasitas 517 MW yang dioperasikan oleh perusahaan tersebut. Dalam pengoperasiannya, pembangkit ini membutuhkan suplai daya DC untuk peralatan peralatan DC seperti motor DC, panel instrumentasi dan kontrol, kendali pada *breaker* GIS, dan penerangan. Maka, digunakan sistem DC Power dengan pengoperasian converter AC/DC tiga fasa *fullbridge* berkapasitas daya besar untuk mensuplai daya DC yang digunakan untuk menjalankan peralatan-peralatan DC.

Konverter AC/DC tiga fasa *fullbridge* merupakan beban non-linier yang membangkitkan distorsi pada gelombang arus dan tegangan di sisi sumber akibat efek penyaklaran semikonduktor. Pengaruh penyaklaran semikonduktor membangkitkan harmonisa dalam sistem utilitas listrik pembangkit. Keberadaan harmonisa pada sistem elektrikal industri pembangkit dapat menurunkan keandalan peralatan listrik dan menyebabkan kerusakan (Sjaferial, 2015). Pemakaian beban non-linear dengan kapasitas yang besar memicu terbangkitkannya harmonisa dengan nilai arus yang besar pula sehingga memengaruhi peralatan-peralatan linier yang terhubung dengan busbar sebagai titik sambung bersama (*Point of Common Coupling*) converter. Hal ini seperti yang diteliti oleh Abdelaziz (2012) bahwa penggunaan penyearah tiga fasa dengan enam pulsa menghasilkan THD_i yang tinggi sebesar 25-40% dari fundamentalnya.

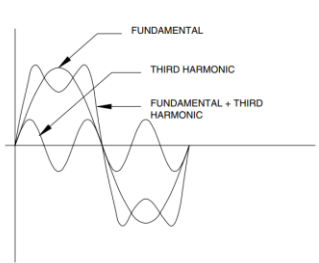
Menjaga kualitas daya tetap baik merupakan hal krusial dalam keandalan sistem tenaga listrik. Hal ini karena sistem kelistrikan harus mampu memberikan suplai yang dapat mendukung pengoperasian beban – beban dengan andal dan efisien, baik dari sisi peralatan listrik yang dipakai oleh pembangkit itu sendiri maupun pada peralatan – peralatan konsumen tenaga listrik. Menurut Roger C. Dugan (2004), kualitas daya listrik merupakan konsep yang merepresentasikan tentang baik atau buruknya mutu daya listrik dalam sistem kelistrikan akibat terjadinya beberapa jenis gangguan. Kini kualitas daya listrik yang dibangkitkan menjadi perhatian seiring meningkatnya pemakaian energi listrik dan utilitas kelistrikan untuk menghindari gangguan-gangguan jangka pendek maupun jangka panjang pada peralatan kelistrikan.

Pengkajian harmonisa dalam sistem elektrikal pembangkit ini untuk mengetahui seberapa besar kandungan harmonisa pada sisi sumber sebagai akibat dari penyaklaran converter AC/DC pada sistem DC Power. Harmonisa yang nilainya melewati batas kewajaran berdampak pada sistem kelistrikan dan menimbulkan berbagai masalah pada peralatan lainnya (Suryo, 2016). Jika hal ini diabaikan dapat menimbulkan kerugian teknis dan kerugian finansial bagi perusahaan. Pada penelitian ini, dilakukan pendekatan ekivalen dan analisis menggunakan software ETAP 12.06.1, *Matlab Simulink* dan *Psim* untuk melihat keberadaan harmonisa dan membandingkannya dengan standar IEEE 519-1992. Hasil analisis ini akan dijadikan pertimbangan untuk merancang sistem mitigasi harmonisa yang akan dibahas pada penelitian selanjutnya.

2. HARMONISA SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1. Harmonisa

Harmonisa sistem tenaga listrik diartikan sebagai distorsi gelombang arus maupun gelombang tegangan sebagai akibat dari penjumlahan gelombang frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi dasarnya dengan frekuensi fundamental gelombang tersebut. Harmonisa menjadikan bentuk gelombang AC menjadi non-sinusoidal pada keadaan *steady state* akibat adanya interaksi antara gelombang sinus frekuensi fundamental dengan gelombang harmonik kelipatan interger dari frekuensi fundamentalnya.

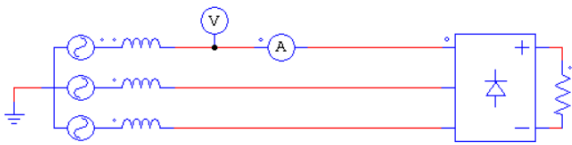


Gambar 2. 1 Pembentukan gelombang non-linear

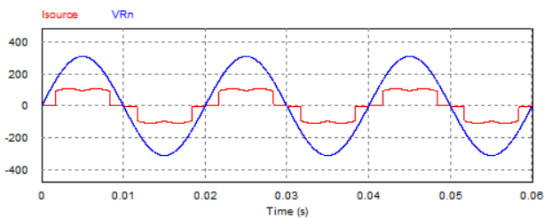
2.2. Penyebab Harmonisa

Harmonisa dalam sistem kelistrikan ditimbulkan akibat pengoperasian beban-beban non-linear yang umumnya berupa saklar-saklar semikonduktor. Beban non-linear adalah jenis beban yang menghasilkan arus non - sinusoidal walaupun menggunakan catu daya tegangan AC dengan sinusoidal murni. Beban ini mengubah nilai impedansinya ketika tegangan diberikan sesaat, sehingga menyebabkan penarikan arus non-sinusoidal ketika diberikan tegangan AC.

Rangkaian yang mewakili beban non-linear mencakup diode, *thyristor* (SCR's), transistor, saklar-saklar peralihan beban/sirkuit. Sedangkan menurut Pinyol (2015) beban non-linear secara umum seperti penyearah, *power supply*, VSD, dan UPS. Proses penyaklaran semikonduktor ini menimbulkan distorsi gelombang arus maupun tegangan di sisi sumber peralatan.



Gambar 2. 2 Topologi konverter AC/DC tiga fasa *full bridge* dengan beban Resistif



Gambar 2. 3 Bentuk gelombang arus dan tegangan sisi sumber konverter AC/DC tiga fasa *fullbridge*

2.3. Dampak Harmonisa

Setiap orde individual harmonisa memiliki urutan fasa salah satunya positif (+), negative (-), dan nol (0). Urutan fasa yang dimiliki setiap komponen harmonisa memiliki karakteristik dan dampak yang berbeda-beda terhadap sistem.

Urutan positif membangkitkan medan magnet dengan putaran *forward* pada motor dan efek peningkatan

arus dan medan magnet ini memberikan panas berlebih pada penghantar motor. Sedangkan urutan negatif menghasilkan medan magnet dengan arah putaran sebaliknya (*reverse*) yang menghasilkan putaran berlawanan dari kondisi normal motor serta menimbulkan panas berlebih yang sangat signifikan berdampak terhadap *lifetime* dan keandalan motor. Lalu urutan negatif menimbulkan panas yang lebih tinggi dari urutan lainnya yang sangat memberikan pengaruh terhadap penurunan efisiensi trafo dan motor-motor AC. Bila kondisi ini diabaikan, maka akan memberikan kerusakan kepada peralatan-peralatan pembangkit dan menurunkan factor daya pada peralatan. Hal ini akan memberikan kerugian yang besar dari operasional sistem elektrikal pembangkit, sehingga bila persentase total distorsi harmonisa teridentifikasi dengan persentase yang besar, haruslah dilakukan upaya reduksi hingga mencapai kesesuaian standar yang ada.

2.4. Indeks Harmonisa

Berdasarkan *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), *Individual Harmonic Distortion* (IHD) diekspresikan sebagai rasio antara arus atau tegangan *Root Mean Square* (RMS) dari masing-masing orde harmonisa ke-*n* (*I_n* atau *V_n*) dengan nilai tegangan atau arus fundamental (*I₁* atau *V₁*). Dengan metode ini, harmonisa pertama atau nilai fundamental selalu 100%. Persamaan IHD berdasarkan IEEE yaitu :

$$IHD_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\%$$

$$IHD_n = \frac{V_n}{V_1} \times 100\%$$

Total Harmonic Distortion (THD) didefinisikan sebagai rasio antara nilai RMS dari semua komponen harmonik dan RMS dari frekuensi fundamental, THD dinyatakan dalam persen.

$$THD_I = \sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} \times 100\%$$

Dengan :

I_n : Arus RMS pada harmonisa ke-*n* (A)

I₁ : Arus fundamental (A)

N : orde maksimum harmonisa

Standar harmonisa yang ditetapkan oleh IEEE (Std. 519-1992 : 85) untuk Distorsi Harmonisa Tegangan adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Standar IEEE 519-1992 untuk harmonisa tegangan

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3,0	5,0
69,001 kV through 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV and above	1,0	1,5

NOTE: High-voltage systems can have up to 2,0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for user

Sumber: Blooming, P.E, Carnovale, J. Daniel, 2007

Sedangkan standar harmonisa arus yang ditetapkan menurut IEEE (Std. 519-1992) yaitu *Current Distortion Limits* adalah berikut:

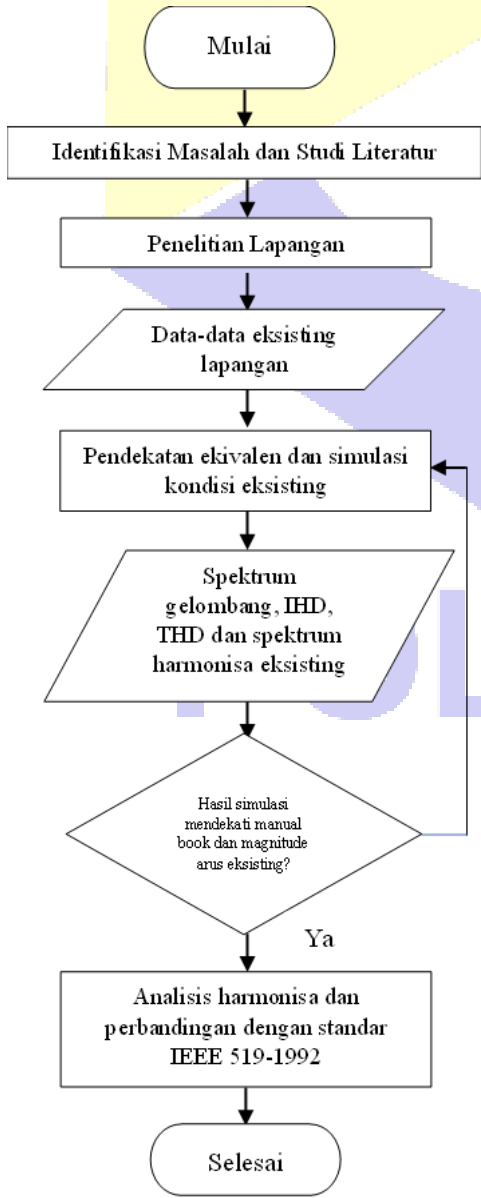
Tabel 2. 2 Standar IEEE 519-1992 untuk harmonisa arus

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I _L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I _h /I _L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above						
Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed						
*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I _{sc} /I _L						
where						
I _{sc} = maximum short-circuit current at PCC.						
I _L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC						

Sumber: IEEE Std 519-1992, 1993

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini melakukan pendekatan kondisi eksisting sistem elektrikal PLTGU Tambak Lorok Blok 2 sebagai objek penelitian. Yakni dengan identifikasi dan analisis harmonisa yang timbul pada sistem elektrikal pembangkit, nilai harmonisa ini dianalisis berdasarkan nilai standar IEEE 519-1992 untuk dilakukan perancangan sistem mitigasi harmonisa di busbar *Point Of Common Coupling* (PCC) yang teridentifikasi memiliki harmonisa yang besar.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

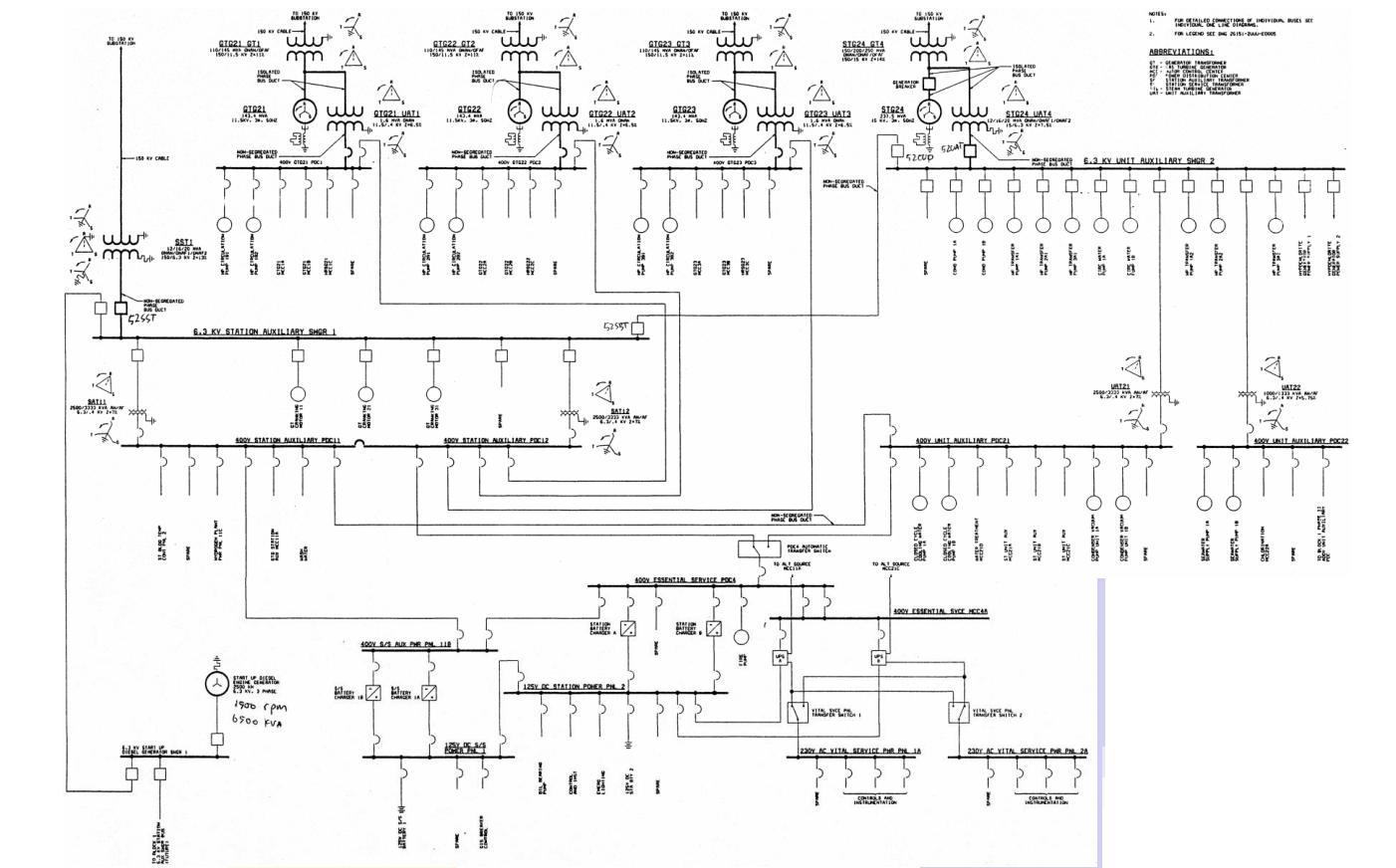
4. PEMODELAN RANGKAIAN EKIVALEN

4.1. Sistem Elektrikal PLTGU Tambak Lorok blok 2

PLTGU Tambak Lorok Blok 2 merupakan salah satu unit pembangkit listrik gas uap dari perusahaan PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*. PLTGU ini menerapkan kombinasi dua pembangkit yang pada dasarnya secara bersamaan menerapkan prinsip kerja siklus *Brayton* (Turbin Gas) dengan siklus *Rankine* (Turbin Uap).

PLTGU Tambak Lorok Blok 2 mempunyai tiga unit turbin gas - generator dengan kapasitas generatornya 3 × 109,65 MW, serta sebuah turbin uap - generator dengan kapasitas generator 188 MW. PLTGU ini dapat beroperasi dengan tiga jenis konfigurasi. Konfigurasi 3 – 3 – 1 menghasilkan daya netto sebesar ± 334 MW, lalu konfigurasi 2 – 2 – 1 dihasilkan daya netto ± 210 MW, serta konfigurasi 1 – 1 – 1 dengan daya *output* netto 100 MW. Ketika *base load*, daya *output*nya dapat mencapai 414 MW saat konfigurasi 3 – 3 – 1. Penurunan daya dari kapasitas disebabkan faktor *lifetime* mesin pembangkit mengingat usia pembangkit ini sudah cukup lama. Tegangan listrik yang dihasilkan generator dinaikkan dari 15 kV ke 150 kV dan terhubung dengan sistem transmisi 150 kV.

Pada *single line diagram* sistem kelistrikan PLTGU Tambak Lorok memberikan informasi bahwa pembangkit ini terdiri dari tiga unit generator yang menggunakan turbin gas sebagai *prime mover* yakni *Gas Turbine – Generator* (GTG) unit (2.1),(2.2) dan (2.3). Ketiga generator ini memiliki kapasitas 143.4 MVA dengan tegangan *output* sebesar 11.5 kV. Daya *output* generator sebagian besar disalurkan ke *grid* 150 kV menggunakan *step up transformer* 11.5 kV/150 kV berkapasitas 110/145 MVA. Sedangkan sebagian daya disalurkan ke sistem elektrikal internal pembangkit menggunakan *step down transformer* 11.6 kV/0.4 kV atau disebut juga sebagai *Unit Auxiliary Transformer* (UAT). Sebuah generator digerakkan oleh sistem *Stem Turbine – Generator* (STG) dengan kapasitas 237.5 MVA menghasilkan tegangan 15 kV yang sebagian besar dayanya disalurkan juga ke *grid* 150 kV menggunakan *step up transformer* 15kV/150kV berkapasitas 250 MVA. Daya keluaran generator disalurkan ke sistem elektrikal internal dengan diturunkan tegangannya menggunakan *Unit Auxilliary Transformer* (UAT) 15 kV/6.3 kV berkapasitas maksimal 20 MVA. Sebagian daya *output* yang dibangkitkan digunakan untuk operasional peralatan listrik pembangkit dengan daya terpakai ± 10% daya *output* total seluruh generator.



Gambar 4.1 As build drawing sistem elektrikal PLTGU Tambak Lorok Blok 2

4.2. Identifikasi Sumber Harmonisa

Beban-beban non-linier yang diidentifikasi sebagai pembangkit harmonisa yaitu mencangkup enam buah converter AC/DC tiga fasa *fullbridge* pada sistem DC power. Penggunaan konverter AC/DC seperti alat S/S Battery Charger 1A dan 1B terhubung dengan busbar 400V *Auxilliary Power Panel 11B*, serta Station Battery Charger A dan B, *Uninterruptible Power Supply (UPS)* A dan B yang terhubung dengan busbar 400V *Essential Service PDC 4*. Peralatan tersebut dipilih sebagai objek penelitian harmonisa didasarkan karena konverter pada alat – alat tersebut memiliki kapasitas daya yang besar dan menyuplai beban DC yang cukup besar, sehingga hal ini memungkinkan konverter tersebut membangkitkan arus harmonisa yang besar dalam sistem elektrikal pembangkit.

Pada sistem elektrikal PLTGU Tambak Lorok Blok 2, konverter AC/DC tiga fasa *full bridge* untuk S/S Battery Charger 1A dan 1B, serta Baterry Charger A dan B menggunakan merek Benning D 380 G 125/1659 BWru – Dt YD5 dengan rectifier Tyrothronic. Berikut *technical data* dari manual book peralatan tersebut.



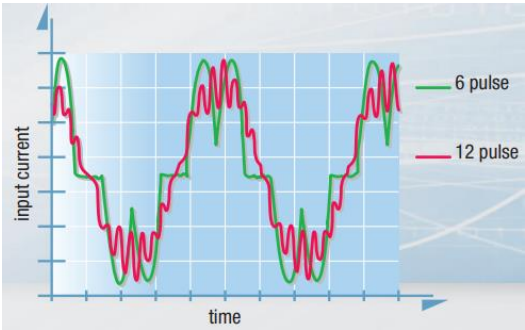
Gambar 4. 2 Station battery charger pada sistem DC Power PLTGU Tambak Lorok Blok 2

Nama Alat	: S/S Battery Charger 1A dan 1B
Kapasitas	: 3.9 kVA ($\cos \varphi = 0.83$)
Merek	: Benning
<u>Input AC</u>	
Input Voltage	: 380V $\pm$ 15%, 3 ϕ
Current	: 200 A
Frequency	: 50 Hz
Ambient Temp.	: 40°C
Cooling mode	: Self – cooling
<u>Output DC</u>	
Nominal output voltage	: 110/125 V
Minimal Voltage	: 138 V
Float Charging	: 144 V
Equalizing Charge	: 156 V
Voltage Ripple	: 1% - 5%
Battery	: Lithium Ion 230 Ah

Nama Alat	: Baterry Charger A dan B
Kapasitas	: 225 kVA ($\cos \varphi = 0.83$)
Merek	: Benning D 380 G 125/1659 BWru – Dt YD5
Dimensi	: 2200 + 100×1200 + 1200×1000
<u>Input AC</u>	
Input Voltage	: 380V $\pm$ 15%, 3 ϕ
Frequency	: 50 Hz
Current	: 520 A
Ambient Temp.	: 40°C
Cooling mode	: Self – cooling
<u>Output DC</u>	
Boost charging	: 144 V, 1650 A
Float Charging	: 133.8 V, 1650 A
Equalizing Charge	: 162 V, ca.400 A
Battery	: 60 Pb – cells, nominal
output Voltage	: 120 V, 4500 Ah
Residual Ripple	: 2% pp

Penggunaan beban non-linear tersebut memberikan distorsi harmonisa arus sumber dengan bentuk gelombang non-sinudoidal seperti berikut berdasarkan

manual book *Thyrotronic Rectifiers*. Sedangkan pada UPS A dan B yang digunakan bermerek ABB Cyberex dengan model 4T-40/1BF2M-5.



Gambar 4. 3 Comparison of harmonic loading of input current with 6/12 rectifier. (Sumber : Manual book thyrotronic rectifier)

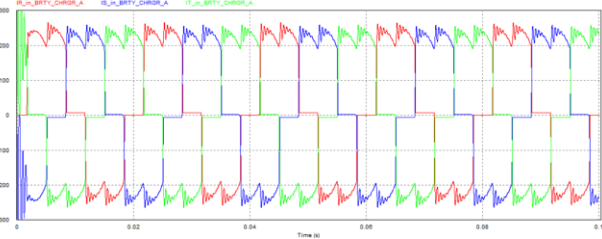
Spesifikasi yang diperoleh sebagai berikut:

<u>Input Sistem</u>	
Nama Alat	: Uninterruptible Power
Supply (UPS) A dan B	
Nominal Source Input	: 400 VAC ± 10%, 3φ
Frekuensi	: 50 Hz

<u>Sistem AC Output</u>	
Tegangan	: 230 V AC, 1φ , 50Hz
Inverter current limit	: 300 A
Kapasitas AC Output	: 40 kVA
UPS Output DC KVA	: 40 kVA

<u>Rectifier/Charger Settings</u>	
DC Voltage output	: 140 V (float & equalize)
Current Limit	: 105% of nominal
Rectifier/Ichgr DC	: 325 A (nominal)

Seluruh beban non-linear ini dimodelkan dengan blok konverter AC/DC tiga fasa *full bridge* tidak terkontrol mengingat bentuk gelombang harmonisa sudah mendekati distorsi gelombang yang dicantumkan di manual book untuk konverter 6 pulsa.

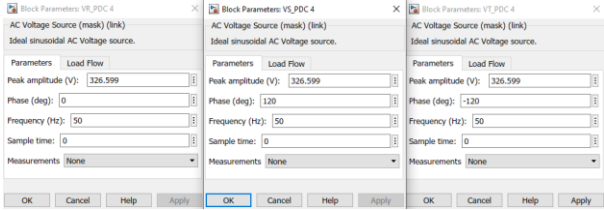


Gambar 4. 4 Bentuk gelombang arus sumber station battery charger A

4.3. Parameter Sumber Daya

Sumber suplai daya AC menuju *Battery Charger* dan UPS menggunakan nilai tegangan yang sama dengan busbar AC sumber konveter tersebut. Sumber tegangannya menggunakan sumber 3 fasa AC dengan tegangan 400 V RMS *line to line* dan perbedaan tiap fasa sebesar 120°. Dalam pemodelan dengan simulasi maka digunakan blok sumber tegangan satu fasa sebanyak tiga buah yang diberikan input perbedaan fasa dimana pada VR sebesar 0°, VS 120°, dan VT -120°.

Untuk Sistem Pertama, sumber AC 3 fasa berasal dari busbar 400V *Essential Service* PDC 4 (sistem 1) sedangkan pada sistem kedua berasal dari busbar 400V *S/S Auxilliary Power Panel 11B* (sistem 2).



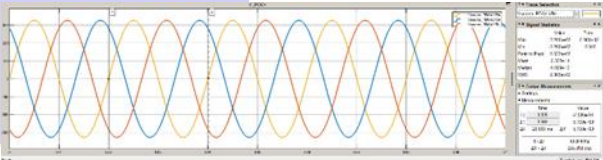
Gambar 4. 5 Parameter blok tegangan sumber busbar pada rangkaian ekivalen

Parameter tegangan yang dimasukkan di dalam blok sumber tegangan ialah tegangan puncak (*peak* atau maksimum). Berdasarkan data lapangan, busbar AC pada sumber penyearah bekerja di 3Ø 400 V *line to line*. Sehingga dapat dihitung nilai tegangan yang diinput sebagai berikut:

$$V_{L-n} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}}$$
$$V_m = V_{L-n} \times \sqrt{2} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2}$$
$$V_m = \frac{400}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 326.599 \text{ V}$$

4.4. Rangkaian Ekivalen Sistem DC Power

Rangkaian ekivalen yang disimulasikan berupa konverter AC/DC tiga fasa *full bridge* dengan filter LC dan beban R. Beban pada busbar DC diinterpretasikan dengan beban resistif murni sedangkan untuk motor – motor yang terhubung dengan busbar AC (*400V MCC 4A* dan *400 V S/S auxiliary power panel 11B*).



Gambar 4. 6 Tegangan sumber AC sistem elektrikal pada suplai input DC Power

Untuk beban R yang merepresentasikan peralatan DC yang disuplai oleh sistem DC dihitung sebagai berikut :

Beban DC : DC Emergency Lube Oil Pump

Diketahui :

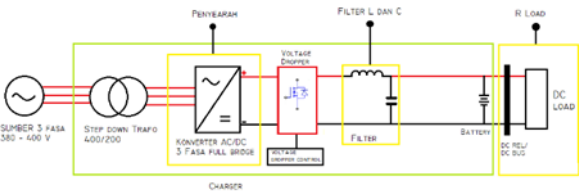
$$P_{DC} = 30.00 \text{ kW}$$
$$V_{DC} = 125 \text{ V}$$

Maka ,

$$I_{DC} = \frac{P_{DC}}{V_{DC}}$$
$$I_{DC} = \frac{30000 \text{ W}}{125 \text{ V}} = 240 \text{ A}$$

Sehingga :

$$R = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \frac{125 \text{ V}}{240 \text{ A}}$$
$$R = 0.52 \text{ Ohm}$$



Gambar 4. 7 Rangkaian ekivalen sistem DC Power

Perhitungan pada beban lainnya dilakukan menggunakan formulasi yang sama dan data hasil perhitungan beban DC dicantumkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Perhitungan beban – beban DC pada busbar DC yang disuplai rectifier

No	Nama Bus	I max Bus (Ampere)	Nama Beban	P (kW)	V (volt)	I (Ampere)	R (Ohm)
1	125V DC Subst. PNL Battery 1	100	125 V DC s/s RLY RM Dist PNL 13	2.25	125	18.00	6.94
			125 V DC s/s Power Panel 11	0.20	125	1.60	78.13
			GIS Interlocking DC Source	0.05	125	0.40	312.50
			GIS SF6 Gas Monitor DC Source	0.05	125	0.40	312.50
			GIS SF 6 Gas Low Interrupting DC Source	0.05	125	0.40	312.50
			GIS Alarm DC Source	0.05	125	0.40	312.50
			DC Emergency Lube Oil Pump	30.00	125	240.00	0.52
2	125V DC Stat. PWR PNL 2	1600	125 V DC S/S Battery Panel	2.50	125	20.00	6.25
			125 V DC Emergency Lightning Battery Panel 23	3.00	125	24.00	5.21
			Uninterruptible Power Supply (UPS) A	16.00	125	128.00	0.98
			Uninterruptible Power Supply (UPS) B	16.00	125	128.00	0.98
			2 - TCB - CAB 1 (excitation cabinet)	18.80	125	150.40	0.83
			DC STA Power Panel 21	9.87	125	78.96	1.58
			ST 125V DC Power Panel 22	9.35	125	74.80	1.67

Selanjutnya dilakukan perhitungan filter LC yang terpasang di dalam *battery charger* dan UPS. Adapun besar induktansi dan kapasitansi filter tidak dicantumkan dalam *manual book* konverter yang digunakan. Namun berdasarkan manual book dikatakan bahwa *charger* dan UPS menggunakan *voltage dropper*, sehingga bila diasumsikan menggunakan *konverter DC – DC buck*, nilai parameter filter dapat diketahui dengan cara berikut. Data Trafo *Stepdown* (400/200 V_{LL}):

Tegangan Primer,

$$(V_p) = \frac{400}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 326.598 \text{ V (V puncak)}$$

Tegangan Sekunder,

$$(V_s) = \frac{200}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 163.299 \text{ V (V puncak)}$$

Dengan tegangan input konverter sebesar V_m = 163.299 V maka tegangan *output* konverter tiga fasa *full bridge* dapat diketahui :

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3} \times V_m}{\pi}$$
$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3} \times 163.299 \text{ V}}{\pi} = 270.23 \text{ V}$$

Menuju *buck konverter* diperoleh parameter berikut :

$$V_s = 270.23 \text{ V}$$
$$V_o = 125 \text{ V (tegangan busbar dan baterai DC)}$$
$$f = 5500 \text{ (Ditentukan berdasarkan trial dan error)}$$

Penentuan *Duty Ratio* :

$$D = \frac{V_s}{V_o} = \frac{270.23 \text{ V}}{125 \text{ V}}$$
$$D = 0.4626 \approx 46.26\%$$

Penentuan *switching point* pada *gating block* :

Pada *duty cycle* 100 %, *switching point* di 360°, maka pada 46.26% *duty cycle*:

$$Switching \text{ Point} = 0.4626 \times 360^\circ$$
$$Switching \text{ Point} = 166.536^\circ \approx 167^\circ$$
$$R_{tot}(\text{sistem 1}) = 0.143 \text{ Ohm}$$
$$R_{tot}(\text{sistem 2}) = 6.009 \text{ Ohm}$$

Perhitungan Lmin dan C sistem 1 :

$$L_{min} = \frac{(1-D) \times R_{tot}}{2f} = \frac{(1-0.4626) \times 0.143 \text{ Ohm}}{2 \times 5500 \text{ Hz}} = 6.9 \mu H$$
$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) f^2}$$

Dengan *ripple* ($\frac{\Delta V_o}{V_o}$) maksimal di 5%

$$C = \frac{1 - 0.4626}{8 \times 6.9 \times 10^{-6} H \times (0.05) \times (5500 \text{ Hz})^2}$$
$$C = 643.6 \mu F$$

Perhitungan Lmin dan C sistem 2 :

$$L_{min} = \frac{(1 - D) \times R_{tot}}{2f} = \frac{(1 - 0.4626) \times 6.009 \text{ Ohm}}{2 \times 5500 \text{ Hz}}$$
$$L_{min} = 293.5 \mu H$$

Dengan *ripple* ($\frac{\Delta V_o}{V_o}$) maksimal di 5%

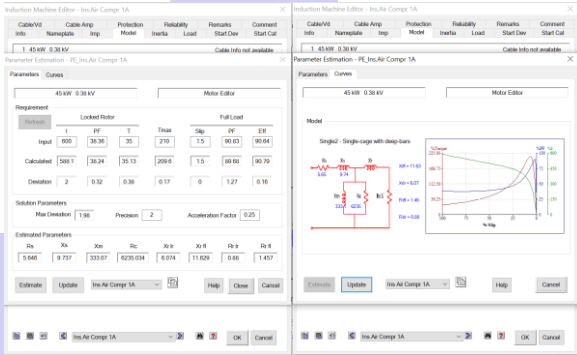
$$C = \frac{1 - 0.4626}{8 \times 293.5 \times 10^{-6} H \times (0.05) \times (5500 \text{ Hz})^2}$$
$$C = 151.3 \mu F$$

4.5. Parameter Beban AC

Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai resistansi dan reaktansi induktif untuk rangkaian ekivalen pada peralatan AC yang terhubung dengan busbar AC (400 V MCC4A dan 400 V S/S auxiliary power panel 11B). Dimana peralatan ini memiliki sumber yang sama dengan *battery charger* dan UPS. Diperoleh nilai perhitungan resistansi dengan cara sebagai berikut :

$$S_{3\phi} = V_m \times I_m = V_m \times \frac{V_m}{R} = \frac{V_m^2}{R}$$
$$R = \frac{V_m^2}{S_{3\phi}}$$

Sedangkan untuk motor-motor AC tiga fasa, parameter rangkaian ekivalen pada belitan jangkarnya diperoleh dari *software* ETAP 12.6.0.



Gambar 4. 8 Tampilan perhitungan parameter rangkaian ekivalen motor induksi oleh ETAP

Perhitungan beban AC yang terhubung ke busbar selain motor hanya pendekatan nilai tahanan resistifnya saja. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.2.

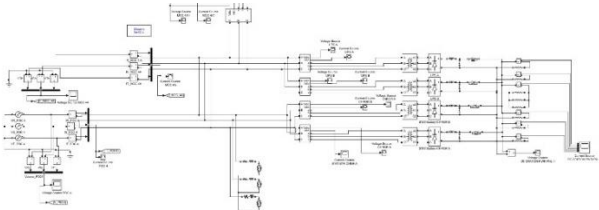
Tabel 4. 2 Hasil Perhitungan Beban AC yang digunakan dalam simulasi Harmonisa

Nama Bus	I max Bus (Ampere)	Nama Beban	S (kVA)	P (kW)	PF	V (Volt)	R (Ohm)
400 V Essential Service MCC 4A	800	Pressure Main Pump Controller	0.65	0.55	0.85	400	164.85
		STG 24 Generator XFMR 4 (Standby Power)	28.00	23.80	0.85	400	3.81
		Stm Turbine Temp Control Panel 1	48.25	41.01	0.85	400	2.21
		400V/230 AC Essential Service Power Panel 4A1	48.43	41.17	0.85	400	2.20

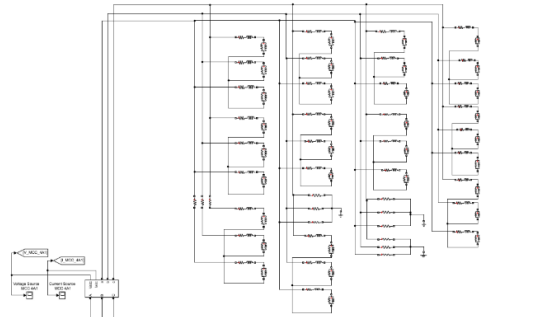
Selanjutnya untuk motor-motor induksi yang terhubung pada busbar dimodelkan dengan rangkaian ekivalen belitan stator motor berdasarkan hasil kalkulasi software ETAP 12.06.01, disajikan dalam Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Parameter rangkaian ekivalen motor induksi yang disimulasikan

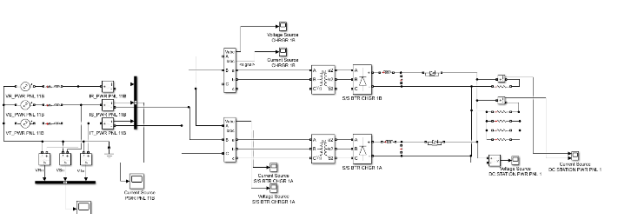
No	Nama Bus	I max Bus (Ampere)	Nama Motor Induksi	P (kW)	V (Volt)	Rs (Ohm)	Xs (Ohm)	Xm (Ohm)	Rc (Ohm)
1	400 V Essential PDC 4	1600	Fire Water Pump Control Panel	150.00	380.00	3.60	10.50	401.45	4024.51
2	400 V Essential Service MCC 4A	800	Steam Turbine Junction Box 4A (Motor Turning Gear 1)	13.00	380.00	7.44	10.72	264.38	679.18
			Instrumen Air Compressor 1A	45.00	380.00	5.65	9.74	333.07	6235.03
			Jockey Pump Motor	3.70	380.00	9.77	10.80	210.21	1500.74
			Lube Oil Reservoir Vapor Extractor	2.20	380.00	9.77	10.93	209.43	1322.86
			Hydraulic Fluid Pump Motor 1A	11.20	380.00	7.72	10.80	256.69	634.19
			Instrumen Air Compressor 1B	45.00	380.00	5.65	9.74	333.07	6235.03
			Gland Seal Steam Condenser Exhaust 1A	7.50	380.00	8.69	9.44	212.82	2196.98
			Hydraulic Fluid Pump Motor 1B	11.20	380.00	7.72	10.75	256.80	641.61
			Gland Seal Steam Condenser Exhaust 1B	7.50	380.00	8.69	9.44	212.82	2196.98
			AC Oil Bearing Pump 3A	37.30	380.00	5.57	12.81	364.18	665.06
			AC Oil Bearing Pump 3B	37.30	380.00	5.57	12.81	364.18	665.06



Gambar 4. 9 Rangkaian Ekuivalen simulasi sistem 1



Gambar 4. 10 Beban-beban AC terhubung dengan busbar 400V Essential service PDC4



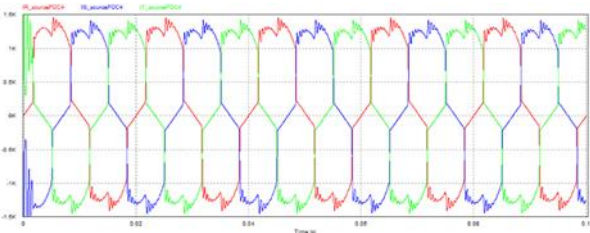
Gambar 4. 11 Rangkaian ekuivalen simulasi sistem 2

Hasil pendekatan ekuivalen sistem elektrikal disimulasikan menggunakan *software Matlab simulink* dan *Psim*. Penggunaan dua *software* simulasi ini digunakan sebagai pembanding hasil simulasi harmonisa serta memeriksa terjaganya konsistensi model matematis yang digunakan dalam simulator tersebut.

5. SIMULASI EKSISTING DAN ANALISIS

5.1. Harmonisa Busbar 400 V Essential Service

Penggunaan konverter AC/DC tiga fasa *full bridge* ini menimbulkan gelombang arus periodik yang non-sinusoidal mengalir di setiap penghantar. Untuk fasa R, gelombang arus non-sinusoidal mengalir dengan sudut fasa 0°. Bentuk gelombang arus non – sinusoidal yang sama mengalir pada penghantar S dan T dengan perbedaan fasa 120° serta 240° terhadap fasa R. Didapatkan arus rms pada sisi sumber konverter AC/DC pada sistem 1 yakni busbar *400V Essential Service PDC 4* sebesar 1005.68 A (*Psim*) dan 1076 A (*Matlab*). Nilai ini masih sesuai dengan nilai spesifikasi busbar sebesar 1600A. Bentuk gelombang yang dihasilkan dari kedua *simulator Psim* (5.1a) dan *Matlab* (5.1b) menunjukkan hasil yang mirip.



Gambar 5. 1 Bentuk gelombang arus sumber konverter pada titik pengukuran busbar 400V Essential service PDC 4

Tabel 5. 1 Data THD_i dan IHD pada busbar PDC 4 dari simulasi *Psim*

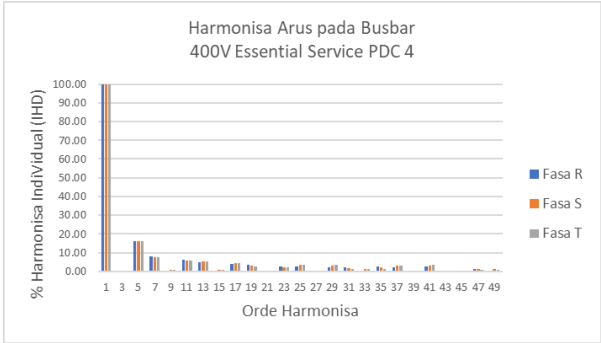
Busbar 400V Essential Service PDC 4							
Irms	1005.68	A	Arus Max Busbar		1600 A		
Fundamental	1396.13	A (Peak)	Tegangan Busbar		400 V		
THD	21.47	%					
Orde	Frekuensi	IHD Magnitude			IHD magnitude		
		R	S	T	R	S	T
(n)	Hz	(Ampere)	(Ampere)	(Ampere)	(%)	(%)	(%)
1	50	1007.91	1023.01	1022.94	100.00	100.00	100.00
3	150	0.125	5.712	5.688	0.012	0.558	0.556
5	250	160.365	165.442	165.611	15.911	16.172	16.190
7	350	82.701	78.833	76.847	8.205	7.706	7.512
9	450	0.541	6.201	6.331	0.054	0.606	0.619
11	550	63.215	57.544	57.792	6.272	5.625	5.650
13	650	48.090	52.677	54.893	4.771	5.149	5.366
15	750	0.129	7.241	7.135	0.013	0.708	0.698
17	850	39.029	46.002	45.772	3.872	4.497	4.475
19	950	34.365	30.344	26.461	3.409	2.966	2.587
21	1050	0.166	0.840	0.856	0.016	0.082	0.084
23	1150	28.546	22.084	20.958	2.832	2.159	2.049
25	1250	27.380	34.141	36.589	2.717	3.337	3.577
27	1350	0.296	0.098	0.095	0.029	0.010	0.009
29	1450	23.892	32.248	34.278	2.370	3.152	3.351
31	1550	23.581	18.955	12.992	2.340	1.853	1.270
33	1650	0.499	11.679	12.151	0.050	1.142	1.188
35	1750	25.744	23.892	14.138	2.554	2.335	1.382
37	1850	19.674	29.681	32.202	1.952	2.901	3.148
39	1950	0.872	1.133	1.063	0.087	0.111	0.104
41	2050	25.052	29.345	34.132	2.486	2.869	3.337
43	2150	4.100	3.852	3.384	0.407	0.377	0.331
45	2250	0.474	5.206	5.195	0.047	0.509	0.508
47	2350	14.205	10.751	9.863	1.409	1.051	0.964
49	2450	5.708	10.681	9.250	0.566	1.044	0.904
		THD (%)			21.32	21.55	21.53

Tabel 5. 2 Data THD_i dan IHD pada busbar PDC 4 dari simulasi *Matlab*

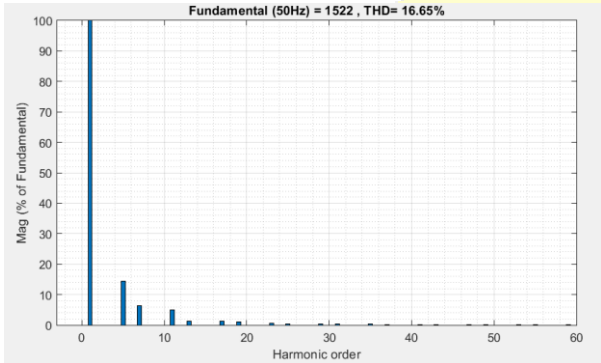
Sampling time = 5e-05 s			
Samples per cycle = 400			
DC component = 0.172			
Fundamental = 1522 peak (1076 rms)			
THD = 16.65%			
0 Hz (DC):	0.01%	270.0°	1250 Hz (h25): 0.49%
50 Hz (Fnd):	100.00%	-8.0°	1300 Hz (h26): 0.00%
100 Hz (h2):	0.00%	-40.3°	1350 Hz (h27): 0.00%
150 Hz (h3):	0.00%	95.7°	1400 Hz (h28): 0.00%
200 Hz (h4):	0.00%	214.9°	1450 Hz (h29): 0.42%
250 Hz (h5):	14.40%	134.5°	1500 Hz (h30): 0.00%
300 Hz (h6):	0.00%	198.2°	1550 Hz (h31): 0.28%
350 Hz (h7):	6.25%	71.4°	1600 Hz (h32): 22.82%
400 Hz (h8):	0.00%	161.7°	1650 Hz (h33): 0.00%
450 Hz (h9):	0.00%	166.9°	1700 Hz (h34): 0.00%
500 Hz (h10):	0.00%	-52.2°	1750 Hz (h35): 0.29%
550 Hz (h11):	5.08%	219.7°	1800 Hz (h36): 0.00%
600 Hz (h12):	0.00%	-56.9°	1850 Hz (h37): 0.24%
650 Hz (h13):	1.18%	204.4°	1900 Hz (h38): 0.00%
700 Hz (h14):	0.00%	-38.5°	1950 Hz (h39): 0.00%
750 Hz (h15):	0.01%	253.9°	2000 Hz (h40): 0.00%
800 Hz (h16):	0.00%	21.3°	2050 Hz (h41): 0.18%
850 Hz (h17):	1.31%	-66.4°	2100 Hz (h42): 0.00%
900 Hz (h18):	0.00%	45.6°	2150 Hz (h43): 0.18%
950 Hz (h19):	1.02%	-30.1°	2200 Hz (h44): 0.00%
1000 Hz (h20):	0.00%	77.7°	2250 Hz (h45): 0.00%
1050 Hz (h21):	0.00%	-15.5°	2300 Hz (h46): 0.00%
1100 Hz (h22):	0.00%	99.1°	2350 Hz (h47): 0.14%
1150 Hz (h23):	0.56%	3.1°	2400 Hz (h48): 0.00%
1200 Hz (h24):	0.00%	127.0°	2450 Hz (h49): 0.12%
			2500 Hz (h50): 0.00%

Berdasarkan simulasi *Psim* diperoleh nilai magnitudo harmonisa orde ke-5 secara berturut – turut yaitu 15,91%, 16,17%, dan 16.19% pada fasa R, S, dan T. Sedangkan pada *simulink* menunjukkan nilai 14.4% yang mewakili harmonisa ketiga fasa pada orde ke-5. Lalu harmonisa orde ke-7 sebesar 8,21% untuk fasa R, 7,71% untuk fasa S dan 7,51% untuk fasa T pada *Psim*. Pada orde ke-7 ini simulasi pada *simulink* menunjukkan hasil 6,25% untuk ketiga fasa. Harmonisa individual pada orde ke-11 menunjukkan sebesar 6,272% pada fasa R, lalu 5,625% pada fasa S dan 5,650% pada fasa T dari hasil *Psim* sedangkan dari simulasi *Matlab* didapatkan nilai harmonisa orde ke-11 sebesar 5,08%.

Untuk harmonisa individual di orde tersebut menunjukkan hasil yang relatif sama dari kedua simulasi. Selain itu juga nilai harmonisa arus individual orde lainnya yang dominan yaitu orde ke – 13, 17 dan 19. Diperoleh nilai THD arus sebesar 21,47% pada simulasi *Psim* dan 16,65% dari simulasi *Matlab simulink*.



(a) Grafik harmonisa pada busbar 400V Essential Service PDC 4 hasil simulasi *Psim*



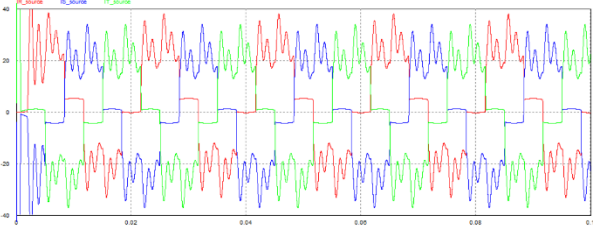
(b) Grafik harmonisa pada busbar 400V Essential Service PDC 4 hasil simulasi *Matlab Simulink*

Grafik 5. 1 Spektrum harmonisa arus pada busbar PDC 4

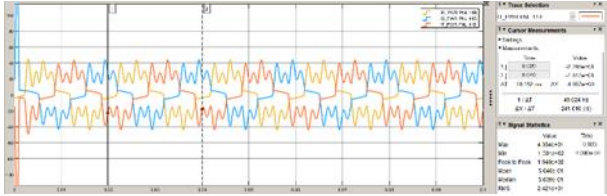
Spektrum Harmonisa pada busbar 400V Essential Service PDC 4 sebagai sumber catu daya AC empat unit konverter AC/DC tiga fasa *full bridge* menampilkan nilai harmonisa arus individual yang dominan berada di orde ke-5, ke-7, ke-11, ke-13, ke-17, ke-19 dan seterusnya. Ini menunjukkan bahwa konverter AC/DC tiga fasa *full bridge* membangkitkan harmonisa arus dengan orde ganjil selain kelipatan tiga (Kastawan, 2017). Rashid (2011) menjelaskan juga bahwa *Graetz Rectifier* sebagaimana ialah penyearah tiga fasa *full bridge* memiliki karakteristik harmonisa dengan ketiadaan harmonisa triplen (kelipatan tiga) dengan keberadaan harmonisa pada urutan $6k \pm 1$ dengan bilangan bulat sebesar k. Dalam grafik ini dapat diamati bahwa terdapat persentase harmonisa individual yang relatif sama pada setiap fasa di orde harmonik ganjil selain kelipatan tiga. Nilai persentase IHD akan sama di setiap fasa selama sistem tiga fasa tersebut seimbang.

5.2. Harmonisa Busbar 400 V Auxilliary Power Panel 11B

Bentuk gelombang arus pada busbar ini memiliki distorsi yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan busbar PDC 4. Untuk gelombang arus yang dihasilkan merupakan arus periodic non-sinusoidal dengan tiap sudut fasa yang berbeda 120° (Gambar 5. 2). Hasil simulasi menunjukkan bahwa *Irms* pada busbar mencapai 20,36 A.



(a) Hasil simulasi *Psim*



(b) Hasil simulasi *Matlab*

Gambar 5. 2 Bentuk gelombang arus sumber konverter pada titik pengukuran busbar 400V Auxilliary Power Panel 11B

Lalu selanjutnya dilakukan pengambilan data THD_i dan IHD dari simulasi. Data ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

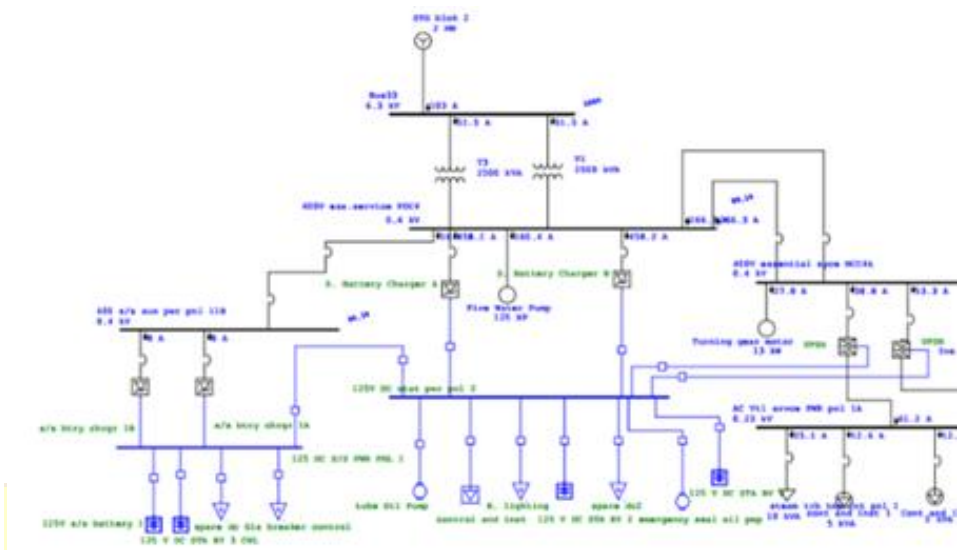
Tabel 5. 3 Data THD_i dan IHD pada busbar PWR PNL 11B dari simulasi *Psim*

Sampling time = 5e-05 s			
Samples per cycle = 400			
DC component = 0.02844			
Fundamental = 28.79 peak (20.36 rms)			
THD = 41.51%			
0 Hz (DC):	0.10%	270.0*	
50 Hz (Fnd):	100.00%	-8.0*	
100 Hz (h2):	0.00%	32.3*	
150 Hz (h3):	0.01%	-5.9*	
200 Hz (h4):	0.00%	266.2*	
250 Hz (h5):	23.97%	198.7*	
300 Hz (h6):	0.00%	246.9*	
350 Hz (h7):	17.29%	118.9*	
400 Hz (h8):	0.00%	201.7*	
450 Hz (h9):	0.01%	151.8*	
500 Hz (h10):	0.00%	64.6*	
550 Hz (h11):	25.58%	-36.0*	
600 Hz (h12):	0.00%	-39.7*	
650 Hz (h13):	13.34%	148.9*	
700 Hz (h14):	0.00%	220.5*	
750 Hz (h15):	0.01%	1.1*	
800 Hz (h16):	0.00%	130.9*	
850 Hz (h17):	2.92%	83.2*	
900 Hz (h18):	0.00%	195.6*	
950 Hz (h19):	1.24%	254.2*	
1000 Hz (h20):	0.00%	-24.8*	
1050 Hz (h21):	0.01%	165.7*	
1100 Hz (h22):	0.00%	-54.8*	
1150 Hz (h23):	1.52%	-86.8*	
1200 Hz (h24):	0.00%	21.8*	
1250 Hz (h25):	0.55%	-14.5*	
1300 Hz (h26):	0.00%	105.4*	
1350 Hz (h27):	0.01%	-23.0*	
1400 Hz (h28):	0.00%	123.1*	
1450 Hz (h29):	1.10%	96.8*	
1500 Hz (h30):	0.00%	187.4*	
1550 Hz (h31):	0.55%	120.6*	
1600 Hz (h32):	0.00%	243.4*	
1650 Hz (h33):	0.07%	59.5*	
1700 Hz (h34):	0.00%	-70.3*	
1750 Hz (h35):	0.85%	254.4*	
1800 Hz (h36):	0.00%	-9.5*	
1850 Hz (h37):	0.53%	-85.5*	
1900 Hz (h38):	0.00%	38.8*	
1950 Hz (h39):	0.01%	-37.4*	
2000 Hz (h40):	0.00%	100.0*	
2050 Hz (h41):	0.07%	59.5*	
2100 Hz (h42):	0.00%	155.1*	
2150 Hz (h43):	0.47%	73.8*	
2200 Hz (h44):	0.00%	194.9*	
2250 Hz (h45):	0.01%	135.6*	
2300 Hz (h46):	0.00%	260.9*	
2350 Hz (h47):	0.54%	223.2*	
2400 Hz (h48):	0.00%	-44.5*	
2450 Hz (h49):	0.42%	234.5*	
2500 Hz (h50):	0.00%	-8.0*	

Pada data simulasi *Psim* diperoleh IHD terbesar pada orde ke – 5 dengan persentase sebesar 29,28%, orde ke – 7 sebesar 10,79%, orde ke – 11 sebesar 16,85%, orde ke – 13 sebesar 16,17% , orde ke – 17 sebesar 12,58% dan orde ke – 19 sebesar 5,61%. Hasil *Matlab Simulink* juga menampilkan persentase harmonisa yang mendekati hasil simulasi *Psim*. Data harmonisa ditampilkan pada tabel berikut ini.

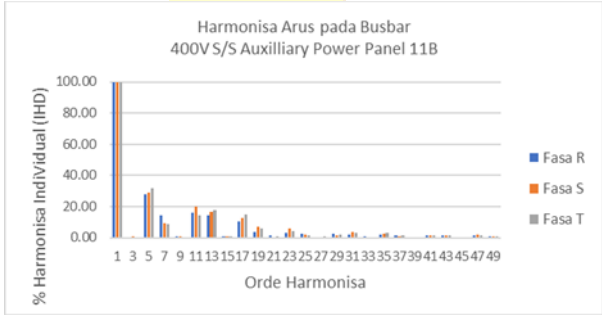
Tabel 5. 4 Data THD_i dan IHD pada busbar PWR PNL 11B dari simulasi *Matlab*

Busbar 400V S/S Auxilliary Power Panel 11B							
Imms	18.17 A			Arus Busbar		100 A	
Fundamental	25.77 A (Peak)			Tegangan Busbar		400V	
THD	42.23 %						
Ordé	Frekuensi	IHD Magnitude			IHD magnitude		
		R	S	T	R	S	T
(n)	Hz	(Ampere)	(Ampere)	(Ampere)	(%)	(%)	(%)
1	50	17.75	18.38	18.38	100.00	100.00	100.00
3	150	0.070	0.140	0.086	0.39	0.76	0.47
5	250	4.891	5.281	5.804	27.56	28.73	31.57
7	350	2.520	1.723	1.617	14.20	9.37	8.80
9	450	0.107	0.111	0.103	0.60	0.60	0.56
11	550	2.855	3.690	2.647	16.09	20.07	14.40
13	650	2.564	3.031	3.228	14.45	16.49	17.56
15	750	0.107	0.113	0.135	0.60	0.61	0.73
17	850	1.835	2.348	2.694	10.34	12.77	14.65
19	950	0.649	1.286	1.136	3.66	6.99	6.18
21	1050	0.208	0.051	0.158	1.17	0.28	0.86
23	1150	0.582	1.094	0.749	3.28	5.95	4.07
25	1250	0.416	0.324	0.284	2.34	1.76	1.55
27	1350	0.086	0.024	0.111	0.49	0.13	0.60
29	1450	0.427	0.290	0.360	2.41	1.58	1.96
31	1550	0.349	0.660	0.581	1.97	3.59	3.16
33	1650	0.107	0.038	0.007	0.61	0.21	0.04
35	1750	0.349	0.498	0.522	1.97	2.71	2.84
37	1850	0.300	0.198	0.267	1.69	1.08	1.45
39	1950	0.067	0.022	0.076	0.38	0.12	0.42
41	2050	0.297	0.284	0.258	1.67	1.54	1.40
43	2150	0.260	0.293	0.276	1.47	1.60	1.50
45	2250	0.069	0.026	0.054	0.39	0.14	0.30
47	2350	0.257	0.316	0.266	1.45	1.72	1.45
49	2450	0.158	0.151	0.159	0.89	0.82	0.87
THD (%)					39.91	43.27	43.53

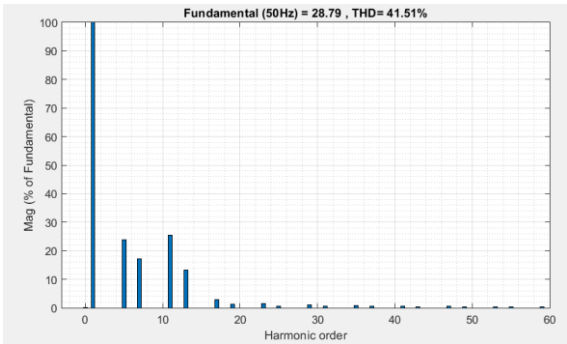


Gambar 5. 3 Load Flow Analysis sistem DC Power

Pada simulasi *Matlab Simulink* didapatkan harmonisa individual ketiga fasa pada orde ke-5, ke-7, ke-11, ke-13, ke-17, dan ke-19 secara berturut turut yaitu sebesar 23,97%, 17,29%, 25,58%, 13,44%, 2,92% dan 1,24 %. THD_I yang didapatkan dari simulasi sebesar 41,5% pada *Matlab Simulink* dan 42,23% pada *Psim*. Nilai THD_I dari hasil kedua simulasi tersebut mendekati.



(a) Simulasi Psim



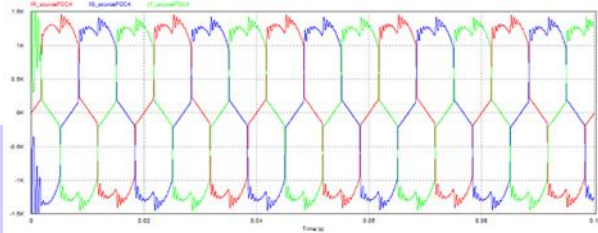
(b) Simulasi Matlab

Grafik 5. 2 Spektrum harmonisa arus pada busbar PWR PNL 11B

Didapatkan nilai arus harmonisa individual (IHD) yang besar di busbar *400V S/S Auxilliary Power Panel 11B* yaitu di orde ke-5, ke-7, ke-11, ke-13, ke-17 dan ke-19 dengan besar frekuensi sebesar kelipatan orde tersebut terhadap frekuensi fundamentalnya sebesar 50 Hz. Karakteristik harmonisa pada sistem 2 ini yaitu mengandung harmonisa orde ganjil selain kelipatan tiga, sama halnya dengan karakteristik harmonic pada konverter AC/DC tiga fasa *full bridge* pada umumnya.

5.3. Pengaruh beban Kapasitor dan Induktor sebagai Filter Konverter pada Harmonisa Sumber

Simulasi sistem 1 ini memiliki nilai kapasitansi yang besar (643,6 μF) yang bisa menimbulkan penambahan distorsi gelombang arus sisi sumber. Dapat dilihat dari bentuk gelombang arus sisi sumber konverter (



Gambar 5. 1) bahwa puncak dan gelombang dari arus sumber berosilasi (fluktuasi). Hal ini dipengaruhi akibat keberadaan filter L dan C pada sisi *output* konverter. Namun, berdasarkan hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai THD_I lebih rendah daripada nilai THD_I konverter AC/DC *full bridge* dengan beban resistif yang umumnya bernilai 30 % (Surya, 2021). Ini berbeda dengan sistem 2 yang nilai distorsinya lebih tinggi dengan adanya kapasitansi yang besar di sisi *output* konverter. Nilai induktansi (L) yang besar juga memengaruhi tingginya distorsi gelombang arus di sumber konverter, berbeda dengan sistem 1 yang nilai induktansinya lebih rendah dibandingkan dengan sistem 2.

Dari simulasi ini juga menunjukkan bahwa keberadaan nilai kapasitansi (C) yang besar seringkali digunakan pada sisi *output* konverter AC/DC tiga fasa *full bridge* sebagai filter penghalus arus DC *output* menghasilkan resonansi pada arus harmonisa kritis sehingga memicu peningkatan distorsi gelombang (Dugan, 2004). Resonansi ini terjadi ketika nilai reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif bernilai sama sehingga impedansi suatu rangkaian bernilai minimum dan arus maksimum mengalir menuju rangkaian. Akibatnya timbul fluktuasi (lonjakan) dan osilasi pada arus. Umumnya nilai THD arus total yang dihasilkan oleh konverter 6 pulsa sebesar 25 – 40% (Abdelaziz, 2012). Namun dengan nilai kapasitansi yang besar pada sistem 2 yang mencapai 151 μF serta nilai induktansi yang besar juga senilai 293,5 μH menimbulkan nilai

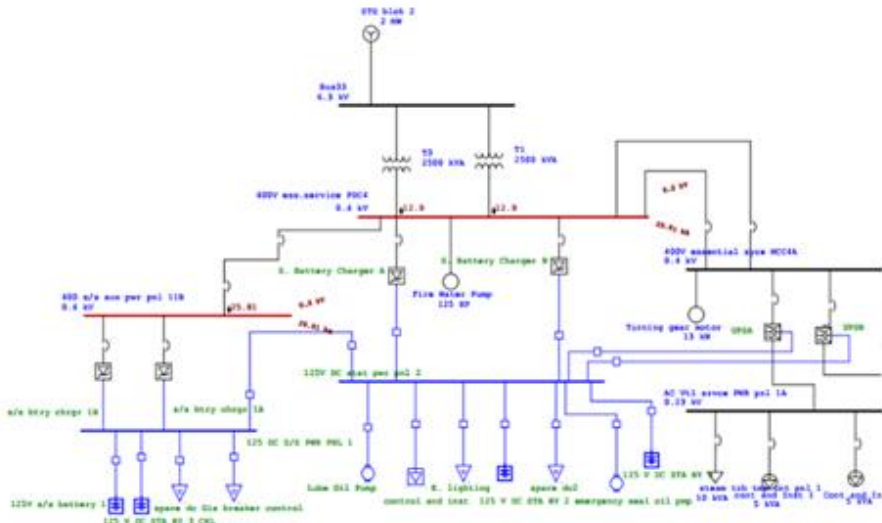
harmonisa tinggi di sisi sumber yakni pada busbar *400V S/S Auxilliary Power Panel 11B* yaitu dengan THD_1 sebesar 41,51 % hingga 42,23%

5.4. Hasil Harmonisa berdasar Standar IEEE 519-1992

Selanjutnya untuk menganalisis kesesuaian nilai harmonisa arus yang timbul di sistem elektrikal PLTGU Tambak Lorok blok 2 maka dilakukan simulasi *load flow analysis* dan *short circuit analysis* dari rangkaian eksisting. Berdasarkan standar IEEE tersebut, nilai batasan IHD dan THD_1 ditentukan dari nilai rasio arus *short circuit* (I_{sc}) dan arus *load* atau beban (I_L) yang

mengalir pada *Point of Commont Coupling* (PCC). Maka dilakukan analisis menggunakan *software* ETAP 12.6.0. Berdasarkan simulasi aliran daya, diperoleh arus beban pada busbar 400 V Essential Service PDC 4 sebesar 1625,4 A, sedangkan pada busbar 400V s/s Auxilliary Power Panel 11B didapatkan arus beban sebesar 16 A.

Selanjutnya dilakukan analisis hubung singkat dengan mensimulasikan bahwa kedua busbar tersebut mengalami kegagalan (*fault*).



Gambar 5. 4 Short Circuit Analysis sistem DC Power

Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa kedua busbar tersebut memiliki nilai arus hubung singkat yang sama sebesar 25,81 kA sehingga diperoleh nilai I_{sc}/I_L sebagai berikut :

Tabel 5. 5 Standar harmonisa arus pada busbar yang teridentifikasi mengandung harmonisa

Busbar	I_{sc}/I_L	Orde Harmonisa Individual (IHD) arus maks (%)					TDD Maks (%)
		$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
400 V Essential Service PDC 4	15,88	4	2	1,5	0,6	0,3	5%
400V s/s Auxilliary Power Panel 11B	1613,13	15	7	6	2,5	1,4	20%

Dari standar tersebut maka didapatkan harmonisa arus individual hasil simulasi kondisi eksisiting yang melebihi standar IEEE 519 – 1992 sebagai berikut :

Tabel 5. 6 Standar Harmonisa pada PPC Konverter AC/DC 3 Fasa Full Bridge

(a) 400 V Essential Service PDC 4					(b) 400V s/s Auxilliary Power Panel 11B				
Orde Harmonisa	Simulasi		Standar IEEE 519-1992	IHD (%)	Orde Harmonisa	Simulasi		Standar IEEE 519-199	IHD (%)
	Prim	Matlab				Prim	Matlab		
5	16,09	14,4	4		5	29,29	23,97	15	
7	7,81	6,25	4		7	10,79	17,29	15	
11	5,85	5,08	2		11	16,85	25,58	7	
13	5,10	1,18	2		13	16,17	13,34	7	
17	4,28	1,31	1,5		17	12,59	2,92	6	
19	2,99	1,02	1,5		19	5,61	1,24	6	
23	2,35	0,56	0,6		23	4,43	1,52	2,5	
25	3,21	0,49	0,6		25	1,88	0,55	2,5	
29	2,96	0,42	0,6		29	1,98	1,1	2,5	
31	1,82	0,28	0,6		31	2,91	0,55	2,5	
35	2,09	0,29	0,3		35	2,51	0,85	1,4	
37	2,67	0,24	0,3		37	1,41	0,53	1,4	
41	2,90	0,18	0,3		41	1,54	0,67	1,4	
43	0,37	0,18	0,3		43	1,52	0,47	1,4	
47	1,14	0,14	0,3		47	1,54	0,54	1,4	
49	0,84	0,12	0,3		49	0,86	0,42	1,4	

Keterangan : melebihi standar IEEE 519 - 1992

Diperoleh bahwa pada busbar *400 V Essential Service PDC 4* atau sistem 1 memiliki batasan THD_1 sebesar 5%. Sedangkan hasil simulasi eksisting menunjukkan nilai THD_1 sistem kelistrikan tersebut sebesar 21,47% pada simulasi *Psim* dan 16,65% pada simulasi *Matlab*. Kedua hasil simulasi menunjukkan nilai distorsi harmonisa arus total jauh melebihi standar IEEE 519 – 1992. Lalu bila melihat nilai IHD pada busbar *400 V Essential Service PDC 4* didapatkan bahwa hasil simulasi *Psim* untuk orde harmonisa ganjil selain kelipatan tiga di bawah orde ke – 50 memiliki nilai IHD yang seluruhnya melewati nilai standar kecuali pada orde

ke – 43. Namun berdasarkan hasil simulasi *Matlab simulink*, diperoleh hasil analisis FFT

(*Fast Fourier Transform*) bahwa harmonisa individual yang melebihi standar hanya berada di orde ke – 5, ke – 7 dan ke – 11. Adapun hasil kedua simulasi menunjukkan hasil yang sama pada harmonisa individual yang melebihi standar berada di orde ke – 5, ke – 7 dan ke – 11.

Pada sistem 2 yaitu busbar 400V s/s *Auxilliary Power Panel 11B* sebagai PCC dari konverter AC/DC tiga fasa *full bridge S/S Battery Charger 1A* dan 1B didapatkan hasil perhitungan bahwa batasan THD_i pada arus sumber sesuai dengan standar IEEE 519 – 1992 yaitu sebesar 20%. Simulasi kondisi eksisting sistem DC Power tersebut menunjukkan nilai harmonisa di sisi sumber penyearah sebesar 41,51 % pada hasil simulasi *Matlab* dan 42,23% pada *Psim* (nilai ini mendekati). Namun kedua hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai THD_i relatif tinggi dan jauh dari standar. Selanjutnya untuk harmonisa individual di sistem 2 didapatkan dari simulasi *Psim* bahwa harmonisa individual yang melebihi standar berada di orde ke-5, ke-7, ke-11, ke-13, ke-17, ke-23, ke-31, ke-35, ke-41, ke-43, ke-47 dan ke-49. Sedangkan hasil *Matlab* menunjukkan hanya harmonisa individual orde ke-5, ke-7, ke-11 dan ke-13 yang melebihi standar. Adapun kedua simulasi menunjukkan hasil yang sama dimana harmonisa individual yang melebihi standar di orde ke – 5, ke-7, ke-11, dan ke-13.

Hasil ini menunjukkan bahwa harmonisa arus baik pada sistem 1 dan sistem 2 melebihi nilai standar yang ditetapkan oleh IEEE 519 – 1992. Harmonisa ini perlu mendapatkan perhatian dan dilakukan upaya mitigasi supaya mencapai nilai standar dan tidak menimbulkan dampak yang signifikan untuk sisitem elektrikal dan peralatan pada pembangkit.

6. KESIMPULAN

1. Penggunaan beban-beban non-linear seperti *Battery Charger* dan *Uninterruptable Power Supply* membangkitkan harmonisa arus sumber sehingga menimbulkan munculnya arus periodik non-sinusoidal pada busbar 400V *Essential Service PDC 4* dan busbar 400V *S/S Auxilliary Power Panel 11B* sebagai titik sambung bersama beban-beban non-linear dan beban linear lainnya.
2. *Battery charger* dan UPS direpresentasikan dengan rangkaian ekivalen yang terdiri dari konverter AC/DC tiga fasa gelombang penuh dengan filter LC dan beban R paralel memiliki karakteristik harmonisa arus sumber dengan orde ganjil selain kelipatan tiga.
3. Hasil *load flow analysis* dan *short circuit analysis* dan hasil perhitungan diperoleh bahwa untuk THD_i busbar PDC 4 berdasarkan IEEE 519-1992 harus lebih rendah dari 5%, sedangkan THD_i busbar PWR PNL 11B harus lebih rendah dari 20%.
4. Berdasarkan pendekatan rangkaian ekivalen, didapatkan THD_i pada busbar 400V *Essential Service PDC 4* sebesar 16,65% berdasarkan simulasi *Matlab* dan 21,47% berdasarkan simulasi *Psim*. Lalu pada busbar 400V *Auxilliary Power Panel 11B* didapatkan THD_i sebesar 41,25% dari simulasi *Matlab* dan

42,23% dari simulasi *Psim*. Harmonisa pada busbar tersebut melebihi standar IEEE 519-1992.

DAFTAR PUSTAKA

519-1992, I. S. (1992). *IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. Piscataway: IEEE.

Abdelaziz, A. (2012). Technical Comparison of Harmonic Mitigation Techniques for Industrial Electrical Power System. *15th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'12), Alexandria University, Egypt* (pp. 1-9). Cairo: Researchgate.

Dugan, R. C. (2004). *Electrical Power System Second Edition*. McGraw-Hill.

John B. Kammeter, R. (1994). *United States of America Patent No. 5,343,080*.

Kastawan, I. M. (2017). Reduksi Harmonisa Arus Sumber Tiga-Fasa dengan Transformator Penggeser Fasa. *Seminar Nasional Teknoka. 2*. Bandung Barat: FT UHAMKA. Retrieved from ISSN No. 2502-8782

Pinyol, R. (2015). *Harmonics: Causes, Effect, and Minimization*. Barcelona: Salicru.

Rashid, M. (2011). *Power Electronics Handbook Third Editions*. Pensacola: Elsevier Inc.

Sjaferial, A. d. (2015). Peredaman Resonansi Harmonisa pada Sistem Kelistrikan Industri Menggunakan Filter Hybrid dengan Konduktansi Variabel. *Jurnal Teknik ITS, 4*, B181-B186. Retrieved April 20, 2023

Surya, H. (2021). The Effect of 12 Pulse Converter Input Transformer Configuration on Harmonics of Input Current. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Bandung Barat: IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/1158/1/012007

Suryo, S. (2016). Studi Analisis dan Mitigasi Harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh. *Jurnal Teknik ITS, 5*, B456-B461. Retrieved Mei 2, 2023