

**JESCE****(Journal of Electrical and System Control Engineering)**Available online <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jesce>

Pengaruh Harmonisa Pada Inverter di Pembangkit Tenaga Surya Terhadap Pembebanan

The Effect of Harmonics on the Inverter in a Solar Power Plant on Loading

Rama Fauzi¹⁾, Indra Roza²⁾

1,2) Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Komputer, Universitas Harapan Medan, Indonesia

Diterima: Mei 2023; Direview: Juli 2023; Dipublikasi: Agustus 2023

*Corresponding Email: indrarozair@gmail.com

Abstrak

Penelitian yang dilakukan ini adalah untuk melihat karakteristik *harmonisa arus* dan *tegangan* pada sistem tenaga listrik yang dibebani dengan beban non-linear. *Inverter* merupakan salah satu beban non-linear yang banyak digunakan baik di industri, instansi pemerintahan maupun pada rumah tangga. Secara teori, *inverter* merupakan beban non-linear yang dapat menghasilkan *harmonisa* dalam sistem tenaga listrik, dimana *harmonisa* yang dihasilkan akan dialirkan ke sumber dan ke beban. Oleh karena itu penelitian ini adalah untuk melihat karakteristik *harmonisa* dalam sistem tenaga listrik yang dihasilkan oleh *inverter* tiga fase, dimana penelitian ini dilakukan pada dua skenario. Skenario pertama untuk melihat *harmonisa arus* dan *tegangan* pada kondisi *inverter* tidak dibebani dan skenario yang kedua adalah untuk melihat *harmonisa arus* dan *tegangan* pada kondisi *inverter* dibebani. Kedua skenario ini dilakukan dengan *tegangan* sumber yang divariasikan. Pada penelitian ini menggunakan filter pasif berupa *single-tuned filter*, hasil simulasi yang dilakukan pada kondisi sebelum terpasangnya filter untuk nilai THDv sebesar 38,94% dan sesudah terpasangnya filter sebesar 27,43%. Selisih nilai, sebelum terpasang filter dan sesudah terpasangnya filter adalah 11,51%. hal ini masih melebihi standar IEEE 512 tahun 1952, sehingga diperlukan lebih dari satu filter untuk mengurangi harmonisa.

Kata kunci: *Inverter, Tegangan, Arus, Harmonisa.*

Abstract

This research was conducted to look at the characteristics of current and voltage harmonics in an electric power system loaded with non-linear loads. The inverter is a non-linear load that is widely used in industry, government agencies and households. In theory, the inverter is a non-linear load that can produce harmonics in the electric power system, where the resulting harmonics will flow to the source and to the load. Therefore, this research is to look at the characteristics of harmonics in the power system produced by a three-phase inverter, where this research was carried out in two scenarios. The first scenario is to see current and voltage harmonics under unloaded inverter conditions and the second scenario is to see current and voltage harmonics under loaded inverter conditions. Both of these scenarios are carried out with a varied source voltage. In this study using a passive filter in the form of a single-tuned filter, the simulation results were carried out on conditions before the filter was installed for a THDv value of 38.94% and after the filter was installed it was 27.43%. The difference in value, before installing the filter and after installing the filter is 11.51%. this still exceeds the 1952 IEEE 512 standard, so more than one filter is needed to reduce harmonics.

Keywords: *Inverter, Voltage, Current, Harmonic.*



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

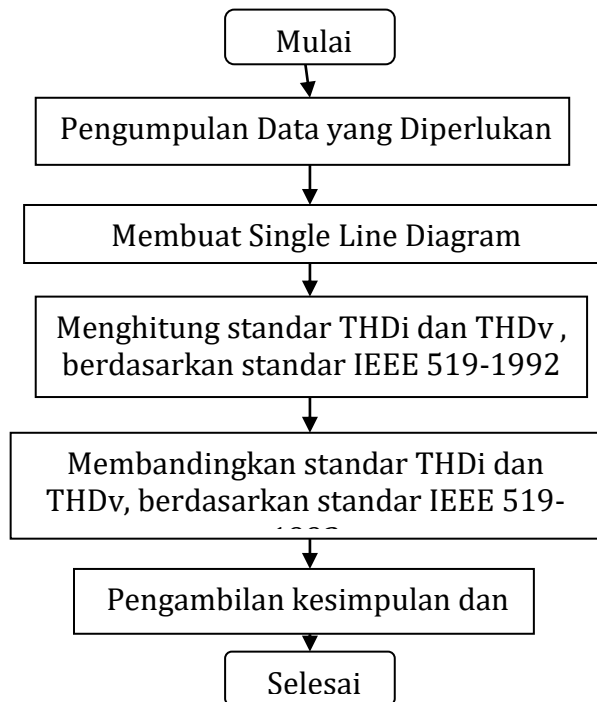
PENDAHULUAN

Harmonisa merupakan fenomena yang terjadi akibat pengoperasian beban listrik non-linier. Beban non-linier adalah beban yang komponen arusnya tidak proporsional terhadap komponen tegangannya. Hal ini menyebabkan bentuk dari gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masuknya. Nilai harmonisa yang tinggi dianggap sebagai gangguan pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu nilai harmonisa harus diatasi agar berada pada standar IEEE 519-2014. Untuk menghasilkan kualitas daya yang baik dan mengurangi kerugian yang dialami oleh pihak SMK Negeri 1 Percut Sei Tuan khususnya pada gedung perpustakaan maka perlu dilakukan penelitian tentang harmonisa arus dan tegangan sesuai standar IEEE 519- 2014.

METODE PENELITIAN

Detuned reaktor yang dipasang secara seri bertujuan untuk melindungi kapasitor dengan mencegah kenaikan harmonisa yang timbul pada jaringan. Namun hal ini berakibat naiknya tegangan pada terminal kapasitor. Sehingga rating tegangan kapasitor yang digunakan harus menyesuaikan dengan kenaikan tegangan akibat dipasangnya reactor tersebut. Kemudian dilakukan diagram alir

penelitian agar penelitian lebih terpusat seperti pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

A. Harmonisa

Harmonisa adalah gelombang tegangan atau arus sinusoidal yang memiliki frekuensi yang merupakan hasil kali integer dari frekuensi di mana suplai sistem dirancang untuk bekerja pada frekuensi 50 atau 60 Hz. Pada dasarnya, harmonisa sendiri adalah gejala pembentukan gelombang dengan frekuensi yang berbeda dan merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonisa. Harmonisa sendiri disebabkan oleh adanya beban nonlinier yang digunakan pada

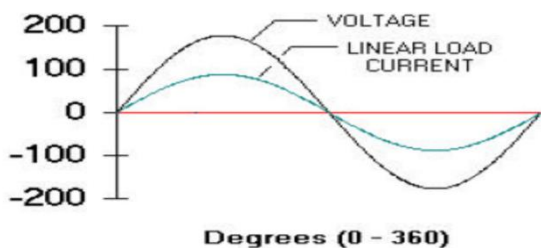
system tenaga listrik, contohnya seperti convertor, inverter, serta berbagai peralatan yang berhubungan dengan proses pensaklaran.



Gambar 2. Gelombang Harmonisa

B. Beban Linier

Beban linier adalah beban yang komponen arusnya proporsional terhadap tegangannya. Terdapat hubungan yang linier antara arus dan tegangan sehingga bentuk gelombang arus akan sama dengan bentuk gelombang tegangannya, seperti terlihat pada gambar 3. Beban linier menyerap arus sinusoidal bila disuplai oleh tegangan sinusoidal.

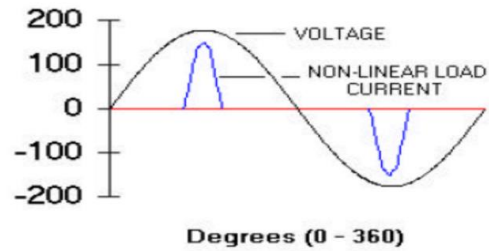


Gambar 3. Gelombang beban linier

C. Beban Nonlinier

Beban yang komponen arusnya tidak proporsional terhadap komponen tegangannya, sehingga bentuk gelombang

arusnya tidak sama dengan bentuk gelombang tegangannya. Tidak terdapat hubungan yang linier antara arus dan tegangan. Beban nonlinier akan menyerap arus nonsinusoidal demikian juga arus harmonik, walaupun disuplai oleh tegangan sinusoidal. Seperti gambar di bawah ini



Gambar 4. Gelombang beban Nonlinier

D. Dampak Harmonisa

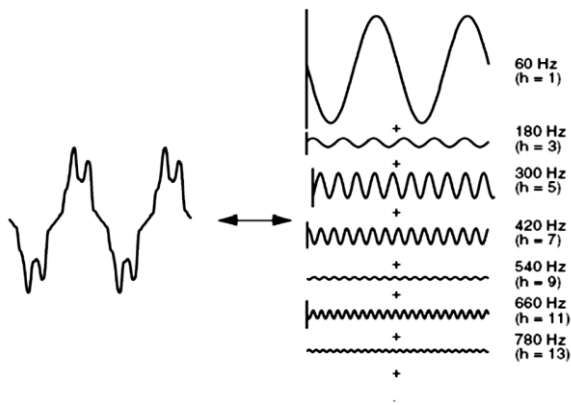
Efek harmonisa yang terjadi dalam sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan pengaruh yang tidak diinginkan, yaitu :

1. Usia (life time) peralatan elektronik menjadi berkurang.
2. Interferensi sinyal (seperti Noise pada saluran telepon).
3. Rugi-rugi daya pada sistem tenaga listrik meningkat.
4. Penggunaan energi listrik menjadi tidak efisien.
5. Kualitas daya menjadi buruk, sehingga faktor daya sistem menjadi lebih rendah.

E. Total Harmonic Distorsions (THD)

Distorsi harmonisa disebabkan oleh peralatan nonlinier dalam suatu sistem

tenaga listrik. Sebuah peralatan dikategorikan non-linier apabila peralatan tersebut mempunyai output yang nilainya tidak sebanding dengan tegangan yang diberikan



Gambar 5. Gelombang Terdistorsi

Pada gambar 5 memperlihatkan bentuk gelombang yang merupakan penjumlahan dari beberapa gelombang sinusoidal yang memiliki variasi frekuensi yang berbeda. Gelombang sinusoidal yang mempunyai frekuensi berbeda ini merupakan hasil kelipatan dari bilangan bulat dengan frekuensi fundamentalnya. Nilai distorsi harmonisa total (THD) dari suatu gelombang dapat dihitung menggunakan persamaan.

$$THD : \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} M_h^2}}{M_1} \quad (1)$$

Di mana M_h adalah nilai rms komponen harmonisa h dari kuantitas M . kuanitas M dapat berupa besaran tegangan V maupun

besaran arus I , sehingga THDI nilai distorsi harmonisa arus total menjadi:

$$THDI : \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}}{I_1} \times 100 \% \quad (2)$$

Dengan THD = Distorsi Harmonisa Total (%)

I_1 = Arus frekuensi dasar (A).

I_h = Arus harmonisa ke $-h$ (A).

Sedangkan untuk nilai distorsi harmonisa tegangan total (THDV) :

$$THDV : \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100 \% \quad (3)$$

Dengan THD = Distorsi Harmonisa Total (%)

V_1 = Tegangan frekuensi dasar (A).

V_h = Tegangan harmonisa ke $-h$ (A).

Untuk THD memiliki standar yang sudah ditentukan dalam IEEE standart 519-1992 pada tabel 1. Limit Distorsi Arus dan tabel 2 Limit Distorsi Tegangan Harmonisa.

Tabel 1. Limit Distorsi Arus Harmonisa

| Maximum Harmonics Current Distortion In Individual Harmonic Order (odd harmoni | | | | | | |
|--|----|-------|-------|-------|-----|------|
| Isc / IL | <1 | 11=<h | 17=<h | 23=<h | 35= | TH D |
| <20 | 4 | 2 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5 |
| 20-50 | 7 | 3.5 | 2.5 | 1 | 0.5 | 8 |
| 50- | 10 | 4.5 | 4 | 1.5 | 0.7 | 12 |

| | | | | | | |
|-----|----|-----|---|-----|-----|----|
| 100 | | | | | | |
| 100 | 12 | 5.5 | 5 | 2 | 1 | 15 |
| - | | | | | | |
| 000 | | | | | | |
| >10 | 15 | 7 | 6 | 2.5 | 1.4 | 20 |
| 00 | | | | | | |

Tabel 2 Limit Distorsi Tegangan

| Voltage at PCC | Individual Voltage Distorsion (%) | Total Voltage Distorsion THD (%) |
|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 69 kV | 3.0 | 5.0 |
| 69 kV – 161 kV | 1.5 | 2.5 |
| 161 kV | 1.0 | 1.5 |

F. Perancangan Filter Pasif

Untuk merancang suatu filter, terlebih dahulu diperlukan proses identifikasi terhadap orde harmonik yang akan dilakukan eliminasi. Data harmonik tegangan terbesar digunakan untuk menentukan harmonik dari orde berapa yang akan difilter dari sistem. Kriteria yang didasarkan pada tegangan harmonik lebih tepat untuk desain filter. Hal ini disebabkan karena lebih mudah menjamin tetap berada dalam batas tegangan yang layak daripada membatasi tingkat arus akibat adanya perubahan impedansi jaringan AC. Dalam perancangan filter pasif terdapat beberapa langkah yaitu:

- 1) Menentukan faktor daya awal (PF0) dan faktor daya yang diinginkan (PF1).

- 2) Menentukan nilai kapasitansi kapasitor sesuai dengan kebutuhan kompensasi faktor daya yang dihitung dengan persamaan: $Q_c = P(\tan \phi_{awal} - \tan \phi_{akhir})$ Dengan: Q_c = Besarnya kompensasi daya reaktif yang diperlukan; P = Daya Aktif.

- 3) Menentukan tuning filter, untuk faktor keamanan filter dituning 5% dibawah orde aslinya.

- 4) Kemudian menentukan nilai kapasitor dengan menggunakan persamaan:

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c} \tag{4}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot V^2} \tag{5}$$

Dimana:

C = Nilai kapasitor (F)

V = Tegangan (v)

f = Frekuensi (Hz)

X_c = Reaktansi akapsitif (Ohm)

- 5) Menentukan nilai induktor dengan menggunakan persamaan:

$$X_L = \frac{X_c}{n^2} \tag{6}$$

$$L = \frac{X_c}{(2\pi \cdot f)} \tag{7}$$

Dengan:

X_L = Reaktansi induktif (Ohm)

n = Orde harmonic

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan standar *International Electrotechnical Commission* (IEC), kenaikan tegangan pada suatu sistim jaringan disebabkan karena mengalirnya arus harmonisa pada jaringan tersebut. Untuk perhitungan besarnya arus yang akan mengalir ke kapasitor untuk setiap tingkatan harmonisa, yang pertama kita tentukan adalah nilai impedansi kapasitor dan impedansi induktor (reaktor) dengan menggunakan rumus:

$$X_C = 1 / (2 \times \pi \times f \times C)$$

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

Total impedansi dikarenakan Reaktor dan Kapasitor yang terhubung seri adalah:

• | **$X_L - X_C$** | Nilai X_C dan X_L yang didapat dari kedua rumus diatas sangat dipengaruhi oleh nilai frekuensi, dan pada kasus harmonisa ini, untuk setiap tingkatan harmonisa, nilai X_C dan X_L akan berubah. Mencari Nilai Impedansi Kapasitor (X_C) dan Reaktor (X_L).

Sekarang akan dicoba hitung nilai X_L dan X_C . Pada contoh diawal telah didapatkan nilai kVAR baru sebesar 12 kVAR pada tegangan 421.052 V dengan nilai reactor 5 %. Dengan menggunakan rumus :

$$\bullet X_C = (U^2) / Q,$$

Sehingga nilai $X_C = 421.052 / 12 \text{ k} = 35,08 \text{ ohm}$

Dengan diketahuinya nilai reactor $P = 5 \%$,

nilai impedansi X_L dapat dihitung, sebagai berikut:

$$\bullet P = X_L / X_C$$

$$\bullet 0.05 = X_L / 35,08$$

$$\bullet X_L = 35,08 \times 0,05$$

$$\bullet X_L = 1.75 \text{ ohm}$$

Setelah nilai X_C dan X_L didapat, yaitu 35,08 ohm dan 1,75 ohm, langkah berikutnya adalah menghitung nilai impedansi kapasitor (X_C) dan reaktor (X_L) untuk setiap frekuensi tingkatan harmonisa.

Nilai Impedansi Kapasitor (X_C) dan Reaktor (X_L) Pada Tiap Tingkat Harmonisa Besarnya frekuensi harmonisa adalah : Nilai frekuensi untuk setiap tingkatan harmonisa adalah kelipatan tingkatan harmonisa dikali dengan nilai frekuensi fundamental. Sehingga jika frekuensi 50 Hz maka besarnya frekuensi untuk harmonisa ke 5 adalah: $= 5 \times 50 = 250 \text{ Hz}$.

Sedangkan untuk harmonisa ke 3 besarnya frekuensi untuk harmonisa ke 3 adalah: $= 3 \times 50 = 150 \text{ Hz}$.

Formula untuk X_C dan X_L

$$\bullet X_C = 1 / (2 \times \pi \times f \times C)$$

$$\bullet X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

Misalkan sekarang diukur nilai X_C dan X_L untuk harmonisa ke 3, maka dari formula diatas nilai frekuensi untuk setiap tingkatan

harmonisa yaitu 3 x 50 Hz, sehingga untuk tingkatan harmonisa ke 3, nilai XC adalah:

- $X_C = 1 / (2 \times \pi \times f \times C)$ pada 50 H
- $X_{C3} = 1 / (2 \times \pi \times 3 \times f \times C)$, pada 150 Hz (harmonisa ketiga)

• Atau $X_{C3} = X_C / 3$ Sedangkan untuk XL adalah :

- $X_L = 2 \times \pi \times f \times L$ ada 50 Hz
- $X_{L3} = 2 \times \pi \times 3 \times f \times L$ pada 150 Hz (harmonisa ketiga)

• Atau $X_{L3} = X_L \times 3$

Berdasarkan hal diatas, untuk tingkatan harmonisa yang lainya dapat kita hitung nilai impedansi kapasitor XC dan nilai impedansi reaktor XL sebagai berikut:

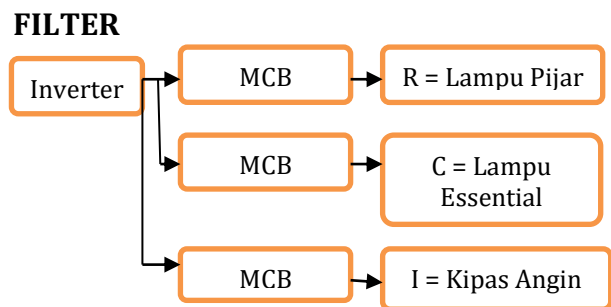
- Harmonisa tingkat 1;
 $X_{C1} = 35,08$;
 $X_{L1} = 1,75$
- Harmonisa tingkat 3;
 $X_{C3} = 35,08 / 3 = 11,69$;
 $X_{L3} = 1,75 \times 3 = 5,25$
- Harmonisa tingkat 5;
 $X_{C5} = 35,08 / 5 = 7,016$;
 $X_{L5} = 1,75 \times 5 = 8,75$
- Harmonisa tingkat 7;
 $X_{C7} = 35,08 / 7 = 5,011$;
 $X_{L7} = 1,75 \times 7 = 12,25$

Dari hasil perhitungan diatas telah didapat nilai impedansi XC dan XL untuk setiap tingkatan harmonisa. Telah disebutkan diawal, standar IEC EN 61000-2-2, kenaikan tegangan untuk setiap tingkatan harmonisa adalah:

- $U_1 = \%106 \times U_N = 1,06 \times 400 = 424 \text{ V}$
- $U_3 = \%0.5 \times U_N = 0,005 \times 400 = 2 \text{ V}$
- $U_5 = \%5 \times U_N = 0,05 \times 400 = 20 \text{ V}$
- $U_7 = \%5 \times U_N = 0,05 \times 400 = 20 \text{ V}$

Nilai Arus untuk setiap tingkatan harmonisa diatas adalah: • $I_{h1} = U_1 / (1.732 \times |X_L - X_C)$.

THD ARUS SUMBER SISTEM TANPA FILTER



Gambar 6. Single Line Diagram Sistem tanpa Filter

Tabel 3. THD arus sumber sistem tanpa filter

| Orde Harmonisa ke-n | Magnitude Arus (Ampere) | Terhadap Arus Fundamental |
|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| 5 | 22,914 | 17,745 |
| 7 | 11,392 | 8,822 |
| 11 | 9,072 | 7.025 |
| 13 | 6,206 | 4,806 |
| 17 | 5,564 | 4,308 |
| 19 | 4,373 | 3,386 |
| 23 | 3,935 | 3,047 |
| 25 | 3,251 | 2,517 |
| 29 | 2,974 | 2,301 |
| 31 | 2,525 | 1,955 |

Data hasil simulasi:

Arus fundamental (50Hz) = 129.129 Ampere

Vsrms = 204,198 Volt

Isrms = 96,7122 Ampere

PF = 96,7122

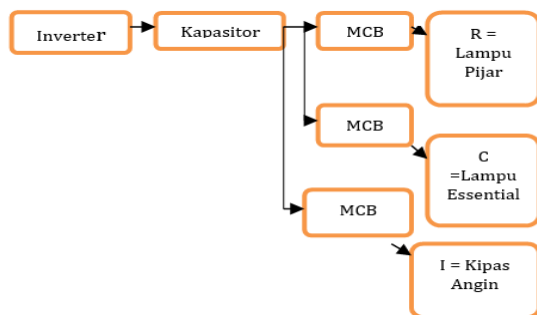
$$I_{s1\text{ rms}} = \frac{I_s}{\sqrt{2}} = \frac{129,129\text{ A}}{\sqrt{2}}$$

$I_{s1\text{ rms}} = 3079,91\text{ Amp}$

$$THDi = \left[\left(\frac{96,7122}{91,3079} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \times 100\%$$

THDi = 34,91 %

THD ARUS SUMBER SISTEM DENGAN FILTER AKTIF



Gambar 7. Single Line Diagram sumber dengan Filter Aktif

Tabel 4 Hasil pengukuran dan perhitungan sistem dengan filter aktif

| Besaran yang diukur | Nilai |
|---------------------|-------------|
| Daya Aktif (Watt) | 38731,8496 |
| Daya Reaktif (VAR) | 6229,7353 |
| Daya Nyata (VA) | 39229,65429 |
| Faktor Daya | 0,9873 |
| VSms (Volt) | 204,235 |
| ISms (Ampere) | 192,083 |
| THD Arus Sumber (%) | 28,87 |

SIMPULAN

Dari hasil uji coba yang dilakukan maka dapat disimpulkan, Nilai frekuensi untuk setiap tingkatan harmonisa adalah kelipatan tingkatan harmonisa dikali dengan nilai frekuensi fundamental. Nilai Impedansi Kapasitor XC dan nilai Impedansi Reaktor XL untuk tingkatan harmonisa sebagai berikut:

- Harmonisa tingkat 1;
 - XC1 = 35,08
 - XL1 = 1,75
- Harmonisa tingkat 3;
 - XC3 = 35,08 / 3 = 11,69
 - XL3 = 1,75 x 3 = 5,25
- Harmonisa tingkat 5;
 - XC5 = 35,08 / 5 = 7,016
 - XL5 = 1,75 x 5 = 8,75
- Harmonisa tingkat 7;
 - XC7 = 35,08 / 7 = 5,011
 - XL7 = 1,75 x 7 = 12,25

Perbaikan faktor daya dengan kapasitor yang terpasang seri dengan reactor, maka tegangan kapasitor yang dipakai adalah 538,921 V dengan nilai reactor 8 %. Apabila nilai kapasitor dengan tegangan 538,921 V tidak ada dipasaran, maka dipilih nilai tegangan kapasitor yang lebih besar dan mendekati nilai 538,921 V tersebut. Tegangan kapasitor yang mendekati adalah 550V, maka nilai kVAR yang sebelumnya adalah 12 kVAR harus

disesuaikan kembali dengan nilai tegangan kapasitor 550 V tersebut. Dari hasil perhitungan didapat 86,412 kVAR. Sehingga apabila menggunakan kapasitor dengan satuan 54 kVAR /step pada tegangan 434,783 V, dan reactor 8% terpasang seri dengan nilai impedansi reaktor 1,75 ohm, maka arus maximum yang akan mengalir adalah 10,25 A. Perlu dilakukan penyesuaian terhadap tegangan dan arus harmonisa sehingga untuk kapasitor tersebut, dikarenakan terhubung seri dengan reaktor, diperlukan rating kapasitor sebesar 550 Volt dengan daya reaktif sebesar 86,412 kVAR.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, A. S., El-Sehiemy, R. A., Abou El-Ela, A., Ali, E. S., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F. (2021). Optimal harmonic mitigation in distribution systems with inverter based distributed generation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(2).
- Alghamdi, S., Sindi, H. F., Al-Durra, A., Alhussainy, A. A., Rawa, M., Kotb, H., & AboRas, K. M. (2023). Reduction in Voltage Harmonics of Parallel Inverters Based on Robust Droop Controller in Islanded Microgrid. *Mathematics*, 11(1).
- Gharani Khajeh, K., Solatalkaran, D., Zare, F., & Mithulananthan, N. (2021). An enhanced full-feedforward strategy to mitigate output current harmonics in grid-tied inverters. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 15(5).
- Islam, J., Meraj, S. T., Masaoud, A., Mahmud, M. A., Nazir, A., Kabir, M. A., Hossain, M. M., & Mumtaz, F. (2021). Opposition-Based Quantum Bat Algorithm to Eliminate Lower-Order Harmonics of Multilevel Inverters. *IEEE Access*, 9.
- Kristi, A. A., Susanto, B., Risdiyanto, A., Junaedi, A., Muqorobin, A., Rachman, N. A., & Santosa, H. P. (2021). Selection Method of Modulation Index and Frequency ratio for Getting the SPWM Minimum Harmonic of Single Phase Inverter. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 9(1).
- Sumithira, T. R., & Nirmal Kumar, A. (2013). Elimination of harmonics in multilevel inverters connected to solar photovoltaic systems using ANFIS: An experimental case study. *Journal of Applied Research and Technology*, 11(1).
- Yang, D., Wang, X., & Blaabjerg, F. (2018). Sideband Harmonic Instability of Paralleled Inverters with Asynchronous Carriers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(6).