

ANALISIS PENGARUH NILAI TAHANAN PEMBUMIHAN TITIK NETRAL TRANSFORMATOR TERHADAP PERUBAHAN THD ARUS DAN RUGI-RUGI DAYA DI RSUD KLUNGKUNG

I G.B. Satcitananda P¹, I W. Rinas², I G.N. Janardana³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Bali
email: nathaschoovenz@gmail.com¹, rinan@unud.ac.id², janardana@ee.unud.ac.id³

Abstrak

Harmonisa menyebabkan meningkatnya arus yang mengalir pada kawat netral akibat penggunaan beban non linier yang tidak seimbang. Pada penelitian ini dilakukan simulasi THD arus (THDi) menggunakan perangkat lunak *Simulink* MATLAB dan perhitungan rugi-rugi daya. Hasil simulasi THDi pada kondisi *existing* menunjukkan persentase pada fasa R sebesar 17,27%, fasa S 16,40%, fasa T 16,24% dengan arus yang mengalir pada kawat netral sebesar 19,64 A. Berdasarkan hasil simulasi dengan tahanan pembumihan 11 Ω menunjukkan persentase THDi fasa R 15,69%, fasa S 14,70%, fasa T 9,83% dan arus yang mengalir pada kawat netral adalah 1,013 A. Saat tahanan pembumihan diubah menjadi 8 Ω THDi fasa R sebesar 15,62%, fasa S 14,67%, fasa T 9,81% dengan arus yang mengalir pada kawat netral 1,297 A. Sedangkan saat tahanan pembumihan diturunkan menjadi 4 Ω THDi fasa R 13,57%, fasa S 14,51%, fasa T 9,80% dan arus yang mengalir pada kawat netral sebesar 2,518 A. Rugi-rugi daya pada transformator satu saat kondisi *existing* adalah sebesar 8,796 kW, sedangkan saat tahanan pembumihan 11 Ω sebesar 6,079 kW, saat tahanan pembumihan 8 Ω sebesar 6,032 kW, dan saat 4 Ω sebesar 5,880 kW.

Kata Kunci: *Harmonisa, Tahanan Pembumihan, I_{netral} , Rugi-rugi Daya*

Abstract

Harmonics causes an increase in the current flowing in the neutral wire due to the use of unbalanced non-linear loads. THDi simulation was conducted in this study using MATLAB Simulink software and calculating power losses. Based on the measurement results it is known that THDi transformer one exceeds the standards set by IEEE 519-2014. THDi simulation results in the existing conditions show the percentage of phase R of 17.27%, S phase of 16.40%, phase T of 16.24% with a current flowing on a neutral wire of 19.64 A. Based on the results of simulations with earth resistance 11 Ω shows the percentage of THDi in the R phase 15.69%, S phase 14.70%, T phase 9.83% and the current flowing on the neutral wire is 1.013 A. When the earth resistance is changed to 8 Ω THDi in the R phase by 15.62%, the phase S 14.67%, T phase 9.81% with current flowing on neutral wire 1,297 A. While the earth resistance is reduced to 4 Ω THDi in the R phase 13.57%, S phase 14.51%, T phase 9.80% and the current flowing on the neutral wire is 2,518 A. The power losses in the one-time transformer when the existing conditions are 8,796 kW, while the earth resistance 11 Ω is 6,079 kW, while the ground resistance 8 Ω is 6,032 kW, and when 4 Ω is 5,880 kW.

Keywords: *Harmonics, Earth Resistance, Neutral Current, Power Losses*

I. PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk menyebabkan kebutuhan energi listrik semakin meningkat, sehingga dibutuhkan kontinuitas dan kualitas energi listrik yang baik. Harmonisa merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kualitas daya listrik. Harmonisa merupakan gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Pada sistem tenaga listrik, daya yang didistribusikan adalah pada level tegangan dengan frekuensi tunggal (50 / 60 Hz) [1], tetapi karena perkembangan beban listrik yang semakin pesat, terutama penggunaan beban non linier akan menimbulkan perubahan pada gelombang sinusnya.

Sistem tenaga listrik tidak luput dari permasalahan ketidakseimbangan beban serta harmonisa. Ketidakseimbangan beban pada tiap fasa mengakibatkan adanya arus yang mengalir pada titik netral [2], sehingga dibutuhkan sistem pembumihan yang berfungsi sebagai pengamanan tenaga listrik, gedung, peralatan dan juga manusia.

Sistem tenaga listrik RSUD Kabupaten Klungkung disuplai oleh dua buah transformator distribusi 20 kV / 400 V yang masing-masing kapasitasnya 200 kVA. Transformator satu memiliki sebuah MDP (*Main Distribution Panel*) yang kemudian dialirkan ke 18 buah SDP (*Sub-Distribution Panel*) [2]. Kondisi THDi transformator satu menunjukkan pada fasa R 17,20%, fasa S = 15,28% dan fasa T = 17,71

Penelitian ini menganalisis pengaruh nilai tahanan pembumian titik netral transformator terhadap perubahan THDi menggunakan perangkat lunak *Simulink MATLAB* dan analisis rugi-rugi daya pada RSUD Klungkung saat beban puncak pada MDP transformator satu.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Pembumian (*Grounding*)

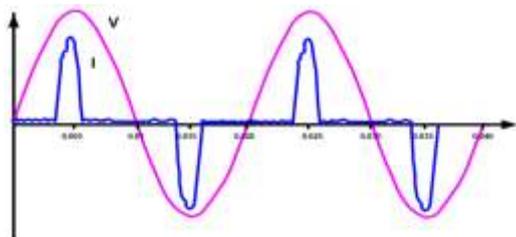
Sistem pembumian digambarkan sebagai hubungan antara suatu sistem tenaga listrik dan bumi. Arus lebih akibat sambaran petir maupun tegangan asing lainnya pada suatu sistem akan dialirkan ke tanah. Kelayakan sistem pembumian harus bisa mendapatkan nilai maksimal 5 ohm [4]. Elektroda pembumian terdiri dari tiga jenis yaitu elektroda pipa, batang, dan pelat. Sedangkan pemasangan elektroda dapat dilakukan dengan dua metode yaitu pemasangan vertikal dengan cara dipasang tegak lurus ke dalam tanah dan horizontal dengan cara pemasangan sejajar dengan tanah.

B. Sistem Tiga Fasa Empat Kawat

Sistem tiga fasa empat kawat terdiri dari fasa R, S, dan T dan satu kawat netral dan tergolong dalam sistem tegangan rendah yang disuplai dari sumber tegangan tiga fasa. Pada keadaan beban seimbang arus yang terjadi pada titik netral adalah nol, sedangkan dalam keadaan tidak seimbang arus yang mengalir pada titik netral adalah tidak sama dengan nol [5].

C. Karakteristik Beban

Pada sistem distribusi tenaga listrik terdapat dua jenis beban yang memiliki kombinasi yaitu beban linier dan non linier. Beban linier merupakan beban yang nilai impedansinya konstan dan arus selalu berbanding lurus dengan tegangan setiap waktunya. Sedangkan pada beban non linier nilai impedansinya tidak konstan dalam setiap periode masukan dan nilai arusnya tidak berbanding lurus dengan tegangan setiap waktunya. Gelombang arus yang dihasilkan beban non linier tidak sama dengan gelombang tegangannya, dengan meluasnya penggunaan beban non linier dapat menyebabkan terjadinya distorsi [6].



Gambar 2.1 Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan dengan Beban Non linier
Sumber: Amalia dkk, 2015

Dalam memenuhi kebutuhan energi listrik diperlukan keadaan beban yang seimbang. Keadaan beban yang tidak seimbang menyebabkan adanya arus yang mengalir pada titik netral, besarnya arus yang mengalir bergantung dari besarnya faktor ketidakseimbangan [7].

D. Harmonisa

Harmonisa merupakan salah satu gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik yang salah satunya disebabkan oleh penggunaan beban non linier yang mana gelombang sinusoidal berfrekuensi tinggi ini frekuensinya merupakan kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya [1]. Perhitungan THDi dapat dilakukan dengan persamaan (1).

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \% \quad (1)$$

E. Rugi-rugi Transformator Akibat Harmonisa

Secara keseluruhan dampak umum dari pengaruh harmonisa terhadap transformator adalah timbulnya panas berlebih pada kawat netral dan transformator serta dapat menyebabkan penurunan kapasitas pada transformator (*derating transformer*). Frekuensi harmonisa yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadinya rugi-rugi daya [8]. Terdapat tiga macam rugi-rugi yang dapat menjadi penyebab *overheating* pada transformator akibat pengaruh harmonisa arus antara lain [1]:

1. Rugi tembaga (P_{cu}) menyebabkan terjadinya pemanasan pada kawat tembaga kumparan transformator. Dalam satuan kW dihitung melalui:

$$P_{cu} (kW) = P_{cu} (p.u) \times P_{base\ 1\ \phi} \quad (2)$$

2. Rugi Histerisis yaitu rugi pada inti besi akibat adanya *alternating flux* (fluks bolak balik). Semakin tinggi tingkat distorsi akibat harmonisa tegangan maka semakin besar pula rugi histerisis
3. Rugi arus eddy merupakan rugi-rugi terjadi pada inti besi. Perhitungan rugi-rugi arus eddy dalam satuan kW dapat dihitung melalui persamaan:

$$P_e (kW) = P_e (p.u) \times P_{base\ 1\ \phi} \quad (3)$$

Rugi transformator atau yang biasa disebut *load loss* (P_{LL}) memiliki dua komponen yang dipertimbangkan yaitu rugi tembaga dan rugi arus eddy [1].

$$P_{LL} = (I^2 \times R) + P_{EC} \quad (4)$$

I^2R merupakan rugi tembaga yang proporsional atau sebanding dengan nilai arus rms, sedangkan rugi arus eddy (*eddy current loss*) merupakan rugi yang proporsional atau sebanding dengan kuadrat arus dengan frekuensi. *Eddy current loss* (P_{EC}) dihitung melalui persamaan (5) [1].

$$P_{EC} = K_{EC} \times I^2 \times h^2 \quad (5)$$

Dalam satuan per unit (p.u), *load loss* (P_{LL}) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (6) [1]:

$$P_{LL} = \sum I_h^2 + (\sum I_h^2 \times h^2) \times P_{EC-R}(p.u) \quad (6)$$

Dimana:

- h = harmonisa (%)
- Ih = Arus harmonisa (A)

$$P_{EC-R} = \text{Eddy Current Loss Factor}$$

4. Pemodelan dan Simulasi MATLAB

Pemodelan serta simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak *Simulink* MATLAB. Kemudian dibuat model rangkaian sistem kelistrikan RSUD Kabupaten Klungkung menggunakan beban non linier yang tidak seimbang. Simulasi dilakukan dalam dua kondisi yaitu dengan kondisi *existing* dan dengan tahanan pembumian bervariasi yaitu 11Ω, 8Ω, dan 4Ω.

III. METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada RSUD Klungkung yang berlokasi di Jl. Flamboyan No.40 Semarang Kauh, Kecamatan Klungkung, Kabupaten Klungkung. Penelitian dilakukan pada bulan Mei 2019 sampai selesai.

B. Analisis Data

Prosedur analisis data dilakukan sebagai berikut:

- Data *single line diagram*
- Data jumlah beban terpasang
- Data pengukuran pada MDP, data pengukuran THDi masing-masing fasa, data beban penuh diantaranya tegangan, arus, $\cos \phi$, daya aktif, daya semu dan losses
- Menentukan standar THDi berdasarkan SC_{Ratio}
- Pemodelan sistem beban menggunakan MATLAB
- Menghitung nilai parameter sumber tiga fasa
- Menghitung RLC beban
- Membuat simulasi dengan kondisi *existing* dan tahanan pembumian yang bervariasi
- Menganalisis pengaruh nilai tahanan pembumian terhadap THDi, I_{netral} dan losses transformator

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi THDi dan I_{netral} Saat Kondisi Existing

Dengan menggunakan metode FFT diperoleh hasil simulasi THDi pada kondisi *existing* sebagai berikut:

| Sampling time = 2.40020e-05 s | | Sampling time = 2.40020e-05 s | |
|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| DC component = 1.453 | Fundamental = 35.15 peak (67.3 rms) | DC component = 0.1918 | Fundamental = 101.5 peak (181.46 rms) |
| THD = 17.27% | THD = 17.27% | DC component = 0.1918 | Fundamental = 101.5 peak (181.46 rms) |
| 0 Hz (DC): 1.00% 270.0° | 0 Hz (DC): 0.24% 90.0° | 50 Hz (Fund): 100.00% 96.7° | 50 Hz (Fund): 100.00% 96.1° |
| 50 Hz (h2): 2.26% 94.6° | 100 Hz (h2): 1.93% -84.4° | 100 Hz (h2): 2.26% 73.0° | 150 Hz (h3): 18.96% 6.0° |
| 100 Hz (h2): 25.00% 210.3° | 200 Hz (h4): 1.28% 49.2° | 150 Hz (h3): 18.96% 6.0° | 200 Hz (h4): 4.00% -62.2° |
| 150 Hz (h3): 0.04% 209.2° | 250 Hz (h5): 0.70% 24.6° | 200 Hz (h4): 4.00% -62.2° | 300 Hz (h6): 0.70% 24.6° |
| 200 Hz (h4): 0.04% 209.2° | 300 Hz (h6): 8.05% -20.1° | 250 Hz (h5): 4.00% -62.2° | 350 Hz (h7): 1.24% -71.4° |
| 250 Hz (h5): 5.54% 71.2° | 400 Hz (h8): 0.35% 40.2° | 300 Hz (h6): 8.05% -20.1° | 400 Hz (h8): 1.24% -71.4° |
| 300 Hz (h6): 0.35% 40.2° | 450 Hz (h9): 1.05% 10.4° | 350 Hz (h7): 1.24% -71.4° | 450 Hz (h9): 0.35% 40.2° |
| 350 Hz (h7): 1.05% 10.4° | 500 Hz (h10): 0.43% 110.2° | 400 Hz (h8): 0.43% 110.2° | 500 Hz (h10): 0.24% 207.5° |
| 400 Hz (h8): 0.43% 110.2° | 550 Hz (h11): 0.24% 177.5° | 450 Hz (h9): 1.05% 10.4° | 550 Hz (h11): 0.24% 177.5° |
| 450 Hz (h9): 1.05% 10.4° | 600 Hz (h12): 0.24% 177.5° | 500 Hz (h10): 0.43% 110.2° | 600 Hz (h12): 0.24% 177.5° |
| 500 Hz (h10): 0.43% 110.2° | 650 Hz (h13): 0.24% 177.5° | 550 Hz (h11): 0.24% 177.5° | 650 Hz (h13): 0.24% 177.5° |
| 550 Hz (h11): 0.24% 177.5° | 700 Hz (h14): 0.24% 177.5° | 600 Hz (h12): 0.24% 177.5° | 700 Hz (h14): 0.24% 177.5° |
| 600 Hz (h12): 0.24% 177.5° | 750 Hz (h15): 0.24% 177.5° | 650 Hz (h13): 0.24% 177.5° | 750 Hz (h15): 0.24% 177.5° |
| 650 Hz (h13): 0.24% 177.5° | 800 Hz (h16): 0.24% 177.5° | 700 Hz (h14): 0.24% 177.5° | 800 Hz (h16): 0.24% 177.5° |
| 700 Hz (h14): 0.24% 177.5° | 850 Hz (h17): 0.24% 177.5° | 750 Hz (h15): 0.24% 177.5° | 850 Hz (h17): 0.24% 177.5° |
| 750 Hz (h15): 0.24% 177.5° | 900 Hz (h18): 0.24% 177.5° | 800 Hz (h16): 0.24% 177.5° | 900 Hz (h18): 0.24% 177.5° |
| 800 Hz (h16): 0.24% 177.5° | 950 Hz (h19): 0.24% 177.5° | 850 Hz (h17): 0.24% 177.5° | 950 Hz (h19): 0.24% 177.5° |
| 850 Hz (h17): 0.24% 177.5° | 1000 Hz (h20): 0.24% 177.5° | 900 Hz (h18): 0.24% 177.5° | 1000 Hz (h20): 0.24% 177.5° |
| 900 Hz (h18): 0.24% 177.5° | | 950 Hz (h19): 0.24% 177.5° | |
| 950 Hz (h19): 0.24% 177.5° | | 1000 Hz (h20): 0.24% 177.5° | |
| 1000 Hz (h20): 0.24% 177.5° | | | |

| Sampling time = 2.40020e-05 s | | |
|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| DC component = 1.070 | Fundamental = 106 peak (74.96 rms) | THD = 16.31% |
| 0 Hz (DC): 2.26% 96.0° | 50 Hz (Fund): 100.00% 178.7° | 100 Hz (h2): 2.26% 127.5° |
| 50 Hz (Fund): 100.00% 178.7° | 100 Hz (h2): 2.26% 127.5° | 150 Hz (h3): 18.96% 107.5° |
| 100 Hz (h2): 2.26% 127.5° | 150 Hz (h3): 18.96% 107.5° | 200 Hz (h4): 4.00% 88.8° |
| 150 Hz (h3): 18.96% 107.5° | 200 Hz (h4): 4.00% 88.8° | 250 Hz (h5): 4.00% -20.0° |
| 200 Hz (h4): 4.00% 88.8° | 250 Hz (h5): 4.00% -20.0° | 300 Hz (h6): 2.12% 55.3° |
| 250 Hz (h5): 4.00% -20.0° | 300 Hz (h6): 2.12% 55.3° | 350 Hz (h7): 2.14% 55.5° |
| 300 Hz (h6): 2.12% 55.3° | 350 Hz (h7): 2.14% 55.5° | 400 Hz (h8): 1.53% 15.5° |
| 350 Hz (h7): 2.14% 55.5° | 400 Hz (h8): 1.53% 15.5° | 450 Hz (h9): 1.74% -46.4° |
| 400 Hz (h8): 1.53% 15.5° | 450 Hz (h9): 1.74% -46.4° | 500 Hz (h10): 1.73% 17.8° |
| 450 Hz (h9): 1.74% -46.4° | 500 Hz (h10): 1.73% 17.8° | 550 Hz (h11): 1.62% 17.3° |
| 500 Hz (h10): 1.73% 17.8° | 550 Hz (h11): 1.62% 17.3° | 600 Hz (h12): 1.17% -14.3° |
| 550 Hz (h11): 1.62% 17.3° | 600 Hz (h12): 1.17% -14.3° | 650 Hz (h13): 1.05% -25.4° |
| 600 Hz (h12): 1.17% -14.3° | 650 Hz (h13): 1.05% -25.4° | 700 Hz (h14): 1.05% -16.5° |
| 650 Hz (h13): 1.05% -25.4° | 700 Hz (h14): 1.05% -16.5° | 750 Hz (h15): 1.04% -28.0° |
| 700 Hz (h14): 1.05% -16.5° | 750 Hz (h15): 1.04% -28.0° | 800 Hz (h16): 0.81% -40.8° |
| 750 Hz (h15): 1.04% -28.0° | 800 Hz (h16): 0.81% -40.8° | 850 Hz (h17): 0.64% -60.2° |
| 800 Hz (h16): 0.81% -40.8° | 850 Hz (h17): 0.64% -60.2° | 900 Hz (h18): 0.40% 45.2° |
| 850 Hz (h17): 0.64% -60.2° | 900 Hz (h18): 0.40% 45.2° | 950 Hz (h19): 0.24% 22.7° |
| 900 Hz (h18): 0.40% 45.2° | 950 Hz (h19): 0.24% 22.7° | |
| 950 Hz (h19): 0.24% 22.7° | | |

(c)

Gambar 4.1 Hasil simulasi THDi dan I_{netral} kondisi existing

Hasil simulasi saat kondisi *existing* menunjukkan persentase THDi pada fasa R 17,27%, fasa S 16,40%, fasa T 16,24% dan arus yang mengalir pada kawat netral sebesar 19,64 A.

B. Hasil Simulasi THDi dan I_{netral} dengan Tahanan Pembumian Bervariasi

1. Tahanan Pembumian 11Ω

Dengan menggunakan metode FFT diperoleh hasil simulasi THDi pada tahanan pembumian 11Ω sebagai berikut:

| Sampling time = 4.70010e-05 s | | Sampling time = 4.70010e-05 s | |
|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| DC component = 5.188 | Fundamental = 146.5 peak (103.2 rms) | DC component = 3.112 | Fundamental = 119.0 peak (84.50 rms) |
| THD = 15.05% | THD = 15.05% | DC component = 3.112 | Fundamental = 119.0 peak (84.50 rms) |
| 0 Hz (DC): 8.21% 270.0° | 0 Hz (DC): 2.80% 90.0° | 50 Hz (Fund): 100.00% 43.7° | 50 Hz (Fund): 100.00% -70.4° |
| 50 Hz (Fund): 100.00% 43.7° | 100 Hz (h2): 2.26% 73.0° | 100 Hz (h2): 2.26% 73.0° | 150 Hz (h3): 18.96% 6.0° |
| 100 Hz (h2): 2.26% 73.0° | 150 Hz (h3): 18.96% 6.0° | 150 Hz (h3): 18.96% 6.0° | 200 Hz (h4): 4.00% -62.2° |
| 150 Hz (h3): 18.96% 6.0° | 200 Hz (h4): 4.00% -62.2° | 200 Hz (h4): 4.00% -62.2° | 250 Hz (h5): 4.00% -62.2° |
| 200 Hz (h4): 4.00% -62.2° | 250 Hz (h5): 4.00% -62.2° | 250 Hz (h5): 4.00% -62.2° | 300 Hz (h6): 2.12% 55.3° |
| 250 Hz (h5): 4.00% -62.2° | 300 Hz (h6): 2.12% 55.3° | 300 Hz (h6): 2.12% 55.3° | 350 Hz (h7): 2.14% 55.5° |
| 300 Hz (h6): 2.12% 55.3° | 350 Hz (h7): 2.14% 55.5° | 350 Hz (h7): 2.14% 55.5° | 400 Hz (h8): 1.53% 15.5° |
| 350 Hz (h7): 2.14% 55.5° | 400 Hz (h8): 1.53% 15.5° | 400 Hz (h8): 1.53% 15.5° | 450 Hz (h9): 1.74% -46.4° |
| 400 Hz (h8): 1.53% 15.5° | 450 Hz (h9): 1.74% -46.4° | 450 Hz (h9): 1.74% -46.4° | 500 Hz (h10): 1.73% 17.8° |
| 450 Hz (h9): 1.74% -46.4° | 500 Hz (h10): 1.73% 17.8° | 500 Hz (h10): 1.73% 17.8° | 550 Hz (h11): 1.62% 17.3° |
| 500 Hz (h10): 1.73% 17.8° | 550 Hz (h11): 1.62% 17.3° | 550 Hz (h11): 1.62% 17.3° | 600 Hz (h12): 1.17% -14.3° |
| 550 Hz (h11): 1.62% 17.3° | 600 Hz (h12): 1.17% -14.3° | 600 Hz (h12): 1.17% -14.3° | 650 Hz (h13): 1.05% -25.4° |
| 600 Hz (h12): 1.17% -14.3° | 650 Hz (h13): 1.05% -25.4° | 650 Hz (h13): 1.05% -25.4° | 700 Hz (h14): 1.05% -16.5° |
| 650 Hz (h13): 1.05% -25.4° | 700 Hz (h14): 1.05% -16.5° | 700 Hz (h14): 1.05% -16.5° | 750 Hz (h15): 1.04% -28.0° |
| 700 Hz (h14): 1.05% -16.5° | 750 Hz (h15): 1.04% -28.0° | 750 Hz (h15): 1.04% -28.0° | 800 Hz (h16): 0.81% -40.8° |
| 750 Hz (h15): 1.04% -28.0° | 800 Hz (h16): 0.81% -40.8° | 800 Hz (h16): 0.81% -40.8° | 850 Hz (h17): 0.64% -60.2° |
| 800 Hz (h16): 0.81% -40.8° | 850 Hz (h17): 0.64% -60.2° | 850 Hz (h17): 0.64% -60.2° | 900 Hz (h18): 0.40% 45.2° |
| 850 Hz (h17): 0.64% -60.2° | 900 Hz (h18): 0.40% 45.2° | 900 Hz (h18): 0.40% 45.2° | 950 Hz (h19): 0.24% 22.7° |
| 900 Hz (h18): 0.40% 45.2° | 950 Hz (h19): 0.24% 22.7° | 950 Hz (h19): 0.24% 22.7° | |
| 950 Hz (h19): 0.24% 22.7° | | | |

(a)

(b)

| Sampling time = 4.70010e-05 s | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| DC component = 6.420 | Fundamental = 137.7 peak (90.31 rms) | THD = 9.88% |
| 0 Hz (DC): 5.02% 90.0° | 50 Hz (Fund): 100.00% 178.7° | 100 Hz (h2): 2.43% 100.0° |
| 50 Hz (Fund): 100.00% 178.7° | 100 Hz (h2): 2.43% 100.0° | 150 Hz (h3): 8.31% 124.1° |
| 100 Hz (h2): 2.43% 100.0° | 150 Hz (h3): 8.31% 124.1° | 200 Hz (h4): 0.38% 31.0° |
| 150 Hz (h3): 8.31% 124.1° | 200 Hz (h4): 0.38% 31.0° | 250 Hz (h5): 2.14% 26.7° |
| 200 Hz (h4): 0.38% 31.0° | 250 Hz (h5): 2.14% 26.7° | 300 Hz (h6): 0.45% 81.3° |
| 250 Hz (h5): 2.14% 26.7° | 300 Hz (h6): 0.45% 81.3° | 350 Hz (h7): 1.85% 166.5° |
| 300 Hz (h6): 0.45% 81.3° | 350 Hz (h7): 1.85% 166.5° | 400 Hz (h8): 0.73% 10.0° |
| 350 Hz (h7): 1.85% 166.5° | 400 Hz (h8): 0.73% 10.0° | 450 Hz (h9): 1.60% 48.9° |
| 400 Hz (h8): 0.73% 10.0° | 450 Hz (h9): 1.60% 48.9° | 500 Hz (h10): 0.62% -6.8° |
| 450 Hz (h9): 1.60% 48.9° | 500 Hz (h10): 0.62% -6.8° | 550 Hz (h11): 0.35% 117.5° |
| 500 Hz (h10): 0.62% -6.8° | 550 Hz (h11): 0.35% 117.5° | 600 Hz (h12): 0.30% -18.9° |
| 550 Hz (h11): 0.35% 117.5° | 600 Hz (h12): 0.30% -18.9° | 650 Hz (h13): 0.80% 27.8° |
| 600 Hz (h12): 0.30% -18.9° | 650 Hz (h13): 0.80% 27.8° | 700 Hz (h14): 0.74% -20.2° |
| 650 Hz (h13): 0.80% 27.8° | 700 Hz (h14): 0.74% -20.2° | 750 Hz (h15): 0.14% -70.2° |
| 700 Hz (h14): 0.74% -20.2° | 750 Hz (h15): 0.14% -70.2° | 800 Hz (h16): 0.72% -41.5° |
| 750 Hz (h15): 0.14% -70.2° | 800 Hz (h16): 0.72% -41.5° | 850 Hz (h17): 0.45% 10.0° |
| 800 Hz (h16): 0.72% -41.5° | 850 Hz (h17): 0.45% 10.0° | 900 Hz (h18): 0.66% -60.5° |
| 850 Hz (h17): 0.45% 10.0° | 900 Hz (h18): 0.66% -60.5° | 950 Hz (h19): 0.38% -81.6° |
| 900 Hz (h18): 0.66% -60.5° | 950 Hz (h19): 0.38% -81.6° | |
| 950 Hz (h19): 0.38% -81.6° | | |

(c)

Gambar 4.2 Hasil simulasi THDi dan I_{netral} dengan tahanan pembumian 11Ω

Pada saat tahanan pembumian sebesar 11Ω persentase THDi pada fasa R sebesar 15,69%, fasa S, 14,70%, fasa T 9,83% dan arus yang mengalir pada kawat netral sebesar 1,013 A.

Hasil simulasi dengan tahanan pembumian 8Ω dan 4Ω dapat dilihat pada Tabel I.

Tabel I. Hasil Simulasi Tahanan Pembumian Bervariasi

| Tahanan Pembumian | Fasa | % THDi | I_{netral} (A) |
|-------------------|------|--------|------------------|
| 11Ω | R | 15,69 | 1,013 |
| | S | 14,70 | |
| | T | 9,83 | |
| 8Ω | R | 15,62 | 1,297 |
| | S | 14,67 | |
| | T | 9,81 | |
| 4Ω | R | 15,37 | 2,518 |
| | S | 14,51 | |
| | T | 9,80 | |

C. Perbandingan THDi dan I_{netral}

Perbandingan hasil simulasi THDi dan I_{netral} menggunakan metode FFT pada perangkat lunak *simulink* MATLAB saat kondisi *existing* dan dengan tahanan pembumian bervariasi yaitu 11Ω, 8Ω dan 4Ω dapat dilihat pada Tabel II.

Tabel II. Perbandingan THDi dan I_{netral} Kondisi *Existing* dan dengan Tahanan Pembumian

| Kondisi | Fasa | THDi (%) | I_{netral} (A) |
|-----------------|------|----------|------------------|
| <i>Existing</i> | R | 17,27 | 19,64 |
| | S | 16,40 | |
| | T | 16,24 | |
| 11Ω | R | 15,69 | 1,013 |
| | S | 14,70 | |
| | T | 9,83 | |
| 8Ω | R | 15,62 | 1,297 |
| | S | 14,67 | |
| | T | 9,81 | |
| 4Ω | R | 15,37 | 2,518 |
| | S | 14,51 | |
| | T | 9,80 | |



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Hasil Simulasi THDi dan I_{netral} saat Kondisi *Existing* dan Dengan Tahanan Pembumian

Seperti pada Tabel II, grafik hasil simulasi THDi dan I_{netral} kondisi *existing* dan tahanan pembumian bervariasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, persentase THDi kondisi *existing* menunjukkan fasa R 17,27%, S 16,40%, T 16,24% dan arus yang mengalir pada kawat netral sebesar 19,64 A. Sedangkan hasil simulasi THDi pada kondisi tahanan pembumian 11Ω menunjukkan persentase pada fasa R 15,69%, S 15,62%, T 14,51% dan arus yang mengalir pada kawat netral sebesar 1,013 A. Saat tahanan pembumian diturunkan menjadi 8Ω THDi fasa R 15,62%, S 14,67%, T 9,81% dan arus yang mengalir pada kawat netral 1,297 A. Saat tahanan pembumian kembali diturunkan menjadi 4Ω menunjukkan persentase THDi fasa R sebesar 15,37%, fasa S 14,51%, fasa T 9,80% dengan arus yang mengalir pada kawat netral sebesar 2,518 A.

D. Rugi-rugi Daya pada Transformator Akibat Harmonisa

Rugi akibat pengaruh harmonisa

Pengukuran pada transformator satu RSUD Klungkung menunjukkan:

$$S = 200 \text{ kVA}$$

$$\cos \phi = 0,93$$

sehingga dapat dihitung P_{base} satu fasa

$$P_{Base\phi} = \frac{200 \times 0,93}{\sqrt{3}} = 107,51 \text{ kW}$$

Analisis arus harmonisa fasa R kondisi *existing* pada orde ganjil 1 sampai orde 19 diperoleh pada Tabel III berikut:

Tabel III. Arus Harmonisa Orde Ganjil pada Fasa R dengan Beban Tidak Seimbang pada Kondisi *Existing*

| Orde Harmonisa | Ih (%) | Ih (A) | Ih (p.u) | Ih ² (p.u) | Ih ² pu*h ² |
|----------------|--------|--------|----------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1 | 100 | 70,71 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 15,86 | 11,215 | 0,159 | 0,025281 | 0,227529 |
| 5 | 5,54 | 3,917 | 0,056 | 0,003136 | 0,0784 |
| 7 | 1,95 | 1,379 | 0,019 | 0,000361 | 0,017689 |
| 9 | 1,97 | 1,393 | 0,020 | 0,0004 | 0,0324 |
| 11 | 0,61 | 0,431 | 0,006 | 0,000036 | 0,004356 |
| 13 | 0,85 | 0,601 | 0,008 | 0,000064 | 0,010816 |
| 15 | 0,36 | 0,255 | 0,004 | 0,000016 | 0,0036 |
| 17 | 0,4 | 0,283 | 0,004 | 0,000016 | 0,004624 |
| 19 | 0,25 | 0,177 | 0,003 | 0,000009 | 0,003249 |
| Total | | | | 1,029319 | 1,382663 |

Berdasarkan perhitungan arus harmonisa orde ganjil hingga orde ke-19, maka selanjutnya dapat dihitung nilai rugi-rugi berbeban (P_{LL}) melalui persamaan (6) berikut:

$$P_{LLR} = 1,029319 + 1,382663 \times 0,01 = 1,04314563 \text{ p.u}$$

0,01 merupakan faktor rugi *eddy-current* (P_{EC}). Seperti pada hasil perhitungan rugi-rugi berbeban fasa R pada Tabel V diketahui rugi-rugi tembaga mengalami peningkatan sebesar 0,029319 p.u, yang dalam satuan kW dapat dihitung dengan persamaan (2):

$$P_{Cu} (kW) = P_{Cu} (p.u) \times P_{base 1 \phi}$$

$$P_{Cu} (kW) = 0,029319 p.u \times 107,51 kW$$

$$P_{Cu} (kW) = 3,152 kW$$

Hasil perhitungan rugi *eddy current* akibat pengaruh harmonisa mengalami peningkatan sebesar 0,00382663 p.u. jika dalam satuan kW dihitung melalui persamaan (3):

$$P_e (kW) = P_e (p.u) \times P_{base 1 \phi}$$

$$P_e (kW) = 0,00382663 p.u \times 107,51 kW$$

$$P_e (kW) = 0,411 kW$$

Perhitungan rugi histerisis fasa R dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_h = K_h \times \sum_{h=1}^{\infty} i_h \times h$$

Tabel IV. Rugi Histerisis Fasa R pada Kondisi Existing

| Orde Harmonisa | I _h (A) | P _h (Watt) |
|----------------|--------------------|-----------------------|
| 1 | 70,71 | 18,385 |
| 3 | 11,251 | 8,748 |
| 5 | 3,917 | 5,092 |
| 7 | 1,379 | 2,510 |
| 9 | 1,393 | 3,260 |
| 11 | 0,431 | 1,233 |
| 13 | 0,601 | 2,031 |
| 15 | 0,255 | 0,995 |
| 17 | 0,283 | 1,251 |
| 19 | 0,177 | 0,874 |
| Total | | 44,378 |

Rugi histerisis fasa R total sebesar 0,044 kW. Perhitungan penambahan rugi-rugi fasa R akibat pengaruh harmonisa dapat dihitung melalui:

$$Losses_R = P_{Cu} + P_i$$

$$Losses_R = P_{Cu} + (P_e + P_h)$$

$$Losses_R = 3,152 + (0,411 + 0,044)$$

$$Losses_R = 3,607 kW$$

Hasil perhitungan rugi-rugi pada fasa S dan T yang dapat dilihat pada Tabel V sebagai berikut:

Tabel V. Penambahan Rugi Transformator Akibat Pengaruh Harmonisa.

| Fasa | P _{Cu} (kW) | P _e (kW) | P _h (kW) | Losses (kW) |
|--------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| R | 3,152 | 0,411 | 0,044 | 3,607 |
| S | 2,687 | 0,360 | 0,044 | 3,091 |
| T | 2,515 | 0,433 | 0,050 | 2,998 |
| Total Losses | | | | 8,796 |

Total penambahan rugi-rugi pada transformator saat kondisi *existing* akibat pengaruh harmonisa mengalami peningkatan sebesar 8,796 kW. Kemudian dapat dihitung persentase penambahan rugi-rugi daya akibat harmonisa:

$$Total Losses = \frac{Losses \text{ akibat harmonisa}}{P_{Base 3 \phi}} \times 100 \%$$

$$= \frac{8,796}{200 \times 0,93} \times 100 \%$$

$$= 4,729 \%$$

Dengan perhitungan yang sama, penambahan rugi-rugi akibat pengaruh harmonisa saat tahanan pembumian sebesar 11Ω, 8Ω dan 4Ω pada Tabel VI.

Tabel VI. Rugi-rugi Transformator Akibat Harmonisa

| Kondisi | Rugi-rugi dengan Pengaruh Harmonisa (kW) |
|----------|--|
| Existing | 8,796 |
| 11 Ω | 6,079 |
| 8 Ω | 6,032 |
| 4 Ω | 5,880 |



Gambar 4.4 Grafik perbandingan Losses Transformator RSUD Klungkung

Pada Grafik 4.4 perbandingan rugi-rugi daya akibat pengaruh harmonisa pada transformator satu saat kondisi *existing* menunjukkan angka 8,796 %, sedangkan dalam kondisi tahanan pembumian divariasikan sebesar 11 Ω rugi-rugi menunjukkan angka 6,079 %, saat tahanan pembumian sebesar 8 Ω menunjukkan angka 6,032 %, dan saat tahanan pembumian diturunkan menjadi 4 Ω, rugi-rugi pada transformator satu menunjukkan angka 5,880 %. Persentase rugi-rugi pada transformator menunjukkan angka yang lebih besar saat kondisi *existing* dibandingkan saat nilai tahanan pembumian divariasikan menjadi 11 Ω, 8 Ω dan 4 Ω.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

Pengaruh nilai tahanan pembumian titik netral transformator terhadap perubahan THD arus menyebabkan penurunan persentase THD arus, semakin rendah nilai tahanan pembumian yang diberikan maka persentase THD arus juga semakin rendah. Namun jika tahanan pembumian semakin kecil maka arus netral akan semakin besar.

Sedangkan rugi-rugi daya total pada transformator satu RSUD Kabupaten Klungkung dengan tahanan pembumian 11Ω , 8Ω , dan 4Ω menunjukkan penurunan, semakin rendah nilai tahanan pembumian berpengaruh terhadap rugi-rugi daya pada transformator

REFERENSI

- [1] Dugan, RC., McGranaghan, M.F., Santoso, S., Beaty, H.W. *Electrical Power System Quality-Second Edition*. The McGraw-Hill. 2004.
- [2] I.G.N Dwipayana, I.W. Rinas, I.M. Suartika, "Analisis THD dan Peningkatan Arus pada Kawat Netral Akibat Pengoperasian Beban Non Linier yang Tidak Seimbang pada Sistem Tenaga Listrik di RSUD Kabupaten Klungkung," *Teknologi Elektro*, Vol.16.
- [3] IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 519-2014
- [4] Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011); Badan Standardisasi Nasional.
- [5] Budiyanto, M., Berahim, H., Isnaeni, M. 2009. Studi Pengurangan Arus Harmonik Triplen dengan Menggunakan Tapis Seri dan Transformator *Zero Passing*. Fakultras Teknik UGM Yogyakarta.
- [6] Amalia, R. Nazir, R. "Pemodelan dan Simulasi Beban Non Linier 3 Fasa dengan Metoda Sumber Arus Harmonik". *Teknik Elektro Universitas Andalas*. Vol. 4, No. 2, September 2015
- [7] J.S. Setiadji, T. Machmudsyah, Y. Isnanto, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan *Losses* pada Trafo Distribusi," *Universitas Kristen Petra*, Vol. 6. 2006.
- [8] Zulkarnain, I., "Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Arus Netral, Rugi-rugi dan Penurunan Kapasitas pada Transformator Distribusi". *Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro*. 2009