

SIMULASI PEMBEBANAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI TIGA -FASE KAPASITAS 250 KVA

Abdul Hafid¹, Zainal Abidin²

¹ Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

² Prodi Teknik Elektronika Politeknik Negeri Ujung Pandang Makassar

e-mail: abdul.hafid@unismuh.ac.id¹, zainal_abidin@poliupg.ac.id²

ABSTRAK_ This paper presents the simulation results of a distribution transformer loading of 250 kVA, 3 phase, 380/220 V, 50 Hz with the Dyn5 vector group. The simulation is intended, firstly, to determine the efficiency of the transformer-based on information on no-load losses and losses under load conditions issued by the manufacturer. Then compare the results with the SPLN 50 standard. The results obtained are that the efficiency of the transformer understudy meets the requirements. The loading simulation also aims to determine the percentage of load unbalance or the percentage of unbalance current using 2 formulations. Based on the simulation results, it can be concluded that from the two methods used, the first method provides information on the percentage of load imbalance that is smaller than the second method for the same neutral current. The impact of the load imbalance on the distribution transformer is the emergence of a neutral current flowing from the neutral point of the transformer to the ground.

Keywords: distribution transformer, transformer efficiency, load imbalance, neutral current

INTISARI_Tulisan ini memaparkan hasil simulasi trafo distribusi pembebanan 250 kVA, 3 fase, 380/220 V, 50 Hz dengan kelompok vektor Dyn5. Simulasi dimaksudkan, pertama, untuk mengetahui efisiensi transformator berdasarkan informasi rugi-rugi tanpa beban dan rugi-rugi berbeban sesuai yang dikeluarkan oleh pabrikan. Kemudian hasilnya dibandingkan dengan standar SPLN 50. Hasil yang diperoleh adalah bahwa efisiensi transformator yang diteliti memenuhi syarat. Simulasi pembebanan juga bertujuan untuk mengetahui persentase ketidakseimbangan beban atau persentase ketidakseimbangan arus dengan menggunakan 2 formulasi. Berdasarkan hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa dari kedua metode yang digunakan, metode pertama memberikan informasi persentase ketidakseimbangan beban yang lebih kecil dibandingkan metode kedua untuk arus netral yang sama. Dampak dari ketidakseimbangan beban pada trafo distribusi adalah timbulnya arus netral yang mengalir dari titik netral trafo ke tanah.

Kata kunci: trafo distribusi, efisiensi trafo, ketidakseimbangan beban, arus netral

I. PENDAHULUAN

Transformator distribusi merupakan salah satu subsistem dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mengubah tingkat tegangan ac dari tegangan menengah 20kV menjadi tegangan ac tegangan rendah 380/220 V pada frekuensi 50 Hz. Pada standar SPLN 50, berdasarkan fasenya maka transformator distribusi terbagi dua, yaitu transformator distribusi fase-tunggal dan fase-tiga. Daya pengenal untuk trafo fase tunggal yang banyak dipakai adalah 25 dan 50 kVA. Sedangkan daya pengenal trafo fase-tiga mulai dari 50 kVA sampai 1600 kVA. Berdasarkan kelompok vektor, transformator distribusi didesain dengan kelompok vektor $Yzn5$, $Yyn6$, dan $Dyn5$. Khusus untuk kelompok vektor $Dyn5$ dipakai pada trafo berkapasitas 250 kVA sampai dengan 1600 KVA. Dalam standar SPLN 50, transformator distribusi harus mempunyai efisiensi transformator tertentu sesuai yang dipersyaratkan. Secara umum besar kecilnya efisiensi sebuah transformator dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu kerugian daya atau losses pada inti besi (disebut rugi daya tanpa beban) dan losses akibat arus mengalir pada kawat tembaga pada sisi primer dan sekunder dalam kondisi berbeban (disebut rugi daya berbeban). Untuk transformator distribusi berkapasitas 250 kVA dengan kelompok vektor $Dyn5$, efisiensi yang dipersyaratkan menurut SPLN 50 berturut turut adalah 98,09; 98,38; 98,56 dan 98,32 % untuk pembebanan trafo masing masing 100, 75, 50 dan 25 % dari kapasitas beban penuhnya.

Sistem tenaga listrik umumnya dirancang untuk beroperasi dalam sistem tiga fase, yaitu bahwa tegangan dan arus fase sebuah transformator tiga fase digambarkan sebagai fasor atau vektor dengan perbedaan sudut 1200 satu sama lain. Suatu sistem tiga fase disebut seimbang atau simetris jika vektor tegangan atau vektor arus setiap fasenya memiliki besar (magnitude) yang sama dan sudut fasenya terpisah 1200 satu sama lain. Dalam praktik arus fase pada sisi sekunder trafo distribusi 3 fase umumnya tidak sama besarnya (sisi sekunder trafo distribusi terhubung dengan jaringan tegangan rendah dan ke instalasi listrik rumah pelanggan). Dampak dari arus fase yang besarnya tidak sama atau ketidakseimbangan beban tersebut adalah akan terdapat arus netral yang mengalir dari titik netral trafo melewati penghantar pentanahan ke tanah.

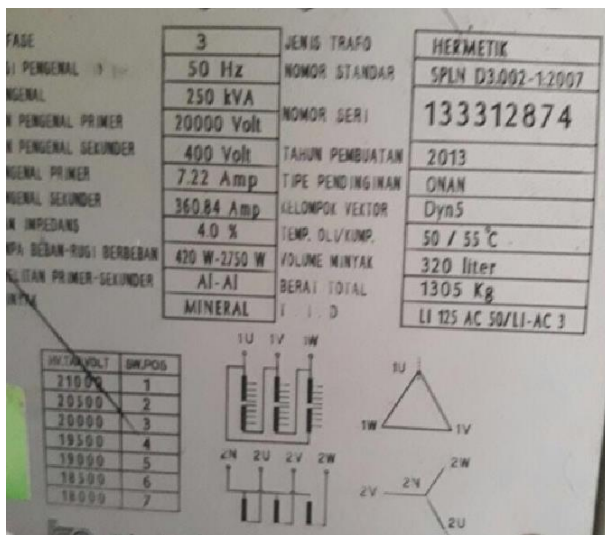
Berdasarkan uraian di atas maka pada penelitian ini dilakukan simulasi pembebanan trafo distribusi 250 kVA, fase – tiga produksi dalam negeri dengan tujuan

- Untuk membandingkan efisiensi trafo tersebut dengan standar SPLN 50
- Mencari persentase unbalance current menggunakan dua metode dan arus netral untuk variasi beban trafo 53 – 80 % dari kapasitas beban trafo.

II. METODOLOGI

Objek yang diteliti

Transformator distribusi yang dikaji pada tulisan ini adalah transformator distribusi dengan kapasitas 250 kVA tiga fase 380/220 V, 50 Hz dengan spesifikasi seperti yang tercantum dalam tabel 1.



Gbr. 1 Name plate trafo distr. 250 kVA

Tabel 1
Spesifikasi trafo distribusi

| Vector group | No Load Losses (Watt) | Load Losses at 75°C (Watt) | Impedance At 75°C (%) |
|--------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| Dyn5 | 420 | 2750 | 4.0 |

Perhitungan efisiensi transformator

Rugi pada transformator dapat dibagi 2, yaitu:

- Rugi tembaga (hilangnya daya dalam kW) karena kawat tembaga pada kumpulan primer dan sekunder dialiri arus
- Rugi besi atau rugi inti yang terdiri dari rugi histeresis dan rugi arus eddy.

Untuk faktor daya tetap $\cos \phi = \alpha$, rugi besi tetap, P_i = tertentu, sedangkan rugi tembaga P_{cu} tidak tetap tergantung pembebanan

- Rugi tembaga pada beban x KVA dihitung dengan persamaan

$$P_{cu} = \left(\frac{\text{beban } i \text{ KVA}}{\text{beban penuh, KVA}_{FL}} \right)^2 \times P_{cuFL} \quad (1)$$

dimana P_{cuFL} = rugi tembaga pada beban penuh

$$\text{Rugi total, } P_{total} = P_{cu} + P_i \quad (2)$$

$$\text{Daya masuk pada beban } i \text{ KVA, } P_{in} = \text{beban } i \text{ KVA} \times \cos \phi + P_{total} \quad (3)$$

Daya keluar pada beban i KVA,

$$P_{out} = \text{beban } i \text{ KVA} \times \cos \phi$$

$$\text{Efisiensi } \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad (4)$$

Ketidakseimbangan beban

Sisi sekunder trafo distribusi dihubungkan dengan beban pelanggan dengan tegangan operasi 380/ 220 V. Umumnya dalam praktik, arus yang mengalir pada fase R, S dan T sisi sekunder transformator distribusi tidak sama besarnya. Kondisi dimana trafo distribusi mengalirkan arus fase tidak sama besar disebut sebagai ketidakseimbangan arus (*unbalance current*) atau ketidakseimbangan beban. Seperti yang diperlihatkan pada gambar 2, magnitude arus pada fase T trafo tidak sama besarnya dengan arus fase lainnya. Ketidakseimbangan arus tersebut akan menghasilkan arus netral yang mengalir pada penghantar yang terhubung dengan titik netral sisi sekunder trafo dengan tanah. Arus yang mengalir pada penghantar netral merupakan salah satu sumber kerugian daya (losses) pada JTR. Terdapat dua metode untuk menghitung ketidakseimbangan beban, yaitu:

- Metode 1

Menggunakan formulasi

Ketidakseimbangan arus (%)

$$= \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100 \quad (5)$$

$$a = \frac{I_R}{I_{av}}, b = \frac{I_S}{I_{av}}, c = \frac{I_T}{I_{av}}$$

$$I_{av} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

keterangan I_R, I_S, I_T dan I_{av} masing masing adalah arus fase R, S, T dan arus rata-rata.

- Metode 2

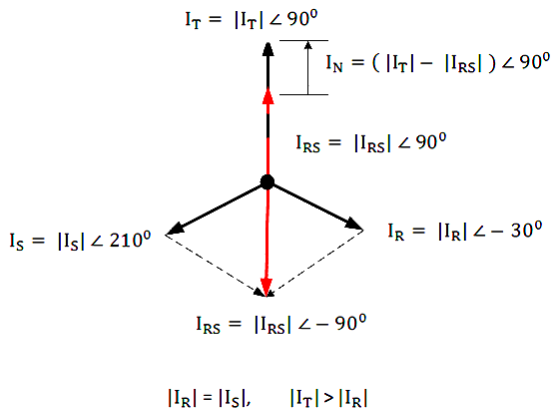
Menggunakan formulasi

Ketidakseimbangan arus (%)

$$= \frac{\text{Deviasi maks. arus terhadap arus rerata}}{\text{arus rata - rata}} \times 100$$

$$= \frac{I_{max} - I_{av}}{I_{av}} \times 100 \quad (6)$$

keterangan I_{max}, I_{av} masing masing adalah arus terbesar dari salah satu fase terhadap dan arus rata-rata dan arus rata-rata.



Gbr. 2 Arus tidak seimbang pada sekunder transformator distribusi menghasilkan arus netral

Arus netral dihitung dengan menggunakan persamaan

$$I_N = 3I_0 = |I_R| \angle -30^\circ + |I_S| \angle 210^\circ + |I_T| \angle 90^\circ \quad (7)$$

keterangan I_N dan I_0 masing-masing adalah arus netral dan arus urutan nol.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Berdasarkan data rugi tanpa beban (rugi inti) dan rugi berbeban (rugi tembaga) transformator 250 kVA yang tercantum pada tabel 1, maka diperoleh efisiensi trafo seperti dalam tabel 2.

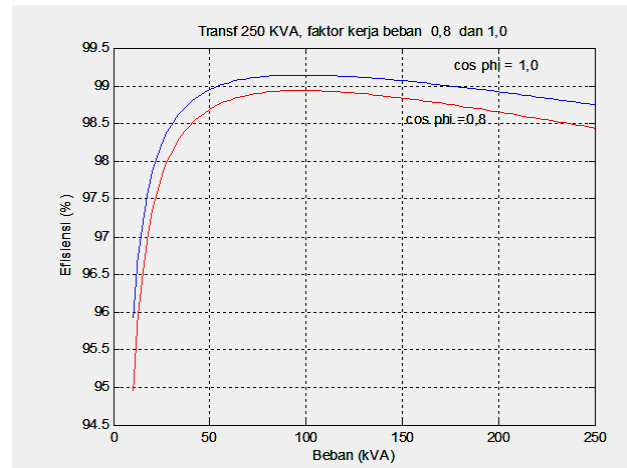
Tabel 2
Efisiensi trafo untuk faktor daya 1,0

| Beban | | Efisiensi (%) | |
|---------------|-------|---------------|---------|
| % beban penuh | kVA | Simulasi | SPLN 50 |
| 100 % | 250 | 98.75 | 98.46 |
| 75 % | 187.5 | 98.96 | 98.70 |
| 50 % | 125 | 99.12 | 98.84 |
| 25 % | 62.5 | 99.06 | 98.65 |

Tabel 3
Efisiensi trafo untuk faktor daya 0,8 lagging

| Beban | | Efisiensi (%) | |
|---------------|-----|---------------|---------|
| % beban penuh | kVA | Simulasi | SPLN 50 |
| 100 % | 250 | 98.44 | 98.09 |

| | | | |
|------|-------|-------|-------|
| 75 % | 187.5 | 98.71 | 98.38 |
| 50 % | 125 | 98.90 | 98.56 |
| 25 % | 62.5 | 98.83 | 98.32 |



Gbr 3 Efisiensi transformator 250 kVA untuk faktor daya 1,0 dan 0,8 lagging

Data simulasi pembebanan transformator distribusi diberikan pada tabel 4

Tabel 4
Data simulasi arus fase

| Beban (kVA) | Arus fase (A) | | | Arus netral (A) |
|-------------|---------------|--------|--------|-----------------|
| | I_R | I_S | I_T | I_N |
| 200 | 304 | 304 | 304 | 0 |
| 199 | 304 | 300.96 | 297.92 | 5.2654 |
| 197 | 304 | 297.92 | 294.88 | 8.0431 |
| 196 | 304 | 294.88 | 291.84 | 10.9609 |
| 195 | 304 | 291.84 | 288.8 | 13.931 |
| 193 | 304 | 288.8 | 285.76 | 16.926 |
| 192 | 304 | 285.76 | 282.72 | 19.9346 |
| 191 | 304 | 282.72 | 279.68 | 22.9515 |
| 189 | 304 | 279.68 | 276.64 | 25.9738 |
| 188 | 304 | 276.64 | 273.6 | 28.9998 |
| 187 | 304 | 273.6 | 270.56 | 32.0284 |
| 185 | 304 | 270.56 | 267.52 | 35.059 |
| 184 | 304 | 267.52 | 264.48 | 38.0911 |
| 183 | 304 | 264.48 | 261.44 | 41.1244 |
| 181 | 304 | 261.44 | 258.4 | 44.1586 |
| 180 | 304 | 258.4 | 255.36 | 47.1935 |
| 179 | 304 | 255.36 | 252.32 | 50.229 |
| 177 | 304 | 252.32 | 249.28 | 53.2651 |

| | | | | |
|-----|-----|--------|--------|----------|
| 176 | 304 | 249.28 | 246.24 | 56.3016 |
| 175 | 304 | 246.24 | 243.2 | 59.3384 |
| 173 | 304 | 243.2 | 240.16 | 62.3756 |
| 172 | 304 | 240.16 | 237.12 | 65.413 |
| 171 | 304 | 237.12 | 234.08 | 68.4506 |
| 169 | 304 | 234.08 | 231.04 | 71.4885 |
| 168 | 304 | 231.04 | 228 | 74.5265 |
| 167 | 304 | 228 | 224.96 | 77.5647 |
| 165 | 304 | 224.96 | 221.92 | 80.603 |
| 164 | 304 | 221.92 | 218.88 | 83.6414 |
| 163 | 304 | 218.88 | 215.84 | 86.68 |
| 161 | 304 | 215.84 | 212.8 | 89.7186 |
| 160 | 304 | 212.8 | 209.76 | 92.7574 |
| 159 | 304 | 209.76 | 206.72 | 95.7962 |
| 157 | 304 | 206.72 | 203.68 | 98.8351 |
| 156 | 304 | 203.68 | 200.64 | 101.874 |
| 154 | 304 | 200.64 | 197.6 | 104.913 |
| 153 | 304 | 197.6 | 194.56 | 107.9521 |
| 152 | 304 | 194.56 | 191.52 | 110.9912 |
| 150 | 304 | 191.52 | 188.48 | 114.0304 |
| 149 | 304 | 188.48 | 185.44 | 117.0696 |
| 148 | 304 | 185.44 | 182.4 | 120.1089 |
| 146 | 304 | 182.4 | 179.36 | 123.1481 |
| 145 | 304 | 179.36 | 176.32 | 126.1875 |
| 144 | 304 | 176.32 | 173.28 | 129.2268 |
| 142 | 304 | 173.28 | 170.24 | 132.2662 |
| 141 | 304 | 170.24 | 167.2 | 135.3056 |
| 140 | 304 | 167.2 | 164.16 | 138.3451 |
| 138 | 304 | 164.16 | 161.12 | 141.3845 |
| 137 | 304 | 161.12 | 158.08 | 144.424 |
| 136 | 304 | 158.08 | 155.04 | 147.4635 |
| 134 | 304 | 155.04 | 152 | 150.503 |
| 133 | 304 | 152 | 148.96 | 153.5426 |

| | | |
|-----|---------|---------|
| 185 | 5.5355 | 8.3032 |
| 184 | 6.0606 | 9.0909 |
| 183 | 6.5934 | 9.8901 |
| 181 | 7.1341 | 10.7011 |
| 180 | 7.6828 | 11.5242 |
| 179 | 8.2397 | 12.3596 |
| 177 | 8.805 | 13.2075 |
| 176 | 9.379 | 14.0684 |
| 175 | 9.9617 | 14.9425 |
| 173 | 10.5534 | 15.8301 |
| 172 | 11.1543 | 16.7315 |
| 171 | 11.7647 | 17.6471 |
| 169 | 12.3847 | 18.5771 |
| 168 | 13.0146 | 19.5219 |
| 167 | 13.6546 | 20.4819 |
| 165 | 14.305 | 21.4575 |
| 164 | 14.966 | 22.449 |
| 163 | 15.6379 | 23.4568 |
| 161 | 16.3209 | 24.4813 |
| 160 | 17.0153 | 25.523 |
| 159 | 17.7215 | 26.5823 |
| 157 | 18.4397 | 27.6596 |
| 156 | 19.1702 | 28.7554 |
| 154 | 19.9134 | 29.8701 |
| 153 | 20.6696 | 31.0044 |
| 152 | 21.4391 | 32.1586 |
| 150 | 22.2222 | 33.3333 |
| 149 | 23.0194 | 34.5291 |
| 148 | 23.8311 | 35.7466 |
| 146 | 24.6575 | 36.9863 |
| 145 | 25.4992 | 38.2488 |
| 144 | 26.3566 | 39.5349 |
| 142 | 27.23 | 40.8451 |
| 141 | 28.1201 | 42.1801 |
| 140 | 29.0271 | 43.5407 |
| 138 | 29.9517 | 44.9275 |
| 137 | 30.8943 | 46.3415 |
| 136 | 31.8555 | 47.7833 |
| 134 | 32.8358 | 49.2537 |
| 133 | 33.8358 | 50.7538 |

Tabel 5
Persentase arus tidak seimbang

| Beban (kVA) | Keitdak seimbangan arus (%) | |
|-------------|-----------------------------|----------|
| | Metode 1 | Metode 2 |
| 200 | 0 | 0 |
| 199 | 0.6734 | 1.0101 |
| 197 | 1.1299 | 1.6949 |
| 196 | 1.5927 | 2.3891 |
| 195 | 2.0619 | 3.0928 |
| 193 | 2.5375 | 3.8062 |
| 192 | 3.0197 | 4.5296 |
| 191 | 3.5088 | 5.2632 |
| 189 | 4.0047 | 6.0071 |
| 188 | 4.5077 | 6.7616 |
| 187 | 5.0179 | 7.5269 |

PEMBAHASAN

Berdasarkan data rugi transformator pada tabel 1, selanjutnya dilakukan perhitungan efisiensi transformator 250 kVA, 3 fase 380/220 V dengan sisi pimer terhubung delta dan sisi sekunder ditanahkan terhubung Y, dan pergeseran fase antara tegangan primer dan sekunder sebesar 150^0 (Dyn5). Hasilnya dicantumkan dalam tabel 2 dan 3 Berdasarkan gambar 3, untuk faktor daya 0,8 efisiensi maksimum transformator distribusi 250 kVA terjadi jika trafo dibebani dengan beban 97,5 kVA. Untuk kondisi

tersebut efisiensi trafo $\eta=98,94\%$. Untuk faktor daya 1,0 efisiensi maksimumnya $\eta = 99,15\%$ terjadi pada beban yang sama, yaitu sebesar 97,5 kVA. Berdasarkan pengamatan pada gambar 3, ditarik kesimpulan bahwa semakin baik faktor daya beban maka semakin besar efisiensi trafo.

Pada tabel 4 dan 5 dicantumkan data simulasi pembebanan transformator distribusi 250 kVA dengan tingkat pembebanan 80% - 53% dari beban penuhnya atau variasi beban trafo dari 200 kVA- 133 kV. Arus pada setiap fase untuk pembebanan 80% adalah sebesar

$$I_{80\%} = \frac{200 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 380 \text{ V}} \cong 304 \text{ A}$$

Dalam kondisi seimbang maka *magnitude* arus fase $|I_R|=|I_S|=|I_T| = 304 \text{ A}$, atau dalam bentuk vektor, arus fase dituliskan dengan:

$$I_R = |I_R| \angle -30^\circ, I_S = |I_S| \angle 210^\circ$$

dan $I_T = |I_T| \angle 90^\circ$.

Untuk analisis ketidakseimbangan arus, maka dalam simulasi dibuat *magnitude* arus fase R tetap sementara arus fase S dan T berubah sesuai persamaan (8) dan (9)

$$I_{ref} = |I_R| = 304 \text{ A}$$

$$|I_S| = I_{ref} (1 - n) \quad (8)$$

$$|I_T| = I_{ref} (1 - m) \quad (9)$$

$$m = n + 1\%$$

dengan nilai $n = 1\%, 2\%, 3\%, \dots, 50\%$.

Seperti yang dicantumkan dalam tabel 4, untuk kasus kondisi ketidakseimbangan arus dengan beban 187 kVA, nilai $n = 10\%$ dan $m = 11\%$. Arus fase

$$I_R = 304 \angle -30^\circ \text{ A}, I_S = 273,6 \angle 210^\circ \text{ A} \quad \text{dan} \quad I_T = 270,56 \angle 90^\circ \text{ A}$$

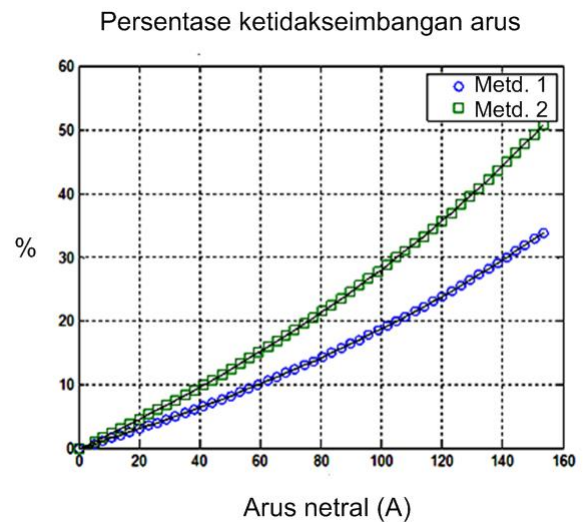
Dengan menggunakan persamaan (5), diperoleh arus rata-rata $I_{av} = 282,72 \text{ A}$ dan nilai parameter a, b dan c masing masing adalah 1,0753; 0,9677 dan 0,957. Dengan demikian persentase arus tidak seimbang yang diperoleh menurut metode 1 adalah sebesar 5,0179%. Untuk mencari persentase arus tidak seimbang untuk metode 2 digunakan persamaan (6). Untuk kasus kondisi arus tidak seimbang dengan beban 187 kVA, nilai arus maksimum dari ketiga fase adalah $I_{max} = |I_R| = 304 \text{ A}$ dan nilai deviasi arus maksimum terhadap arus rata-rata adalah $I_{max} - I_{av} = 21,28 \text{ A}$. Dengan demikian persentase ketidakseimbangan arus menurut fomulasi 2 adalah sebesar 7,5269%.

Arus netral yang mengalir dari titik netral trafo ke penghantar *ground* ke tanah dihitung dengan menggunakan persamaan (7), dan hasilnya sebagai berikut:

$$I_N = 3I_0 = |I_R| \angle -30^\circ + |I_S| \angle 210^\circ + |I_T| \angle 90^\circ$$

$$I_N = 3I_0 = 304 \angle -30^\circ + 273,6 \angle 210^\circ + 270,56 \angle 90^\circ = 32,0284 \angle -4,7^\circ \text{ A}$$

Pada gambar 4 diperlihatkan hasil simulasi persentase ketidakseimbangan arus vs arus netral trafo untuk berbagai variasi ketidakseimbangan beban. Berdasarkan pengamatan pada gambar 4, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa metode 1 menghasilkan hitungan persentase *unbalance current* lebih kecil dibandingkan dengan formulasi 2 untuk arus netral yang sama,



Gbr 4 Persentase ketidakseimbangan arus vs arus netral trafo

IV, SIMPULAN

- Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi pembebanan transformator distribusi 250 kVA, 3 fase, 400/231 V, 50 Hz dengan kelompok vektor Dyn5.
- Simulasi pembebanan bertujuan, pertama untuk menentukan efisiensi transformator berdasarkan informasi data rugi tanpa beban dan berbeban yang dikeluarkan oleh pabrik pembuatnya. Hasilnya dapat disimpulkan bahwa efisiensi transformator yang diteliti memenuhi syarat efisiensi sesuai yang ditetapkan dalam standar SPLN 50.
- Simulasi pembebanan juga bertujuan untuk menentukan persentase ketidak seimbangan beban atau persentase ketidakseimbangan arus (*unbalance current*) menggunakan 2 formulasi. Formulasi pertama menggunakan metode arus fase rata-rata, dan formulasi kedua menggunakan metode deviasi arus fase maksimum terhadap arus fase rata-rata. Berdasarkan hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa metode pertama memberi informasi persentase ketidak seimbangan beban yang lebih kecil dibandingkan dengan metode kedua untuk arus netral yang sama. Berdasarkan hasil simulasi dapat dikatakan bahwa semakin besar ketidak seimbangan arus pada sisi sekunder trafo maka semakin besar pula arus netral yang mengalir dari titik netral trafo ke tanah.

REFERENSI

- [1] A.Kadir, , Transformator, Penerbit, PT. Elex Media Komputindo, Jakarta, 1989.
- [2] Badan Standarisasi Nasional. 2000. Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000). Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- [3] Fluke (Feb 18, 2020). Transients and voltage unbalance. [Online]. Available: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/motors-drives-pumps-compressors/voltage-unbalance>
- [4] IEE Std. 519-1992: Recommended Practice an Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [5] I. W. Suddhiarta, “ Pengaruh Harmonisa Terhadap Rugi-rugi Transformator Pada Trafo Distribusi Gardu Tiang SI 149 pada Penyulang Lebih “, Jurnal Logic Vol 11 No. 3, 2011
- [6] J. S. Setiadi, T. machmudsyah dan Y Isnanto,” Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi”, Jurnal Teknik Elektro Vol. 6, No. 1, Maret 2006: 68 – 73.
- [7] N. J. Hontong, M. Tuegeh dan L. S. Patras, “ Analisa Rugi – Rugi Daya Pada Jaringan Distribusi Di PT. PLN Palu,” E-Journal Teknik Elektro dan Komputer (2015), pp. 64-71
- [8] S. Said dan S. Bone *et al.*, “Analisis Sistem Kelistrikan Pada Penyulang Makassar Town Square (MTOS),” Jurnal ELEKTRIKA, Mei 2017, pp. 42-50.
- [9] Trafindo. Katalog Produk Tafo Distribusi SPLN D3. [Online]. Available: <https://www.trafoindonesia.com/pdf/all-product->
- [10] Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik.*, ITB Press. Bandung: 1991, pp. 16–18.
- [11] William, D dan Stevenson,Jr. 1983. Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat. Dialih bahasakan oleh Kamal Kadir. Bandung: Penerbit Erlangga
- [12] W. S. Hajriani FA *et al.*, “Pengaruh Keidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20 kV Penyulang Toddopuli”, Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTI) 2018 Makassar, 17 September 2018