

Studi Analisa Kelayakan Transformator Arus untuk Proteksi Sistem Tenaga Listrik berdasarkan Hasil Uji Tahanan Isolasi, Rasio, dan Eksitasi

Rianti¹, M. Iqbal Arsyad², Danial³

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura Pontianak^{1,2,3}

Abstrak

Transformator arus (CT) merupakan peralatan yang sangat penting pada gardu induk, dimana perangkat ini digunakan untuk mengubah nilai arus yang besar menjadi nilai arus yang lebih kecil untuk keperluan pengukuran dan proteksi. CT harus dalam keadaan baik agar dapat melakukan transformasi arus secara akurat dan teliti. Kesalahan transformasi arus dapat menyebabkan kesalahan ukur dan kegagalan sistem proteksi. Atas dasar tersebut maka diperlukan pengujian berkala untuk mengetahui kondisi CT yang digunakan pada kegiatan operasional gardu induk. Pengukuran tahanan isolasi dilakukan pada awal pengujian dimaksudkan untuk mengetahui secara dini kondisi isolasi CT dan untuk menghindari kegagalan pengujian selanjutnya. Pengukuran tahanan isolasi pada setiap inti CT masing-masing fasa memiliki nilai $>20\text{ M}\Omega$. Hasil pengujian rasio pada kelas 5P untuk jenis CT proteksi memiliki kesalahan $\pm 1\%$ dan pada kelas 0,2 untuk jenis CT metering memiliki kesalahan $\pm 0,2\%$. Titik jenuh atau nilai eksitasi pada CT pada setiap inti menunjukkan nilai $V_k > V_s$. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat megger (megaohm meter) untuk pengujian tahanan isolasi dan CT Analyzer untuk pengujian rasio dan eksitasi, kemudian hasil pengujian dievaluasi berdasarkan standar yang ditetapkan oleh IEC 60044-1.

Kata kunci : transformator arus (CT), pengujian CT, rasio transformasi, tahanan isolasi, titik jenuh

Abstract

The current transformer is a crucial in the relay station, where this device is used to convert large current values into smaller current values for measurement and protection. The current transformer must be in good condition in order to accurately and precisely transforming current. The mistake of transforming the current can lead to measuring error and a failure of the protection system. On this basis, periodic testing is required to determine the condition of the current transformer used in substation operations. Insulation resistance measurement carried out at the beginning of the test are intended to determine early the current transformer isolation conditions and to avoid further test failures. Measurement of insulation resistance at each current transformer core of each phase has a value $>20\text{ M}\Omega$. The result of testing the ratio in the 5P class for the type of protection current transformer have errors $\pm 1\%$ and in class 0,2 for the metering type current transformer has an error $\pm 0,2\%$. The saturation point or excitation value on the current transformer at each core indicates the value $V_k > V_s$. The test was carried out using a megger (mega ohm meter) for insulation resistance test and CT analyzer for ratio and excitation test. Then the test result are evaluated based on the standart set by IEC 60044-1

Keywords : Current transformer (CT), CT test, transformation ratio, insulation resistance, knee point

1. Latar Belakang

Proteksi sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang dipasang pada peralatan-peralatan listrik, misalnya generator, transformator, jaringan, dan lain-lain terhadap kondisi abnormal operasi sistem itu sendiri. Kondisi abnormal itu dapat berupa hubung singkat, tegangan lebih, beban lebih, frekuensi sistem rendah, asinkron, dan lain-lain. Adanya gangguan pada sistem distribusi dapat

menyebabkan kerusakan pada peralatan penting pada penyaluran tenaga listrik, yaitu transformator, penghantar, isolasi, dan peralatan hubung. Adanya kerusakan berarti mengganggu kontinuitas atau, dengan kata lain, keandalan sistem kurang baik.

PLN sebagai perusahaan listrik negara berusaha menyuplai energi listrik seoptimal mungkin seiring dengan meningkatnya konsumen energi listrik yang ada serta menjaga kualitas

penyaluran dan kerusakan peralatan, maka diperlukan suatu sistem pengaman dan sistem pemeliharaan instalasi gardu induk. Dalam gardu induk terdapat suatu peralatan yaitu transformator arus yang berfungsi untuk menurunkan arus besar pada tegangan tinggi atau menengah menjadi kecil pada tegangan rendah yang dipakai untuk pengukuran dan proteksi serta mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer serta memungkinkan standarisasi rating arus untuk peralatan sisi sekunder.

Transformator arus atau CT (*Current Transformer*) merupakan salah satu peralatan proteksi dalam gardu induk yang berfungsi mengkonversi arus yang melewatinya dari level tinggi ke level rendah yang dapat dimanfaatkan untuk input alat metering maupun alat proteksi pada suatu jaringan sistem tenaga listrik, juga sebagai alat pengindera yang merasakan apakah keadaan yang diproteksi dalam keadaan normal atau mendapat gangguan, selanjutnya diteruskan pada relay proteksi sebagai alat pembanding sekaligus alat pengukur yang bekerja setelah mendapatkan besaran dari alat pengindera dan membandingkan dengan besar arus penyetalan dari kerja relay.

***) Rianti**

E-mail : Mrsriyanti05@gmail.com

Studi Analisa Kelayakan Transformator Arus untuk Proteksi Sistem Tenaga Listrik berdasarkan Hasil Uji Tahanan Isolasi, Rasio, dan Eksitasi dilakukan untuk mengetahui suatu transformator arus layak atau tidak dioperasikan untuk kebutuhan proteksi sistem tenaga listrik di ULTG Pontianak.

2. Landasan Teori

2.1 Kajian Terdahulu

Penelitian tentang analisa kelayakan pada transformator arus berdasarkan pengujian tahanan isolasi, rasio, dan eksitasi telah dilakukan dalam beberapa tahun terakhir. Parameter dan standarisasi alat yang menjadi objek penelitian transformator arus memiliki nilai yang berbeda. Adapun beberapa penelitian sejenis yang telah ada sebelumnya dan menjadi referensi penelitian ini adalah:

1. *Pengujian Transformator Arus 150 Kv untuk sistem Proteksi Transformator Tenaga 3 Gardu Induk Purworejo* oleh Rinex Margianto.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Rinex Margianto tahun 2016 Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri Institut Sains & Teknologi Akprind Yogyakarta Jurusan Teknik Elektro yaitu Pengujian Transformator Arus 150 kV untuk sistem Proteksi Transformator Tenaga 3 Gardu Induk Purworejo. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui secara dini kondisi isolasi

transformator arus dan untuk menghindari kegagalan pengujian selanjutnya, dengan melakukan pengukuran tahanan isolasi di setiap inti transformator pada transformator daya 3 yaitu sebesar $1G\Omega$ - $1T\Omega$. Pengujian yang dilakukan antara lain tahanan isolasi, rasio, tahanan belitan, polaritas, dan *knee point*. Data yang diperoleh dari pengujian tahanan isolasi rata-rata menunjukkan nilai $>1G\Omega$ sampai $>1T\Omega$, maka nilai tersebut sesuai dengan transformator arus yang memiliki tegangan 150 kV dengan minimal tahanan isolasi $150 M\Omega$. pengujian rasio didapat nilai dibawah 1% sehingga masih diperbolehkan, karena berdasarkan standar IEC 60044-1 untuk kesalahan rasio tidak boleh melebihi 0,25% untuk kelas PX dan 1% untuk kelas 5P. Pengujian resistansi belitan dinyatakan baik jika deviasi $<5\%$ dari resistansi referensi, berdasarkan data hasil uji menunjukkan nilai deviasi CT fasa R, S, dan T seluruhnya lebih kecil dari 5%, maka nilai resistansi DC masih dalam keadaan baik. Pengujian beban CT bertujuan untuk mengetahui nilai aktual beban yang terpasang pada sisi sekunder CT, dari hasil pengujian didapatkan bahwa beban pada CT menunjukkan nilai yang masih jauh lebih kecil dari nilai maksimum beban pada setiap inti transformator arus sehingga masih dalam keadaan normal. Pengujian *knee point* pada CT bertujuan untuk mengetahui nilai dimana transformator arus mengalami kejenuhan dengan memperhatikan nilai $V_k > V_s$.

2. *Pengujian Tahanan Isolasi dan Rasio pada Transformator PS T15 Pt. Indonesia Power Up Mrica* oleh Andi Makkulau.

Penelitian yang dilakukan oleh Andi Makkulau dkk tahun 2018 Mahasiswa STT-PLN yaitu Pengujian Tahanan Isolasi dan Rasio pada Transformator PS T15 Pt. Indonesia Power Up Mrica yang bertujuan menganalisa data hasil pengujian tahanan isolasi dan rasio dari transformator PS T15 sesuai dengan standar yang ada. Hasil yang didapat bahwa batasan indeks polarisasi menurut buku *engineering PT PLN (Persero) P3B* ada dalam keadaan tidak baik karena sisi LV-G dan HV-LV nilainya diantara 1-1,1 sementara hasil HV-G dan HV LV-G baik dengan nilai $>1,25$. Sedangkan hasil pengujian rasio tidak sesuai dengan standar yang ada (ANSI Standar C57.12.90) dengan hasil diatas standar 0,5% fasa U 6.39, fasa V 6.91, fasa W 6.91.

2.2 Transformator Arus

Transformator arus (*Current Transformer*) merupakan peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik di sisi primer (TET, TT, dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti

untuk keperluan pengukuran dan proteksi. Prinsip kerja transformator arus sama dengan transformator daya satu fasa. Bila pada kumparan primer mengalir arus I_1 maka pada kumparan timbul gaya gerak magnet sebesar $N_1 I_1$. Gaya gerak ini memproduksi fluks pada inti, dan flux ini membangkitkan gaya gerak listrik pada kumparan sekunder. Bila terminal kumparan sekunder tertutup, maka pada kumparan sekunder mengalir arus I_2 . Arus ini menimbulkan gaya gerak magnet $N_2 I_2$ pada kumparan sekunder. Pada transformator arus biasa dipasang beban pada bagian sekunder yang berfungsi sebagai impedansi beban, sehingga transformator adalah ideal, maka berlaku persamaan :

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (1)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2)$$

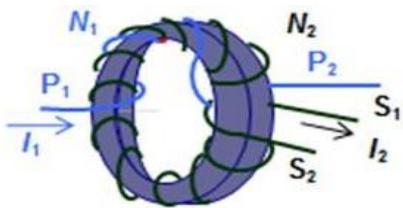
Dimana :

N_1 : Jumlah belitan kumparan primer

N_2 : Jumlah belitan kumparan sekunder

I_1 : Arus kumparan primer

I_2 : Arus kumparan sekunder

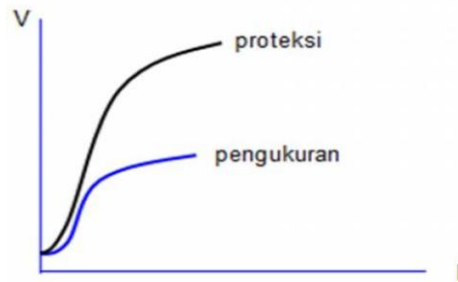


Gambar 1 Rangkaian pada transformator arus
(Sumber : PT. PLN Persero PDM/PGI/02:2014)

2.3 Fungsi Transformator Arus

Adapun fungsi dari transformator arus adalah:

- Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi.
- Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengaman terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.
- Standarisasi besaran sekunder, untuk nominal 1A dan 5A. berdasarkan fungsi dan kegunaannya transformator arus dibedakan menjadi dua jenis yaitu untuk pengukuran dan untuk proteksi. Perbedaan mendasar dari kedua jenis transformator arus tersebut adalah pada titik saturasi. Transformator arus untuk pengukuran dirancang supaya lebih cepat jenuh dibandingkan transformator arus proteksi, sehingga konstruksinya mempunyai luas penampang yang lebih kecil.



Gambar 2 Kurva kejenuhan CT untuk pengukuran dan proteksi
(Sumber : PT. PLN Persero PDM/PGI/02:2014)

2.4 Pengenal (rating) Transformator Arus

Ketelitian transformator arus dinyatakan dalam tingkat kesalahannya. Semakin kecil kesalahan sebuah transformator arus, semakin tinggi tingkat ketelitian/akurasinya.

2.4.1 Batas Ketelitian Arus Primer (Accuracy Limit Primary Current)

Batas ketelitian arus primer adalah batasan kesalahan arus primer minimum dimana kesalahan komposit dari transformator arus sama atau lebih kecil dari 5% atau 10% pada saat sekunder dibebani arus pengenalnya.

2.4.2 Faktor Batas Ketelitian (Accuracy Limit Factor/ALF)

Faktor batas ketelitian disebut juga faktor kejenuhan inti adalah batasan perbandingan nilai arus primer minimum terhadap arus primer pengenal dimana kesalahan komposit dari transformator arus sama atau lebih kecil dari 5% atau 10% pada sekunder yang dibebani arus pengenalnya. ALF merupakan perbandingan dari I_{primer}/I_{rated} .

2.5 Kelas Ketelitian Transformator Arus Metering

Transformator arus metering memiliki ketelitian tinggi untuk daerah pengukuran sampai 1,2 kali nominalnya. Daerah kerja transformator arus metering antara : $0.1 - 1.2 \times I_N$ transformator arus. Kelas ketelitian transformator arus metering dinyatakan dalam persentase kesalahan rasio pengukuran baik untuk arus maupun pergeseran sudut fasa.

Tabel 1 Batas Kesalahan Transformator Arus Metering

Kelas Ketelitian	+/- % Kesalahan Rasio Arus pada % dari Arus Pengenal				+/- Pergeseran Fase pada % dari Arus Pengenal Menit (1/60 derajat)			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60

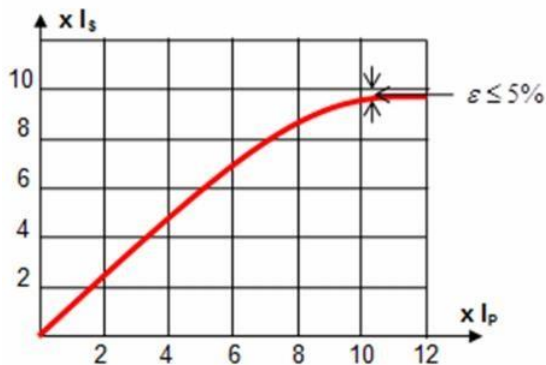
Sumber : PT. PLN Persero PDM/PGI/02:2014

Tabel 2 Batas Kesalahan Transformator Arus Metering Kelas S

Kelas Ketelitian	+/- % Kesalahan Rasio Arus pada % dari Arus Pengenal					+/- Pergeseran Fase pada % dari Arus Pengenal Menit (1/60 derajat)				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
	0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30

Sumber : PT. PLN Persero PDM/PGI/02:2014

Contoh pembacaan kedua tabel diatas adalah sebagai berikut : Transformator arus dengan spesifikasi rasio 300/5 A, kelas 0,2 dan dibebani sebesar 60 Amp (20%In), maka kesalahan maksimum rasio arus yang di izinkan adalah $\pm 15/60$ derajat atau 0,25 derajat.



Gambar 3 Kurva faktor batas ketelitian
(Sumber : PT. PLN Persero PDM/PGI/02:2014)

2.6 Kelas Ketelitian Transformator Arus Proteksi

2.6.1 Kelas P

CT yang mempunyai batas ketelitian berdasarkan kesalahan komposit yang ditentukan dalam keadaan *steady state* arus primer simetris. Kelas ketelitian transformator arus proteksi dinyatakan dalam pengenal sebagai berikut : 15 VA, 10P20.

15 VA = Pengenal beban (*burden*) transformator arus, sebesar 15 VA

10P = Kelas proteksi, kesalahan komposit 10% pada pengenal batas akurasi

20 = *Accuracy Limit Factor*, batas ketelitian transformator arus sampai dengan 20 kali arus pengenal.

Tabel 3 Kesalahan Rasio dan Pergeseran Fasa Transformator Arus Proteksi

Kelas Ketelitian	Pada Arus Pengenal		Kesalahan Komposit pada batas ketelitian Arus Primer Pengenal (%)
	Kesalahan Rasio (%)	Kesalahan Sudut (menit)	
5P	± 1	± 60	5
10P	± 3	-	10

Sumber : PT. PLN Persero PDM/PGI/02:2014

2.6.2 Kelas PX, PR, TPS, TPX, TPY, dan TPZ

Transformator arus yang mempunyai sirkit tanpa ataupun dengan celah udara serta mempunyai tipikal konstanta waktu sekunder, dikelompokkan sebagai berikut:

- Kelas PX, transformator arus yang harus memiliki kebocoran reaktansi rendah dan informasi khusus seperti *ratio*, tegangan *knee point*, arus eksitasi maksimum dan *secondary circuit resistance* (Rct).
- Kelas PR, transformator arus yang sama dengan kelas P tetapi mempunyai remanensi rendah.
- Kelas TPS, transformator arus yang mempunyai kebocoran fluksi rendah dimana unjuk kerjanya ditentukan oleh kurva magnetisasi (V *knee*), arus magnetisasi, serta tahanan belitan sekunder. Tidak ada batasan untuk remanensi fluksi. Transformator arus TPS adalah transformator arus tanpa celah udara sehingga kebocoran fluksi yang kecil. Tipe ini juga bersesuaian dengan Transformator Arus kelas X menurut *British Standard* 3938 tahun 1973 yang direkomendasikan untuk relai *Differential*.
- Kelas TPX, transformator arus yang mempunyai batas ketelitian berdasarkan kesalahan komposit yang ditentukan selama siklus kerja transien dan tidak ada batasan untuk remanensi fluksi. Transformator arus TPX adalah transformator arus tanpa celah udara dengan konstanta waktu lebih lama dari 5 detik, umumnya 5 s.d. 20 detik. Transformator arus jenis ini mempunyai ketelitian tinggi, arus magnetisasi yang sangat rendah, presisi pada transformasi komponen AC dan DC.
- Kelas TPY, Transformator arus yang memiliki batas ketelitian berdasarkan kesalahan nilai maksimum sesaat selama siklus kerja transien. Remanensi fluksi tidak melebihi 10% dari nilai kejenuhan (saturasi). Transformator arus TPY adalah transformator arus yang memiliki celah udara kecil (pada inti) dengan konstanta waktu 0.2 s.d. 5 detik. Transformator arus jenis ini hampir sama dengan transformator arus jenis TPX namun transformasi komponen DC tidak seteliti transformator arus TPX.
- Kelas TPZ, transformator arus yang memiliki batas ketelitian yang ditentukan berdasarkan kesalahan nilai maksimum sesaat komponen bolak balik selama energisasi yang tunggal dengan nilai dc *offset* yang maksimum pada konstanta waktu rangkaian sekunder tertutup. Transformator arus TPZ adalah transformator arus yang memiliki celah udara besar (pada inti) dengan konstanta waktu 60 milidetik $\pm 10\%$. Arus magnetisasi 53% dari arus sekunder pada keadaan tunak (*steady state*).

2.7 Kesalahan Transformasi (*Transformation Error*)

Kesalahan transformasi berdasarkan IEC-60044-1 edisi 1.2 tahun 2003 adalah kesalahan besaran arus karena perbedaan rasio pengenal transformator arus dengan rasio sebenarnya dinyatakan dalam :

$$e = \frac{K_n I_s - I_p}{I_p} \times 100 \quad (3)$$

Dimana :

e = Kesalahan rasio transformator arus (%)

K_n = Pengenal rasio transformator arus

I_p = Arus primer aktual transformator arus (A)

I_s = Arus sekunder aktual transformator arus (A)

2.8 Eksitasi (*knee point*)

Eksitasi adalah titik saturasi atau titik jenuh saat transformator arus melakukan eksitasi tegangan. Transformator arus memiliki kurva magnetisasi yang unik, dimana kurva tersebut dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu *unsaturated zone*, *intermediate zone*, dan *saturated zone*. Nilai kejenuhan inti dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$V_s = I_F \cdot rasio \ CT (R_{ref} + R_{meas}) \quad (4)$$

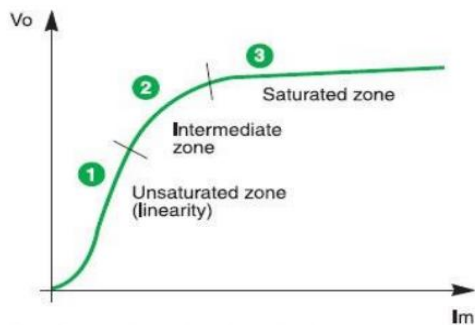
Dimana :

V_s = Kejenuhan inti pada sisi sekunder CT (V)

I_F = Arus maksimum (A)

R_{ref} = Tahanan referensi (Ohm)

R_{meas} = Tahanan terukur (Ohm)



Gambar 4 Kurva eksitasi transformator arus
(Sumber : Jurnal Elektrikal, Volume 3 No.1)

3. Metodologi Penelitian

3.1 Bahan Pengujian

Bahan yang digunakan untuk pengujian adalah transformator arus dengan data teksi dan spesifikasi sebagai berikut :

Tipe : CTB – 24

STD : IEC 60044 – 1

No : 12CI26565

PN : 105372768

Terminal :

1S1 – 1S2 1000/5A 7.5 VA 5P20

1S1 – 1S3 2000/5A 15 VA 5P20

2S1 – 2S2 1000/5A 7.5 VA 0.2

2S1 – 2S3 2000/5A 15 VA 0.2

3.2 Alat Pengujian

Alat penelitian yang digunakan adalah Megger dan CT Analyzer. Megger adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur atau menguji tahanan isolasi suatu kabel. Secara prinsip megger terdiri dari dua kumparan V dan C yang ditempatkan secara menyilang. Kumparan V merupakan besarnya arus yang mengalir adalah E/R_p dan kumparan C merupakan besarnya arus yang mengalir adalah E/R_x . R_x adalah tahanan yang akan diukur. Jarum dapat bergerak disebabkan oleh perbandingan dari dapat bergerak disebabkan oleh perbandingan dari kedua arus, yaitu sebanding dengan R_p/R_x atau berbanding terbalik terhadap tahanan yang akan diukur.



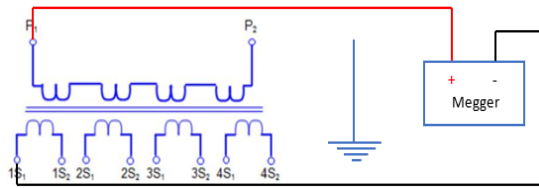
Gambar 5 Megger (Megaohm Meter)
(Sumber : ULTG Pontianak)

Sedangkan CT analyzer digunakan untuk melakukan uji otomatis dan kalibrasi arus kebocoran rendah dari suatu transformator arus, alat ini biasa digunakan pada laboratorium dan juga pada tempat umum. Adapun pengujian yang dapat dilakukan dengan menggunakan CT analyzer yaitu pengujian beban, CT winding resistance, karakteristik eksitasi CT dengan standar yang digunakan IEC 61869-2, IEC 60044-1, IEC 60044-6 (TPS, TPX, TPY, TPZ) and IEEE C57.13, CT ratio, CT phase dan pengukuran polaritas

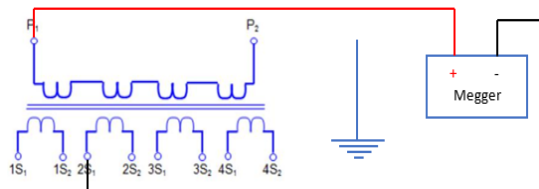


Gambar 6 CT Analyzer
(Sumber : ULTG Pontianak)

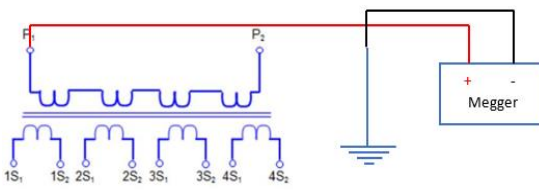
3.3 Rangkaian Pengujian



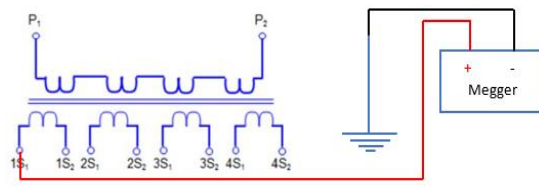
(a)



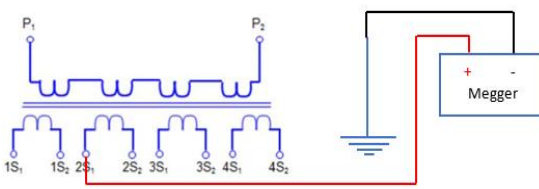
(b)



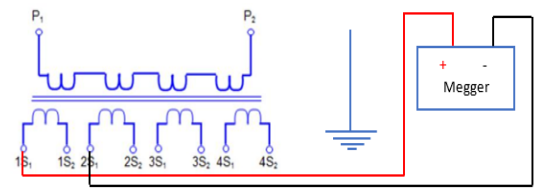
(c)



(d)

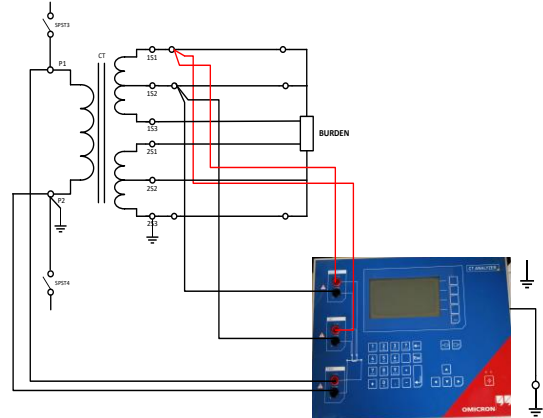


(e)

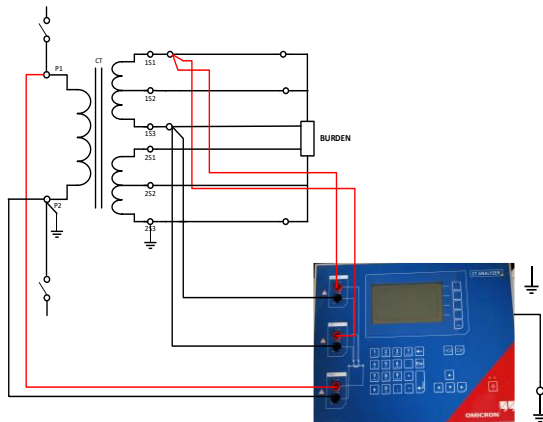


(f)

Gambar 7 Pengujian tahanan isolasi transformator arus (a) P – 1S1, (b) P – 2S1, (c) P – G, (d) 1S1 – G, (e) 2S1 – G, (f) 1S1 – 2S1

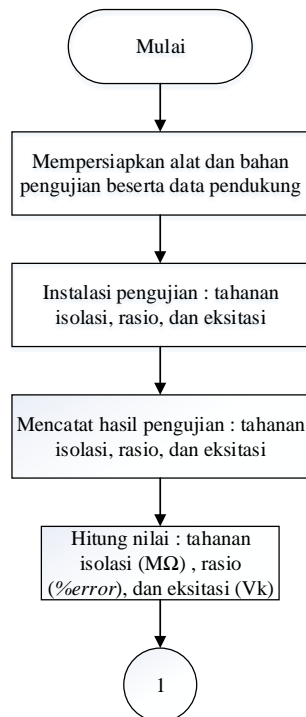


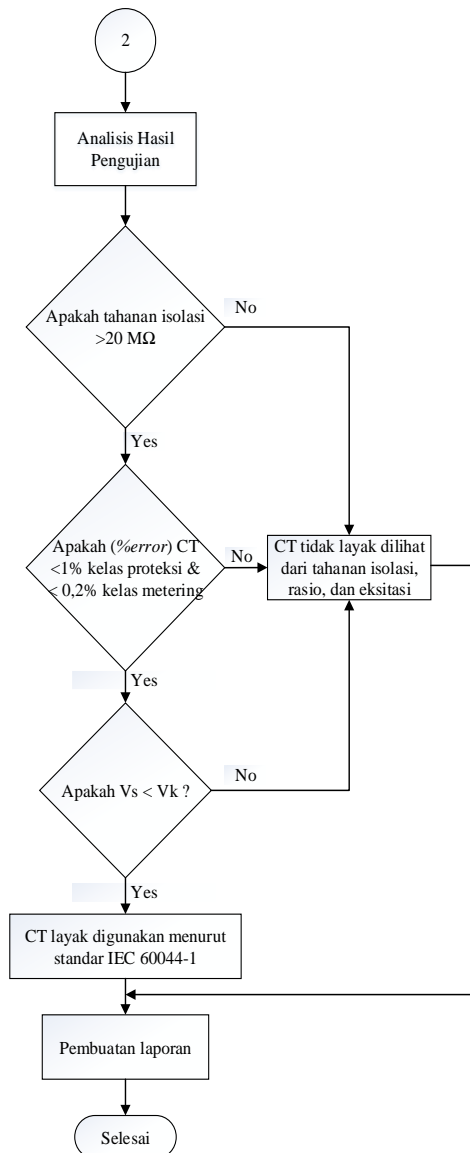
Gambar 8 Rangkaian pengujian rasio CT
(Sumber : Data olahan rangkaian pengujian rasio)



Gambar 9 Rangkaian pengujian eksitasi CT
(Sumber : Data olahan rangkaian pengujian rasio)

3.4 Diagram Alir Pengujian





Gambar 10 Diagram Alir Penelitian

4. Pembahasan

4.1 Pengujian Tahanan Isolasi

Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat uji megger (megaohm meter) dengan memberikan tegangan uji sebesar 500 V pada tiap *test point* yang diuji tahanan isolasinya agar tidak merusak peralatan serta media isolasi yang diuji. Dengan mengukur arus bocor yang melewati media isolasi, maka akan didapatkan nilai tahanan isolasi dalam satuan $M\Omega$ (Megaohm), pencatatan hasil pengujian dilakukan setelah 15 detik sesuai *setting* IR(t) atau dengan pengaturan waktu. Mengetahui besarnya tahanan isolasi dari suatu peralatan listrik merupakan hal yang penting untuk menentukan apakah peralatan tersebut dapat dioperasikan dengan aman atau tidak. Tabel 4, tabel 5, dan tabel 6 merupakan hasil uji tahanan isolasi CT.

Tabel 4 Pengujian Tahanan Isolasi CT Fasa R

Test Point	Tegangan Uji (Volt)	Tahanan Isolasi ($M\Omega$)	Keterangan
P – 1S1	500	37.700	Memenuhi
P – 2S1		50.700	Memenuhi
P – G		35.300	Memenuhi
1S1 – G		77.700	Memenuhi
2S1 – G		113.700	Memenuhi
1S1 – 2S1		114.200	Memenuhi

Sumber : Data olahan hasil pengujian tahanan isolasi

Tabel 5 Pengujian Tahanan Isolasi CT Fasa S

Test Point	Tegangan Uji (Volt)	Tahanan Isolasi ($M\Omega$)	Keterangan
P – 1S1	500	9.970	Memenuhi
P – 2S1		15.970	Memenuhi
P – G		605	Memenuhi
1S1 – G		18.910	Memenuhi
2S1 – G		20.600	Memenuhi
1S1 – 2S1		9.480	Memenuhi

Sumber : Data olahan hasil pengujian tahanan isolasi

Tabel 6 Pengujian Tahanan Isolasi CT Fasa S

Test Point	Tegangan Uji (Volt)	Tahanan Isolasi ($M\Omega$)	Keterangan
P – 1S1	500	45.200	Memenuhi
P – 2S1		55.100	Memenuhi
P – G		23.600	Memenuhi
1S1 – G		26.500	Memenuhi
2S1 – G		27.800	Memenuhi
1S1 – 2S1		12.060	Memenuhi

Sumber : Data olahan hasil pengujian tahanan isolasi

Berdasarkan standar IEC 60044-1, nilai minimal tahanan isolasi yang disyaratkan adalah 1Ω pada tegangan nominal 0,001 V, sehingga dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{CT } 20 \text{ kV} &= 20.000 \text{ V} \\
 \text{Tahanan isolasi} &= 1000 \times 20.000 \\
 &= 20.000.000 \Omega \\
 &= 20 \text{ M}\Omega
 \end{aligned}$$

Jadi nilai tahanan isolasi pada CT harus memiliki nilai $20 \text{ M}\Omega$ atau lebih agar dapat memenuhi syarat dalam sistem proteksi.

4.2 Pengujian Rasio

Pengujian rasio dilakukan dengan menggunakan alat CT *analyzer* dengan menginputkan nilai-nilai pada *name plate* transformator arus ke alat uji CT *analyzer*, nilai tersebut adalah nilai I_{pn} , I_{sn} , frekuensi, ALF, *class*, dan burden. Selanjutnya hasil pengujian akan otomatis diproses oleh alat CT *analyzer* setelah mengklik *button start* pada laptop yang sudah dihubungkan pada alat CT *analyzer* lalu data pengujian akan tampil dalam format *excel*. Setiap hasil pengujian yang muncul akan memperlihatkan kondisi dari transformator arus yang memenuhi atau tidak dalam empat macam kriteria pengujian pada CT *analyzer*. Berikut adalah hasil dari pengujian rasio dapat dilihat pada tabel 7, tabel 8, dan tabel 9.

Tabel 7 Hasil Pengujian Rasio CT pada Fasa R

Inti	Arus Primer (A)	Arus Sekunder (A)	Error (%)
1S1 – 1S2	1000	4,9999	-0,02
1S2 – 1S3	2000	5,0047	0,094
2S1 – 2S2	1000	5,0055	0,11
2S1 – 2S3	2000	5,0034	0,068

Sumber : Data olahan hasil pengujian rasio

Tabel 8 Hasil Pengujian Rasio CT pada Fasa S

Inti	Arus Primer (A)	Arus Sekunder (A)	Error (%)
1S1 – 1S2	1000	5,0093	0,186
1S2 – 1S3	2000	5,0042	0,084
2S1 – 2S2	1000	5,0056	0,112
2S1 – 2S3	2000	5,0032	0,064

Sumber : Data olahan hasil pengujian rasio

Tabel 9 Hasil Pengujian Rasio CT pada Fasa T

Inti	Arus Primer (A)	Arus Sekunder (A)	Error (%)
1S1 – 1S2	1000	5,0094	0,188
1S2 – 1S3	2000	5,0047	0,094
2S1 – 2S2	1000	5,0062	0,124
2S1 – 2S3	2000	5,0035	0,07

Sumber : Data olahan hasil pengujian rasio

Setelah didapatkan hasil pengujian maka dapat dilakukan perhitungan *error* menggunakan persamaan seperti dibawah ini :

$$e = \frac{K_n \cdot I_s - I_p}{I_p} \times 100$$

Perhitungan hasil uji rasio pada pada terminal 1S1 – 1S2 adalah sebagai berikut :

Arus uji (I_{test}) : 1000 A
 Arus sisi sekunder : 4,999 A
 Burden : 15 VA

Solusi :

$$e(\%) = \frac{2000 \times 4,999 - 1000}{1000} \times 100 = -0,02\%$$

Dengan cara perhitungan yang sama maka besarnya kesalahan (*error*) pada seluruh inti transformator arus dapat dilihat pada tabel 7, tabel 8, dan tabel 9. Berdasarkan standar IEC 60044-1 untuk kesalahan rasio tidak boleh melebihi 1% untuk kelas 5P dan 0,2% untuk kelas metering 0,2.

4.3 Pengujian Eksitasi

Pengujian eksitasi atau titik saturasi transformator arus (CT) dilakukan dengan menggunakan alat CT *analyzer*, sama halnya dengan pengujian rasio. Pengujian eksitasi dilakukan dengan menginputkan spesifikasi yang tertera pada *name plate* transformator arus yaitu nilai I_{pn} , I_{sn} , *burden*, *class*, frekuensi, VA, dan ALF. Input nilai tersebut bisa dilakukan pada alat CT *analyzer* secara langsung maupun pada laptop yang sudah terhubung dengan alat CT *analyzer* tetapi di dalam *device* sudah ada aplikasi *omicron*. Selanjutnya hasil eksitasi akan otomatis diproses setelah menekan *button start* pada laptop yang sebelumnya sudah dihubungkan pada alat CT

analyzer dan hasil akan langsung tampil dalam *file excel*. Pengujian eksitasi atau *knee point* menggunakan tiga standar yang biasa digunakan, ketiganya memiliki nilai standar *knee point* yang berbeda namun tetap dianggap sah. Berikut adalah standar yang digunakan dalam pengujian :

- IEC/BS – Sesuai dengan IEC 60044-1, eksitasi yang didefinisikan sebagai titik kurva dimana ada penambahan tegangan sebesar 10 % meningkatkan arus sebesar 50%.
- ANSI 45° – Sesuai dengan IEEE C57.13, eksitasi adalah titik dimana dengan representasi logaritma ganda, garis tangen pada kurva berbentuk sudut 45°. Berlaku pada inti transformator tanpa celah udara.
- ANSI 30° – Sama seperti ANSI 45° tetapi membentuk sudut 30°. Berlaku pada inti transformator arus tanpa celah udara.

Berikut adalah data yang terukur dari pengujian eksitasi pada inti 1S1 – 1S2 fasa R, yaitu hubungan antara arus eksitasi dan tegangan rms yang diterapkan pada sisi sekunder CT dapat dilihat pada tabel 10.

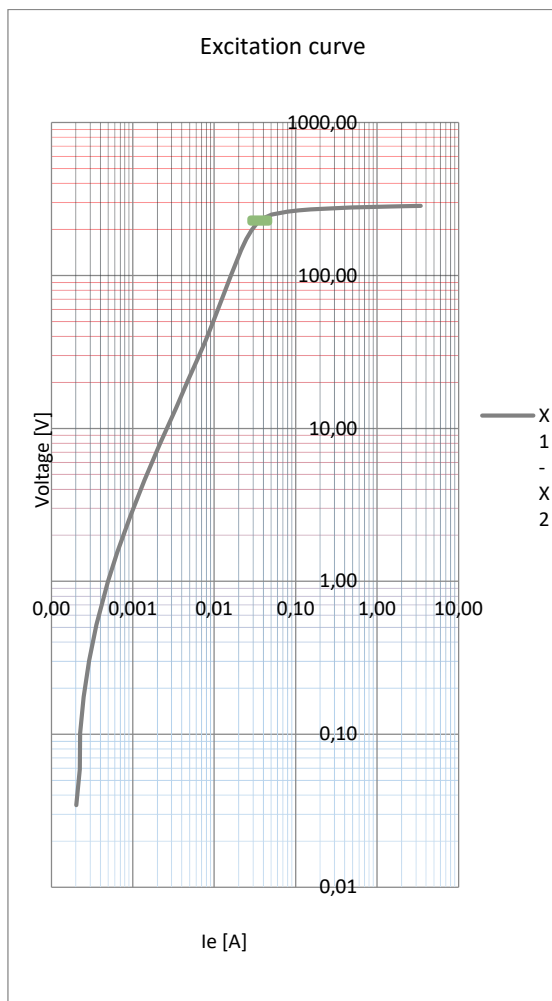
Tabel 10 Eksitasi Inti 1S1 – 1S2

Tegangan [V]	Arus [A]
285,1441	3,4331
283,8290	2,1421
282,7232	1,4264
281,5058	0,9895
280,0616	0,6932
278,1984	0,4790
275,9476	0,3260
273,1165	0,2215
269,9495	0,1530
266,2713	0,1088
261,4641	0,0794
249,8450	0,0509
235,6202	0,0390
217,9639	0,0330
196,9263	0,0286
172,7106	0,0248
146,4415	0,0213
101,3734	0,0162
73,0090	0,0128
51,3881	0,0100
36,6443	0,0077
27,2056	0,0060
20,4152	0,0047
13,6167	0,0034
7,9072	0,0022
4,5908	0,0014
2,6648	0,0009
1,5469	0,0006
1,0002	0,0005

Tegangan [V]	Arus [A]
0,5207	0,0004
0,3026	0,0003
0,1757	0,0002
0,1019	0,0002
0,0591	0,0002
0,0343	0,0002

Sumber : Data olahan hasil pengujian eksitasi inti 1S1 – 1S2

Jika data di atas dibuat grafik pada *ms. excel*, maka grafiknya akan berbentuk seperti gambar 11 akan terlihat pada titik apa *I_{knee}* dan *V_{knee}* muncul. Berikut adalah kurva hasil pengujian eksitasi pada inti 1S1 – 1S2 fasa R.



Gambar 11 Kurva eksitasi inti 1S1 – 1S2
(Sumber : Data olahan kurva hasil pengujian eksitasi)

Grafik di atas menunjukkan hubungan arus dan tegangan *knee point* transformator arus pada inti 1S1 – 1S2 fasa R. Berikut adalah tabel hasil nilai eksitasi yang terukur pada tiap fasa R, S dan T dapat dilihat pada tabel 12, tabel 13, dan tabel 14.

Tabel 12 Nilai *V-knee* dan *I-knee* CT pada Fasa R

Inti	V-knee (V)	I-knee (A)
1S1 – 1S2	228,93	0,0367
1S1 – 1S3	103,98	0,0253
2S1 – 2S2	4,05	0,0100
2S1 – 2S3	8,09	0,0049

Sumber : Data olahan hasil pengujian eksitasi

Tabel 13 Nilai *V-knee* dan *I-knee* CT pada Fasa R

Inti	V-knee (V)	I-knee (A)
1S1 – 1S2	51,35	0,0427
1S1 – 1S3	103,15	0,0217
2S1 – 2S2	4,29	0,0105
2S1 – 2S3	8,59	0,0052

Sumber : Data olahan hasil pengujian eksitasi

Tabel 14 Nilai *V-knee* dan *I-knee* CT pada Fasa T

Inti	V-knee (V)	I-knee (A)
1S1 – 1S2	51,41	0,0441
1S1 – 1S3	102,77	0,0219
2S1 – 2S2	4,66	0,0084
2S1 – 2S3	9,33	0,0042

Sumber : Data olahan hasil pengujian eksitasi

Pengujian eksitasi pada transformator arus pada dasarnya adalah untuk mengetahui nilai dimana transformator arus mengalami kejenuhan. Untuk perhitungan kejenuhan inti dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$V_s = I_F \cdot rasio\ CT(R_{ref} + R_{meas})$$

Berikut adalah perhitungan kejenuhan inti 1S1 – 1S2 pada fasa R :

Diketahui :

$$S = 60\text{ MVA} ; V_{TR} = 20\text{ kV} ; X' = 1,2\%$$

$$R_{ref} = 0,825\ \Omega ; R_{meas} = 0,691\ \Omega$$

Untuk nilai I_F dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$I_F = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{TR} \cdot L-L}$$

$$I_F = \frac{60 \times 10^6}{1,732 \times 20.000} = 1732,10 \approx 1732\text{ A}$$

Selanjutnya dapat dilakukan perhitungan eksitasi inti :

$$V_s = I_F \cdot rasio\ CT(R_{ref} + R_{meas})$$

$$V_s = 1732 \times \frac{5}{1000} (0,825 + 0,691)$$

$$V_s = 13,13\text{ V}$$

Dengan cara yang sama maka tegangan pada sisi sekunder untuk setiap fasa R, S, dan T pada transformator arus dengan arus gangguan dapat dilihat pada tabel 15, tabel 16, dan tabel 17 dibawah ini :

Tabel 15 Nilai V_k dan V_s Transformator Arus pada Fasa R

Inti	$V_k(V)$	$V_s(V)$
1S1 – 1S2	228,93	13,13
1S1 – 1S3	103,98	6,60
2S1 – 2S2	4,05	5,38
2S1 – 2S3	8,09	3,46

Sumber : Data olahan nilai V_k & hasil perhitungan nilai V_s

Tabel 16 Nilai V_k dan V_s Transformator Arus pada Fasa S

Inti	$V_k(V)$	$V_s(V)$
1S1 – 1S2	51,35	8,11
1S1 – 1S3	103,15	6,10
2S1 – 2S2	4,29	4,22
2S1 – 2S3	8,59	3,71

Sumber : Data olahan nilai V_k & hasil perhitungan nilai V_s

Tabel 17 Nilai V_k dan V_s Transformator Arus pada Fasa S

Inti	$V_k(V)$	$V_s(V)$
1S1 – 1S2	51,41	6,58
1S1 – 1S3	102,77	6,02
2S1 – 2S2	4,66	4,76
2S1 – 2S3	9,33	3,61

Sumber : Data olahan nilai V_k & hasil perhitungan nilai V_s

5. Penutup

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dan evaluasi pengujian pada transformator arus 3 fasa di Gardu Induk 20 kV ULTG Pontianak, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Nilai minimal tahanan isolasi yang disyaratkan adalah 1Ω pada tegangan nominal 0,001 volt. Transformator arus ini dipasang pada rangkaian yang mempunyai tegangan 20 kV maka nilai tahanan isolasi minimal dari transformator arus yang di izinkan adalah $1000 \times 20.000 = 20.000.000 \text{ Ohm} = 20 \text{ M}\Omega$. Dari hasil pengukuran, nilai tahanan isolasi antara belitan (fasa R – S, R – T, dan S – T) serta antara belitan dan ground, rata-rata memiliki nilai sebesar $71.550 \text{ M}\Omega$, $12.590 \text{ M}\Omega$, dan $31.710 \text{ M}\Omega$. Berdasarkan standar IEC 60044-1, transformator arus yang diuji dalam kondisi memenuhi syarat untuk dipasang dalam sistem proteksi.
2. Dari hasil pengukuran rasio, nilai kesalahan transformasi pada transformator arus untuk kelas 5P jenis CT proteksi berada pada nilai $\pm 1\%$, dan untuk kelas 0,2 jenis CT metering berada pada nilai $\pm 0,2\%$. Berdasarkan standar IEC 60044-1, transformator arus yang diuji memiliki akurasi yang baik dan masih diperbolehkan.
3. Eksitasi atau nilai *knee point* pada transformator arus memiliki ketentuan bahwa nilai V_k atau

V_{knee} harus lebih besar daripada nilai V_s atau nilai kejenuhan inti dengan persamaan $V_k > V_s$, dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa nilai eksitasi atau *knee point* pada transformator R, S dan T memiliki nilai kejenuhan yang masih memenuhi kebutuhan.

4. Berdasarkan standar IEC 60044-1, dari ketiga hasil pengujian menunjukkan nilai yang sesuai atau tidak kurang dari standar yang telah ditentukan.

5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut, adapun saran yang didapat pada penelitian ini adalah :

1. Untuk keamanan masalah sistem proteksi, maka pada pemeliharaan transformator arus (CT) harus dilakukan secara rutin sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan.
2. Untuk memastikan bahwa transformator arus masih dalam keadaan baik, bisa dilakukan pengecekan sebelum melakukan pengujian lebih lanjut pada saat transformator arus dalam keadaan bertegangan seperti pengecekan dengan alat thermovisi yaitu melakukan pengecekan secara visual pada bagian-bagian peralatan, pengecekan lainnya antara lain *grounding* yaitu memastikan bahwa kawat pentanahan masih terpasang dan tidak longgar atau rusak, selanjutnya *dielectric* yaitu memeriksa level ketinggian minyak CT, memeriksa tekanan gas N2 melalui manometer yang terpasang di CT, dan memeriksa tekanan gas SF6 melalui manometer yang terpasang di CT. Untuk menjamin sistem proteksi yang baik selain CT, masih banyak komponen sistem proteksi lainnya yang perlu dipastikan kualitasnya, misalnya *circuit breaker* (CB), relai proteksi, dan *DC system power supply* (catu daya). Oleh karena itu, komponen-komponen tersebut perlu untuk diteliti untuk menjamin sistem proteksi yang handal.

DAFTAR PUSTAKA

1. Abdil, Margiono, Prosedur Pengukuran Pengujian Tahanan Isolasi dengan Megger. Oktober 2013.
<http://margionoabdil.blogspot.com/2013/10/prosedur-pengukuran-pengujian-tahanan.html>
2. Anindyantoro, Muhammad Syahendra, Analisa Tahanan Isolasi pada Transformator Tenaga di Gardu Induk Wonogiri. Desember 2017.
3. Electrical, Concepts, How to Calculate Knee Point Voltage of Current Transformer? September 2018.
<https://sdvelectrical.blogspot.com/2018/09/how-to-calculate-knee-point-voltage-of.html>

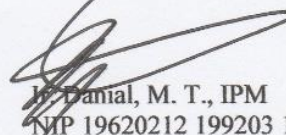
4. Blogger, Libs. 2015. Electricity Transformator Arus. <https://belajar-ilmu-listrik.blogspot.com/2016/03/transformator-arus.html>
5. Hadary, F., dkk. 2009 Teknik Penulisan Skripsi. Edisi ke-1. Pontianak: Fakultas Teknik Untan.
6. Makkulau, Andi, Nurmiati Pasra, dan Rifaldi Riska Siswanto. 2018. Pengujian Tahanan Isolasi dan Rasio pada Trafo PS T15 PT. Indonesia Power Up Mrica. Energi & Kelistrikan, 10(1), 1-93
7. Margianto, Rinex, Slamet Hani, Syafriyudin. 2016. Pengujian Transformator Arus 150 kV Untuk Sistem Proteksi Transformator Tenaga 3 Gardu Induk Purworejo. Jurnal Elektrikal, 3(1), 21-36
8. L2804, OMICRON. 2019 . CT Analyer Current Transformer Setting, Calibration and Assesment.
9. PT. PLN (Persero) Dokumen nomor : PDM/PGI/02:2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Arus.*
10. Rakhman, Alief. 2013, September 9. Sistem Proteksi. <https://rakhman.net/electrical-id/sistem-proteksi.html>
11. Saputro, Tomy Adi, Analisis Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Transformator Daya Berdasarkan Hasil Uji Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Rasio Tegangan, BDV (Break Down Voltage). Juli 2018.
12. Sulistiono, Ari, Pengujian Trafo Arus (*Current Transformer*). April 2011. <http://www.arisulistiono.com/2011/04/pengujian-trafo-arus-current12.html>.
13. Suprianto. 2015, Oktober 17. Komponen-komponen Proteksi. <http://blog.unnes.ac.id/antosupri/komponen-komponen-proteksi.html>
14. Tambunan, Juara Mangapul dan Widhyastuti. 2018. Pengujian Rutin Trafo Arus 24 kV di Laboratorium Hubung Singkat PT. PLN (Persero) Puslitbang Ketenagalistrikan. Jurnal SUTET, 8(1), 1-71

Mengetahui,
Pembimbing Utama



Dr. Ir. M. Iqbal Arsyad, M. T., IPM
NIP 19660907 199203 1 002

Pembimbing Pendamping



M. T. Damal, M. T., IPM
NIP 19620212 199203 1 002



Biografi

Rianti, menempuh pendidikan di Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura sejak tahun 2016. Memperoleh gelar sarjana (S1) Teknik Elektro pada tahun 2020 dengan konsentrasi Teknik Tenaga Listrik