



TUGAS AKHIR - EE 184801

ANALISIS PRE ENERGIZE PADA TRANSFORMATOR 3 FASA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN FLUKS TIAP FASA

Hadwim Septiawan
NRP 07111540000156

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T, M.Sc.
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - EE 184801

ANALISIS PRE ENERGIZE PADA TRANSFORMATOR 3 FASA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN FLUKS TIAP FASA

Hadwim Septiawan
NRP 07111540000156

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T, M.Sc.
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

PRE ENERGIZE ANALYSIS OF 3 PHASE TRANSFORMERS BY CONSIDERING EACH PHASE FLUX

Hadwim Septiawan
NRP 07111540000156

Supervisors
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T, M.Sc.
Feby Agung Pamuji S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“Analisis Pre Energize Pada Transformator 3 Fasa dengan Mempertimbangkan Fluks Tiap Fasa”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2019



Hadwim Septiawan
07111540000156

ANALISIS PRE ENERGIZE PADA TRANSFORMATOR 3 FASA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN FLUKS TIAP FASA

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

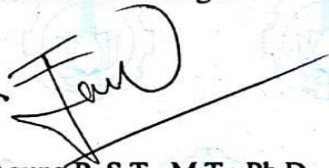
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dr. Eng. I Made Yulistya N, S.T., M.Sc.
NIP. 197007121998021001



Feby Agung P, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198702062012121002



ANALISIS PRE ENERGIZE PADA TRANSFORMATOR 3 FASA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN FLUKS TIAP FASA

Nama Mahasiswa : Hadwim Septiawan
NRP : 07111540000156
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya N, S.T, M.Sc.
Dosen Pembimbing II : Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Arus *inrush* merupakan fenomena transien yang terjadi ketika transformator pertama kali dihubungkan dengan sumber tegangan pada saat kondisi tanpa beban, sehingga menimbulkan lonjakan arus yang bernilai tinggi. Arus *inrush* berdampak buruk bagi sistem tenaga listrik dan dapat menyebabkan kesalahan operasi rele pengaman. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui besarnya arus *inrush* dan meminimalisir besarnya arus *inrush* dengan menggunakan metode *prefluxing*.

Pada studi ini dilakukan pengujian dengan menggunakan transformator uji 3 fasa 3 kVA tipe inti. Pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan fluks DC mula sebelum transformator dihubungkan dengan sumber tegangan, kemudian ketiga fasa transformator di-*energize* secara bersamaan pada sudut tegangan tertentu sehingga arus *inrush* dapat diminimalisir. Hasil pengujian menunjukkan trafo yang diberi fluks DC mula selalu menghasilkan arus *inrush* yang lebih kecil. Pada pengujian ini arus *inrush* bernilai minimum pada sudut penyalan 90 derajat dengan nilai arus *inrush* sebesar 0.74 A pada fasa R, 3.41 A pada fasa S, dan 3.80 A pada fasa T.

Kata kunci : Arus *inrush*, Transformator, fluks, transien

Halaman ini sengaja dikosongkan

PRE ENERGIZE ANALYSIS OF 3 PHASE TRANSFORMERS BY CONSIDERING EACH PHASE FLUX

Name : Hadwim Septiawan
NRP : 07111540000156
Supervisor I : Dr. Eng. I Made Yulistya N, S.T, M.Sc.
Supervisor II : Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Inrush current is a transient phenomena that occur when energizing transformers for the first time at no load condition, so a high transient current will be drawn by the transformer. Inrush current have a negative impact on the power system and cause operation error on the protection relay. The purpose of this study is to determine the magnitude of the inrush current and minimize the inrush current using the prefluxing method.

In this study a test was carried out using a 3-phase 3 kVA core type transformer. This test is done by giving an initial DC flux before the transformer is connected to the voltage source, then at certain voltage angle the three transformer phases are connected to the voltage source simultaneously so the inrush current can be reduced. The test results show that the fluxed transformer always draw a smaller inrush current. In this test the minimum inrush current is at 90 degree voltage angle with an inrush current value of 0.74 A in phase R, 3.41 A in phase S, and 3.80 A in phase T.

Keyword : *Inrush current, Transformers, flux, transient*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, atas rahmat dan hidayah-Nya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Pre Energize pada Transformator 3 Fasa dengan Mempertimbangkan Fluks Tiap Fasa” tepat pada waktunya.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah Subhanahu Wa Ta’Ala yang maha esa atas rahmat dan karunia-Nya.
2. Kedua orang tua penulis, Bapak Dwi Murtono dan Ibu Eka Haryati yang telah memberikan dukungan serta doa yang tiada henti sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T, M.Sc. dan Bapak Feby Agung Pamuji S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuan.
5. Teman-teman angkatan e55 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.
6. Teman-teman Laboratorium Tegangan Tinggi yang selalu membantu penulis dalam hal akademik dalam penulisan tugas akhir ini.
7. Mas Arief Budi Ksatria ST.,MT. yang senantiasa memberikan arahan dan masukan selama penulis melaksanakan tugas akhir.
8. Sahabat-sahabat penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulisan dalam pelaksanaan tugas akhir.
9. Pihak-pihak lain yang belum dapat penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu kritik dan saran sangat diharapkan untuk

perbaikan dikemudian hari. Penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan penelitian dengan topik yang serupa di masa yang akan datang.

Surabaya, Juli 2018

Hadwim Septiawan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Tujuan	2
1.4 Sistematika Penulisan	2
1.5 Relevansi	3
BAB II TRANSFORMATOR DAN ARUS INRUSH	5
2.1 Transformator	5
2.1.1 Pengertian Transformator	5
2.1.2 Transformator dalam Sistem Tenaga Listrik	5
2.1.3 Konstruksi Transformaator	6
2.1.4 Transformator Ideal	7
2.1.5 Transformator Tidak Ideal	8
2.1.6 Transformator Tiga Fasa	9
2.1.7 Histerisis	9
2.2 Arus <i>Inrush</i>	10
BAB III PERANCANGAN ALAT <i>PRE ENERGIZE</i> DAN EKSPERIMEN PENGURANGAN ARUS INRUSH	15
3.1 Spesifikasi Transformator Pengujian	15
3.2 Perancangan Alat <i>Pre Energize</i>	16
3.3 Pengujian Pengurangan Arus <i>Inrush</i>	17
3.4 Alat Pengujian Pengurangan Arus <i>Inrush</i>	18
3.4.1 Sumber 3 fasa	18
3.4.2 Komponen <i>pre-energize</i>	19
3.4.3 Komponen <i>Switching</i>	20
3.4.4 Kapasitor Demagnetisasi	22
3.4.5 Transformator Arus	23
3.4.6 Perangkat Akuisisi Data NI DAQ 4296	20
3.4.7 Perangkat lunak akuisisi data	21

BAB IV AKUISISI DATA DAN EKSPERIMEN PENGURANGAN	
ARUS <i>INRUSH</i>	25
4.1 Kalibrasi sudut penyalaan.....	25
4.2 Akuisisi data.....	27
4.3 Hasil pengujian	29
4.3.1 Hasil pengujian 1	30
4.3.2 Hasil pengujian 2	31
4.3.3 Hasil pengujian 3	36
4.4 Analisis data.....	39
4.4.1 Analisis data pengujian 1 sudut penyalaan 0 derajat	39
4.4.2 Analisis data pengujian 2 sudut penyalaan 60 derajat	40
4.4.3 Analisis data pengujian 3 sudut penyalaan 90 derajat	42
BAB V PENUTUP.....	47
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA.....	49
BIODATA PENULIS.....	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema sistem tenaga listrik.....	6
Gambar 2.2	Transformator tipe inti (<i>core type</i>)	7
Gambar 2.3	Transformator tipe cangkang (<i>shell type</i>).....	7
Gambar 2.4	Kurva histerisis transformator.....	10
Gambar 2.5	Arus <i>inrush</i> akibat fluks dan kurva magnetisasi	11
Gambar 2.6	Perbandingan sudut penyalaan 90 derajat dengan fluks dan arus belitan.....	12
Gambar 2.7	Perbandingan sudut penyalaan 0 derajat dengan fluks dan arus belitan.....	13
Gambar 3.1	Transformator uji 3 kVA 3 fasa	15
Gambar 3.2	Rangkaian alat <i>pre energize</i>	16
Gambar 3.3	Skema pengurangan arus <i>inrush</i> dengan <i>pre energize</i> ..	18
Gambar 3.4	Panel sumber 3 fasa	19
Gambar 3.5	Wujud komponen <i>pre-energize</i>	20
Gambar 3.6	Rangkaian <i>zero crossing</i>	21
Gambar 3.7	Rangkaian Arduino.....	21
Gambar 3.8	Komponen <i>switching</i>	22
Gambar 3.9	Skema Demagnetisasi.....	22
Gambar 3.10	Transformator Arus	23
Gambar 3.11	NI DAQ 4296.....	24
Gambar 4.1	Kalibrasi sudut penyalaan 0 derajat.....	26
Gambar 4.2	Kalibrasi sudut penyalaan 60 derajat.....	26
Gambar 4.3	Kalibrasi sudut penyalaan 90 derajat.....	26
Gambar 4.4	Proses pengambilan data arus <i>inrush</i> pada transformator	29
Gambar 4.5	Bentuk gelombang arus <i>inrush</i> sudut penyalaan 0 derajat tanpa menggunakan <i>pre energize</i>	30
Gambar 4.6	Bentuk gelombang arus <i>inrush</i> sudut penyalaan 0 derajat dengan menggunakan <i>pre energize</i>	31
Gambar 4.7	Bentuk gelombang arus <i>inrush</i> sudut penyalaan 60 derajat tanpa menggunakan <i>pre energize</i>	33
Gambar 4.8	Bentuk gelombang arus <i>inrush</i> sudut penyalaan 60 derajat dengan menggunakan <i>pre energize</i>	34
Gambar 4.9	Bentuk gelombang arus <i>inrush</i> sudut penyalaan 90 derajat tanpa menggunakan <i>pre energize</i>	36
Gambar 4.10	Bentuk gelombang <i>inrush</i> sudut penyalaan 90 derajat dengan menggunakan <i>pre energize</i>	37

Gambar 4.11	Gelombang tegangan 3 fasa	39
Gambar 4.12	Perbandingan arus <i>inrush</i> fasa R tanpa <i>pre energize</i> dengan <i>pre energize</i> sudut 0 derajat.....	40
Gambar 4.13	Perbandingan arus <i>inrush</i> fasa S tanpa <i>pre energize</i> dengan <i>pre energize</i> sudut 0 derajat.....	41
Gambar 4.14	Perbandingan arus <i>inrush</i> fasa T tanpa <i>pre energize</i> dengan <i>pre energize</i> sudut 0 derajat.....	41
Gambar 4.15	Perbandingan arus <i>inrush</i> fasa R tanpa <i>pre energize</i> dengan <i>pre energize</i> sudut 60 derajat.....	42
Gambar 4.16	Perbandingan arus <i>inrush</i> fasa S tanpa <i>pre energize</i> dengan <i>pre energize</i> sudut 60 derajat.....	43
Gambar 4.17	Perbandingan arus <i>inrush</i> fasa T tanpa <i>pre energize</i> dengan <i>pre energize</i> sudut 60 derajat.....	43
Gambar 4.18	Perbandingan arus <i>inrush</i> fasa R tanpa <i>pre energize</i> dengan <i>pre energize</i> sudut 90 derajat.....	44
Gambar 4.19	Perbandingan arus <i>inrush</i> fasa R tanpa <i>pre energize</i> dengan <i>pre energize</i> sudut 90 derajat.....	45
Gambar 4.20	Perbandingan arus <i>inrush</i> fasa R tanpa <i>pre energize</i> dengan <i>pre energize</i> sudut 90 derajat.....	45

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi transformator uji	15
Tabel 4.1 Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> sudut penyalaaan 0 derajat tanpa menggunakan <i>pre energize</i>	31
Tabel 4.2 Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> sudut penyalaaan 0 derajat dengan menggunakan <i>pre energize</i>	32
Tabel 4.3 Perbandingan nilai arus <i>inrush</i> sudut 0 derajat tanpa <i>pre energize</i> dan dengan menggunakan <i>pre energize</i>	32
Tabel 4.4 Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> sudut penyalaaan 60 derajat tanpa menggunakan <i>pre energize</i>	34
Tabel 4.5 Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> sudut penyalaaan 60 derajat dengan menggunakan <i>pre energize</i>	35
Tabel 4.6 Perbandingan nilai arus <i>inrush</i> sudut 60 derajat tanpa <i>pre energize</i> dan dengan menggunakan <i>pre energize</i>	35
Tabel 4.7 Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> sudut penyalaaan 90 derajat tanpa menggunakan <i>pre energize</i>	37
Tabel 4.8 Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> sudut penyalaaan 90 derajat dengan menggunakan <i>pre energize</i>	38
Tabel 4.9 Perbandingan nilai arus <i>inrush</i> sudut 90 derajat tanpa <i>pre energize</i> dan dengan menggunakan <i>pre energize</i>	38

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator daya merupakan suatu komponen listrik yang berperan penting dalam sistem tenaga listrik, sehingga harus dijaga keandalannya. Pada transformator terdapat suatu fenomena yaitu arus *inrush*. Arus *inrush* adalah salah satu fenomena transien yang dapat mengganggu keandalan transformator, dikarenakan nilainya yang sangat tinggi sehingga dapat menyebabkan kesalahan operasi pada rele differensial transformator. Transformator yang sering melalui proses *energize* juga lebih rentan mengalami kegagalan isolasi [1].

Penyebab utama terjadinya arus *inrush* adalah saturasi inti magnetik transformator. Proses *energize* yang tidak terkontrol dapat menyebabkan transformator bekerja pada level saturasi yang tinggi sehingga arus *inrush* yang bernilai tinggi dapat muncul [2]. Saat pertama kali transformator dihubungkan dengan sumber tegangan, besarnya arus *inrush* dapat bernilai hingga 10-20 kali arus nominal transformator [3]. Proses pengisian daya atau *energize* secara berulang kali pada transformator tanpa beban dapat menyebabkan kegagalan isolasi pada transformator tersebut, hal ini membuktikan bahwa arus *inrush* memiliki dampak yang berbahaya pada transformator sehingga besarnya arus *inrush* harus diperhatikan pada saat pengisian daya transformator [1].

Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah mengetahui induktansi magnetisasi dari transformator, kemudian merancang komponen *pre energize* berupa kapasitor yang akan memberikan fluks DC terhadap transformator sebelum dilakukan proses *energize*. Pengujian dilakukan dengan cara memberi fluks pada transformator saat keadaan *off* dan melakukan *energize* dengan sudut tegangan yang telah ditentukan [4]. Data yang didapat dari pengujian ini akan dianalisa, sehingga dapat dilakukan penarikan kesimpulan terhadap metode yang dilakukan pada penelitian ini.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah :

1. Desain dan aplikasi komponen *pre energize* yang berfungsi sebagai pemberi fluks mula pada transformator.

2. Penggunaan metode *prefluxing* untuk mengurangi besarnya arus *inrush* pada transformator 3 fasa.

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui karakteristik dan besarnya arus *inrush* pada transformator 3 fasa.
2. Mengurangi besarnya arus *inrush* pada transformator 3 fasa.

1.4 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, sistematika penulisan, dan relevansi yang mendasari penelitian.

Bab 2 : Transformator dan Arus *Inrush*

Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini yang terdiri dari bahasan mengenai transformator dan arus *inrush*.

Bab 3 : Perancangan Alat *Pre energize* dan Eksperimen Pengurangan Arus *Inrush*

Bab ini membahas mengenai perancangan komponen *pre energize* yang digunakan dalam penelitian ini, dan membahas metodologi yang akan digunakan dalam penelitian ini. Pada bab ini juga dibahas mengenai peralatan-peralatan yang akan digunakan dalam melakukan penelitian

Bab 4 : Akuisisi Data dan Analisis Eksperimen Pengurangan Arus *Inrush*

Bab ini membahas akuisisi data dan hasil yang didapat dari penelitian ini, dan kemudian dilakukan analisis terhadap hasil tersebut.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil tugas akhir yang telah dikerjakan dan juga saran yang dapat diberikan untuk pengembangan hasil tugas akhir ini kedepannya

1.5 Relevansi

Hasil dari tugas akhir ini diharapkan dapat membawa pengaruh positif dan juga dapat dijadikan sebagai referensi untuk pengembangan penelitian selanjutnya dengan topik yang serupa.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TRANSFORMATOR DAN ARUS INRUSH

2.1 Transformator

2.1.1 Pengertian Transformator

Transformator adalah suatu komponen listrik yang berfungsi untuk merubah level tegangan arus bolak-balik berdasarkan prinsip elektromagnetik. Bagian terpenting dari suatu transformator adalah dua belitan atau lebih yang digulung pada suatu inti besi. Transformator akan bekerja jika salah satu belitannya (belitan primer) dihubungkan pada sumber arus bolak-balik sehingga akan ada fluks yang mengalir pada inti besi dan menginduksi belitan sekunder yang akan menimbulkan tegangan pada sisi sekunder. Jika sisi sekunder dihubungkan dengan beban maka arus akan timbul pada sisi sekunder [5].

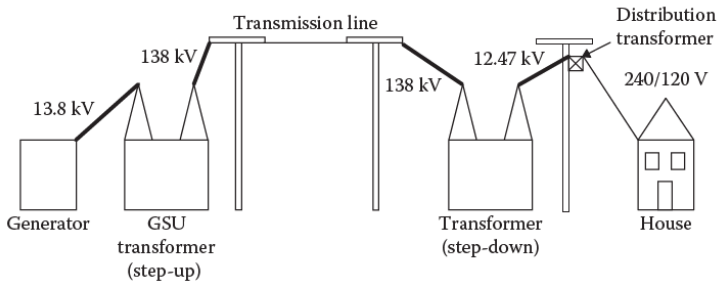
Berdasarkan kegunaannya transformator dibagi menjadi dua jenis, yaitu transformator *step up* dan transformator *step down*. Transformator *step up* digunakan untuk menaikkan level tegangan dalam artian tegangan pada sisi sekunder lebih besar dibandingkan sisi primer. Transformator *step down* digunakan untuk menurunkan level tegangan. Transformator *step up* umumnya digunakan pada pembangkit untuk menaikkan tegangan agar dapat disalurkan melalui saluran transmisi. Sedangkan transformator *step down* umumnya digunakan pada saluran distribusi untuk disalurkan kepada pelanggan [3].

2.1.2 Transformator dalam Sistem Tenaga Listrik

Transformator merupakan suatu bagian yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik yang digunakan untuk merubah level tegangan. Dalam suatu sistem tenaga listrik transformator berperan penting mulai dari pembangkit hingga ke beban.

Pada saluran transmisi yang memiliki jarak cukup jauh level tegangan yang tinggi lebih efisien untuk digunakan untuk mengurangi besarnya rugi-rugi pada saluran. Transformator akan digunakan untuk menaikkan level tegangan yang dibangkitkan oleh pembangkit yang kemudian dihubungkan dengan saluran transmisi jarak jauh. Transformator juga berperan penting dalam sisi distribusi, daya yang telah disalurkan melalui saluran transmisi akan diturunkan level tegangannya dengan transformator pada gardu distribusi yang kemudian

akan disalurkan kepada pelanggan-pelanggan tegangan menengah dan juga transformator distribusi untuk disalurkan pada pelanggan tegangan rendah. Keandalan transformator harus dijaga karena jika terjadi kerusakan atau kesalahan operasi dapat berakibat fatal terhadap sistem tenaga listrik [3].



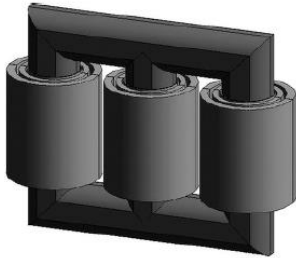
Gambar 2.1 Skema sistem tenaga listrik [3]

2.1.3 Konstruksi Transformaator

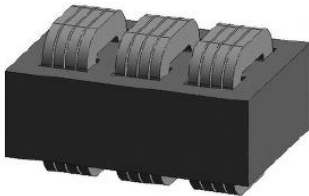
Transformator secara umum diklasifikasikan berdasarkan kegunaannya, namun transformator juga dapat diklasifikasikan berdasarkan konstruksinya. Selain klasifikasi berdasarkan kegunaan yaitu transformator *step up* dan *step down*, klasifikasi transformator berdasarkan konstruksi dibagi menjadi dua macam, yaitu transformator tipe inti (*core type*) dan transformator tipe cangkang (*shell type*) [3].

Pada transformator tipe inti (*core type*) inti besi berbentuk persegi sederhana yang dimana kumparan dililitkan pada kedua sisi dari inti besi tersebut. Sedangkan, pada transformator tipe cangkang (*shell type*) inti besi memiliki tiga buah kaki yang dimana kumparan dililitkan pada bagian tengah inti besi (dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan Gambar 2.3). Inti besi dari transformator terbuat dari gabungan laminasi dengan tujuan untuk mengurangi rugi-rugi yang diakibatkan oleh arus eddy [5].

Masing-masing jenis konstruksi transformator ini memiliki keunggulan dan kelemahan. Untuk transformator berkapasitas daya besar atau bertegangan tinggi transformator tipe inti lebih umum digunakan karena perawatan yang mudah dan lebih baik dalam hal disipasi panas. Sedangkan, transformator jenis cangkang lebih umum diaplikasikan pada tegangan rendah seperti pada transformator distribusi [3].



Gambar 2.2 Transformator tipe inti (*core type*) [2]



Gambar 2.3 Transformator tipe cangkang (*shell type*) [3]

2.1.4 Transformator Ideal

Transformator dapat dikatakan sebagai transformator yang ideal jika daya pada sisi primer dan sekunder sama besar atau dapat diartikan tidak ada rugi-rugi pada transformator sehingga transformator bekerja dengan efisiensi 100% [5]. Transformator ideal secara praktis belum pernah ada dikarenakan rugi-rugi pasti terjadi dalam pengoperasian transformator sehingga tidak ada transformator yang bekerja dengan efisiensi 100% [6].

Pada transformator ideal terdapat penurunan persamaan, dimana e_1 adalah tegangan induksi pada kumparan primer (N_1) dan e_2 adalah tegangan induksi yang terbangkit pada kumparan sekunder (N_2). Pada saat kumparan primer transformator diberi sumber tegangan AC maka akan timbul fluks (ϕ) yang mengalir pada inti transformator dan akan menginduksi belitan sekunder (N_2) sehingga akan timbul tegangan induksi sisi sekunder e_2 . Berikut hubungan matematis gaya gerak listrik

yang dipengaruhi oleh jumlah lilitan dan fluks yang berubah terhadap waktu

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

Gaya gerak listrik yang terinduksi pada sisi sekunder adalah

$$-e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

Jika diasumsikan e_1 dan e_2 sama dengan tegangan terminal v_1 dan v_2 maka dapat dituliskan

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.3)$$

Dari persamaan di atas dapat disimpulkan jika nilai $N_1 > N_2$ maka transformator akan menjadi *step down*, dan sebaliknya jika $N_1 < N_2$ maka transformator akan menjadi *step up*.

2.1.5 Transformator Tidak Ideal

Transformator tidak ideal atau biasa disebut transformator *real* adalah transformator yang dalam pengoperasiannya terdapat rugi-rugi atau dapat dikatakan efisiensi transformator tidak 100%. Rugi-rugi yang dapat terjadi pada transformator salah satunya adalah rugi inti yang disebabkan oleh resistansi inti dan reaktansi magnetik yang terdapat pada transformator [12]. Selain rugi inti juga terdapat rugi arus Eddy yang disebabkan oleh sirkulasi arus yang menginduksi inti besi transformator yang dimana terdapat aliran fluks, arus Eddy dapat menyebabkan rugi-rugi pada transformator karena sebagian energy yang tersalurkan berubah menjadi panas sehingga menurunkan efisiensi dari transformator. Karena rugi-rugi yang dapat terjadi pada transformator maka tidak ada transformator yang memiliki efisiensi 100%, sehingga semua transformator secara praktis dikatakan sebagai transformator tidak ideal.

2.1.6 Transformator Tiga Fasa

Sistem kelistrikan yang digunakan pada saat ini sebagian besar adalah sistem tiga fasa, karena itu transformator tiga fasa memegang peranan penting dalam suatu sistem tenaga listrik. Transformator tiga fasa dapat dibentuk dari 3 buah transformator satu fasa ataupun tiga buah pasang lilitan yang dililitkan pada satu inti besi.

Pada Transformator tiga fasa terdapat beberapa hubungan belitan yang dapat digunakan, yaitu hubungan (Y/wye) dan delta (Δ/D) untuk sisi primer dan sekunder. Terdapat empat jenis hubungan yang dapat dibentuk oleh transformator tiga fasa, yaitu Y-Y, Y-D, D-Y, dan D-D [5].

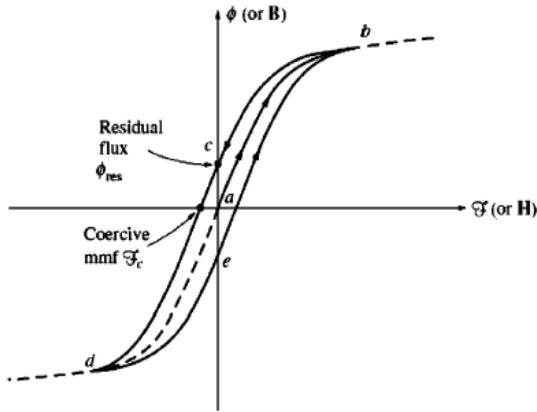
2.1.7 Histerisis

Histerisis merupakan keterlambatan material magnetik pada inti transformator, yang memiliki hubungan dengan karakteristik dari material tersebut. Histerisis dapat menyebabkan *losses* pada transformator yang disebabkan oleh adanya fluks yang tersisa dalam inti transformator karena adanya kenaikan atau penurunan arus magnetisasi [12]. Pemilihan jenis material inti harus diperhatikan untuk meminimalisir nilai rugi histerisis. Kurva histerisis menunjukkan perbandingan antara kerapatan fluks (B) dengan intensitas medan magnet (H). Berikut adalah persamaan yang menunjukkan perbandingan antara kerapatan fluks dan medan magnet

$$B = \mu H \quad ; \quad B = \frac{\phi}{A} \quad (2.4)$$

Dimana B adalah kerapatan fluks, H adalah intensitas medan magnet, dan A adalah luas permukaan dari material feromagnetik transformator.

Saat transformator di-*energize* hingga mencapai nilai saturasi pada inti, dan kemudian transformator tersebut dimatikan maka selalu ada fluks sisa yang berada pada inti transformator yang dipengaruhi oleh retentivitas. Retentivitas merupakan kemampuan suatu material dalam mempertahankan sebagian fluks yang mengalir pada inti setelah proses magnetisasi berakhir [5].

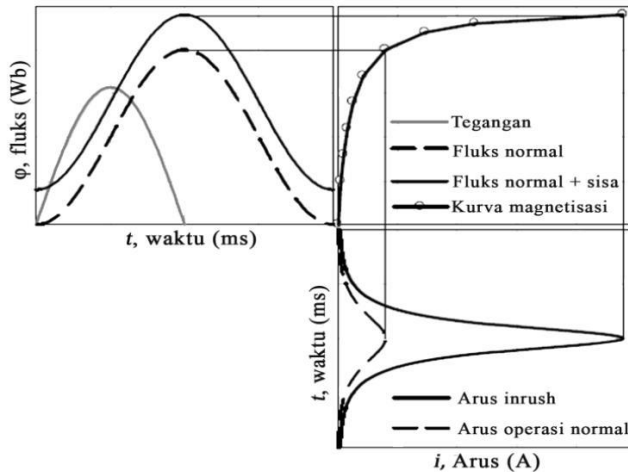


Gambar 2.4 Kurva histeresis transformator

Saat transformator dihubungkan dengan sumber tegangan dengan asumsi fluks mula adalah 0, dapat dilihat dari gambar 2.4 saat arus naik untuk pertama kali, fluks membentuk jalur mula a-b, ketika arus mulai turun fluks tidak kembali ke posisi a melainkan membentuk jalur baru melalui c-d dan ketika arus naik akan melewati jalur d-e-b. Jumlah fluks yang terdapat pada inti tidak dipengaruhi seberapa besar arus yang diberikan pada belitan transformator melainkan dipengaruhi oleh fluks yang terdapat pada inti sebelumnya.

2.2 Arus *Inrush*

Arus *inrush* merupakan fenomena transien yang terjadi pada saat peralatan listrik yang memiliki prinsip kerja elektromagnetik di-*energize* dengan sumber tegangan dalam keadaan mati [7] . Arus *inrush* dapat terjadi pada peralatan listrik seperti transformator dan motor. Pada saat transformator di-*energize* pertama kali dalam keadaan tanpa beban transformator akan menarik arus yang besarnya mencapai 20 kali arus nominal dan lamanya arus *inrush* dapat mencapai hingga 0.5 detik [1]. Arus *inrush* dapat menyebabkan berbagai masalah dalam sistem tenaga seperti kesalahan operasi rele pengaman, kegagalan isolasi transformator, memperpendek usia peralatan, masalah harmonisa, dan lainnya.



Gambar 2.5 Arus *inrush* akibat fluks dan kurva magnetisasi

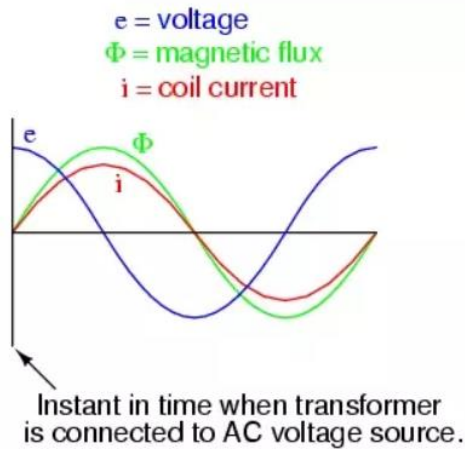
Arus *inrush* terjadi ketika transformator pertama kali *starting* dalam keadaan tanpa beban. Fluks sisa pada transformator yang tidak memenuhi kondisi *steady state* merupakan penyebab terjadinya arus *inrush*. Ketika transformator dihubungkan dengan sumber tegangan, fluks yang terbangkit oleh sumber akan dibangun di atas fluks sisa pada transformator. Ketidaklinieran kurva magnetisasi pada kondisi saturasi akan mengakibatkan jumlah gaya gerak magnet yang tidak sebanding diperlukan untuk membangkitkan fluks magnet, sehingga arus belitan yang diperlukan untuk membuat gaya gerak magnet akan meningkat untuk menghasilkan fluks pada inti transformator. Perbandingan antara fluks sisa, kurva magnetisasi dan arus *inrush* dapat dilihat pada gambar 2.5..

Salah satu penyebab utama arus *inrush* adalah saturasi inti magnetik transformator [8]. Saturasi inti magnetik transformator disebabkan oleh perubahan tegangan sistem secara tiba-tiba akibat adanya *switching transient*, generator yang lepas sinkron, gangguan eksternal dan restorasi gangguan [1].

Arus *inrush* lebih sering terjadi dibandingkan hubung singkat, sehingga arus *inrush* harus ditindak lebih lanjut. Belum ada bukti pasti bahwa saat *energize* transformator dapat menyebabkan gangguan yang disebabkan oleh arus *inrush* yang bernilai tinggi. Akan tetapi,

transformator yang mengalami masalah isolasi karena seringnya di-*energize* pada kondisi tanpa beban menunjukkan bahwa arus *inrush* memiliki efek yang berbahaya. Masalah yang sering terjadi akibat *energize* transformator adalah masalah kestabilan sistem di sekitar transformator yang memicu terjadinya *overvoltage* dan fenomena resonansi [1].

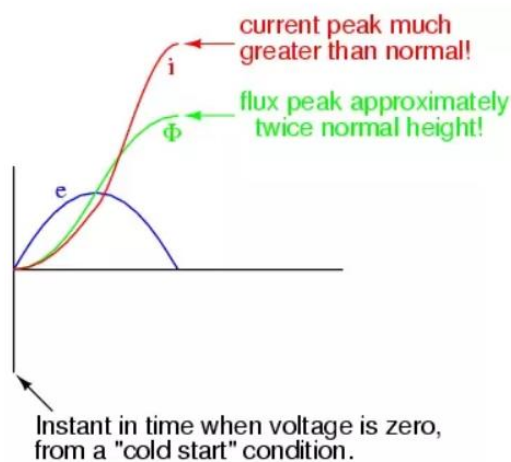
Besarnya arus *inrush* dipengaruhi oleh berbagai macam hal, salah satunya adalah sudut penyalaan. Ketika belitan primer terhubung dengan sumber pada saat yang tepat ketika tegangan berada pada puncak positif nya pada sudut penyalaan 90 derajat (dapat dilihat pada gambar 2.6), fluks magnet yang meningkat dengan cepat harus dihasilkan ketika tegangan sumber turun dari puncaknya. Reaksi dari transformator adalah arus belitan akan meningkat dengan cepat tetapi tidak lebih cepat dari kondisi normal. Fluks dan arus belitan meningkat bersamaan hingga mencapai nilai pada kondisi *steady state*. Oleh karena itu arus *inrush* yang dihasilkan minimum.



Gambar 2.6 Perbandingan sudut penyalaan 90 derajat dengan fluks dan arus belitan

Ketika belitan primer terhubung dengan sumber pada saat tepat tegangan sumber bernilai nol pada sudut penyalaan 0 derajat (dapat dilihat pada gambar 2.7), ini adalah titik yang tepat ketika nilai fluks

dan arus belitan pada nilai puncak negatifnya. Ketika tegangan naik dari nilai nol fluks akan meningkat hingga naik ke puncak positifnya saat tegangan turun ke nilai nol dalam setengah *cycle* sehingga fluks mencapai nilai puncak yang berlipat dari kondisi normal sehingga menyebabkan saturasi inti transformator. Karena ketidaklinieran kurva magnetisasi saat saturasi gaya gerak magnet yang dibutuhkan untuk membentuk fluks magnet lebih besar, sehingga arus belitan yang akan membentuk gaya gerak magnet untuk mengisi fluks pada inti meningkat berkali-kali lipat. Oleh karena itu arus *inrush* yang dihasilkan maksimum.



Gambar 2.7 Perbandingan sudut penyalan 0 derajat dengan fluks dan arus belitan

Arus *inrush* dipengaruhi oleh faktor internal dan faktor eksternal. Pada faktor internal arus *inrush* dipengaruhi oleh karakteristik material inti transformator. Sedangkan pada faktor eksternal arus *inrush* dipengaruhi oleh fluks residu yang tersisa pada inti transformator. Nilai fluks residu yang tidak sesuai dengan nilai fluks sesaat dalam keadaan *steady state* akan memicu terjadinya arus *inrush* [10].

Pada arus *inrush* terdapat arus magnetisasi dan arus rugi inti. Arus magnetisasi adalah arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks pada inti transformator agar transformator dapat bekerja. Sedangkan, arus rugi inti adalah arus yang dibutuhkan untuk rugi histerisis dan rugi

arus Eddy. Oleh karena itu, arus *inrush* dibutuhkan oleh transformator untuk mengisi fluks agar dapat beroperasi.

BAB III

PERANCANGAN ALAT *PRE ENERGIZE* DAN EKSPERIMEN PENGURANGAN ARUS INRUSH

Pada bab ke 3 ini akan dibahas metodologi yang akan dilakukan pada studi ini yaitu dengan cara memberikan fluks DC mula pada transformator sebelum di-*energize* untuk mengurangi besarnya arus *inrush* ketika pertama kali melakukan *energize* pada transformator. Pada bab ini juga dibahas mengenai peralatan-peralatan yang digunakan dalam pengujian.

3.1 Spesifikasi Transformator Pengujian

Transformator uji yang digunakan pada pengujian ini memiliki kapasitas daya sebesar 3 kVA 3 fasa yang memiliki hubungan belitan Y-Y. Transformator uji dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Transformator uji 3 kVA 3 fasa

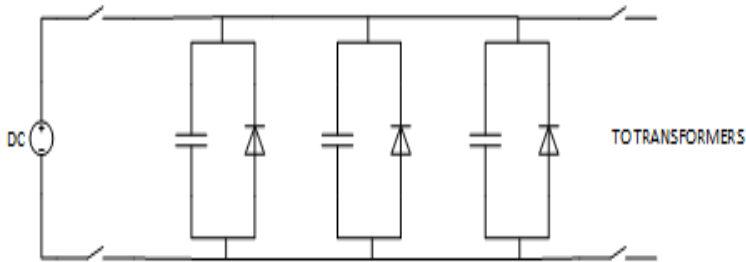
Spesifikasi transformator uji dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Spesifikasi transformator uji

Jumlah fasa	3 fasa
Kapasitas daya	3 kVA
Tegangan primer	380 V
Tegangan sekunder	380 V
Frekuensi	50 Hz
Hubungan belitan	Y / Y

3.2 Perancangan Alat *Pre Energize*

Pada studi ini dibutuhkan suatu komponen yang berfungsi sebagai pengisi fluks DC mula pada transformator untuk mengurangi besarnya arus *inrush* ketika di-*energize*, karena itu dirancang suatu alat *pre energize* untuk mengisi fluks DC pada transformator. Alat *pre energize* terdiri dari kapasitor dan dioda yang dimana kapasitor di-*charge* dengan tegangan tertentu dan kemudian *discharge* untuk mengisi fluks pada transformator. Dioda memiliki peran untuk mencegah terjadinya *reverse charging* dari transformator setelah diisi dengan fluks, sehingga kapasitor otomatis akan terisolasi. Rangkaian dari alat *pre energize* dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Rangkaian alat *pre energize*

Alat ini menggunakan dioda dengan *rating* arus sebesar 10 A. Sedangkan nilai kapasitor ditentukan dari berapa besar tegangan DC yang digunakan untuk mengisi kapasitor. Pada pengujian ini digunakan tegangan DC sebesar 5 V untuk mengisi kapasitor. Menurut studi [11] nilai kapasitor ditentukan dari persamaan berikut :

$$C = \left(\frac{1}{L_{m_{approx}}} \right) \left(\frac{\sqrt{2}V_{LN}}{2\pi f \times V_{DC}} \right)^2 \quad (3.1)$$

Dimana $L_{m_{approx}}$ adalah induktansi magnetisasi transformator, V_{LN} adalah tegangan *line-to-neutral*, dan V_{DC} adalah tegangan *charging* kapasitor. Menurut studi [11] nilai $L_{m_{approx}}$ ditentukan dari persamaan berikut :

$$L_{m_{approx}} = \frac{V_{LN}^2}{2\pi f \times 0.05 S_{rated}} \quad (3.2)$$

Dimana S_{rated} adalah *rating* kapasitas daya transformator. Dari persamaan di atas didapat nilai $L_{m_{approx}}$ sebesar 1.037 H kemudian nilai ini disubstitusi ke persamaan 3.1 dan didapatkan nilai kapasitor yang dibutuhkan sebesar 31.7 mF, dengan nilai V_{LN} sebesar 220 V dan f sebesar 50 Hz. Oleh karena itu, pada studi ini digunakan kapasitor sebesar 30 mF.

Energi yang tersimpan dalam kapasitor didapat dari persamaan berikut :

$$E = \frac{1}{2} C \times V_{DC}^2 \quad (3.3)$$

Dari persamaan 3.3 didapat nilai E sebesar 0.375 J. Kapasitor menerima daya siplai sebesar 0.015 W sehingga waktu *charging* yang dibutuhkan adalah

$$t_{charge} = \frac{E}{P_{supply}} = 25 \text{ s}$$

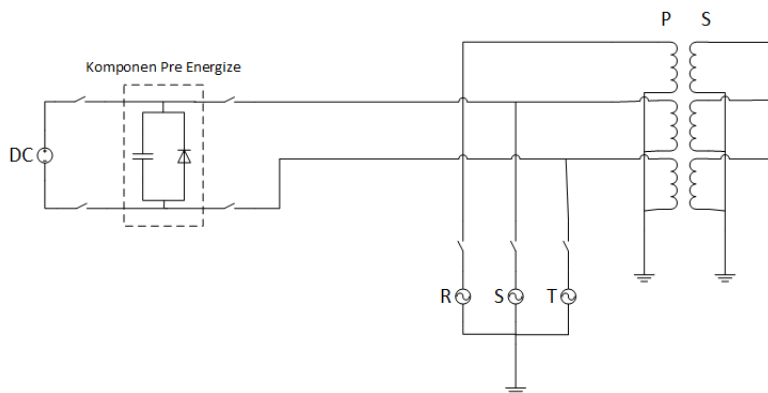
Dari perhitungan di atas waktu yang dibutuhkan untuk *charging* adalah 25 detik.

3.3 Pengujian Pengurangan Arus *Inrush*

Pengujian pengurangan arus *inrush* pada studi ini dilakukan dengan cara memberikan fluks DC mula pada transformator. Komponen *pre-energize* yang digunakan berupa kapasitor dan dioda, kapasitor kemudian akan di *charge* sesuai tegangan yang telah ditentukan, dan kemudian akan dilakukan discharge pada dua fasa transformator yakni fasa S dan T (seperti pada Gambar 3.3). Tahap pengisian fluks dilakukan saat transformator dalam keadaan *off*. Setelah tahap pengisian fluks selesai maka akan dilakukan proses *energize* pada transformator, proses *energize* dilakukan dengan cara melihat sudut penyalan tegangan dari salah satu fasa yang tidak dilakukan pengisian fluks yakni fasa R.

Pada pengujian dalam studi ini juga dilakukan demagnetisasi dengan menggunakan kapasitor demagnetisasi. Tujuan dilakukannya demagnetisasi adalah untuk menghilangkan fluks sisa yang terdapat

pada transformator, sehingga pengukuran arus *inrush* bisa menjadi lebih sesuai dan akurat. Demagnetisasi dilakukan dengan cara menghubungkan transformator dalam keadaan *off* setelah di-*energize* dengan kapasitor demagnetisasi sehingga fluks yang tersisa pada transformator dapat dialiri kedalam kapasitor demagnetisasi. Waktu yang diperlukan untuk membuang fluks sisa dalam transformator dengan melakukan demagnetisasi beragam, pada pengujian ini dilakukan demagnetisasi selama kurang lebih 3 menit untuk mendapatkan data arus *inrush* yang lebih akurat.



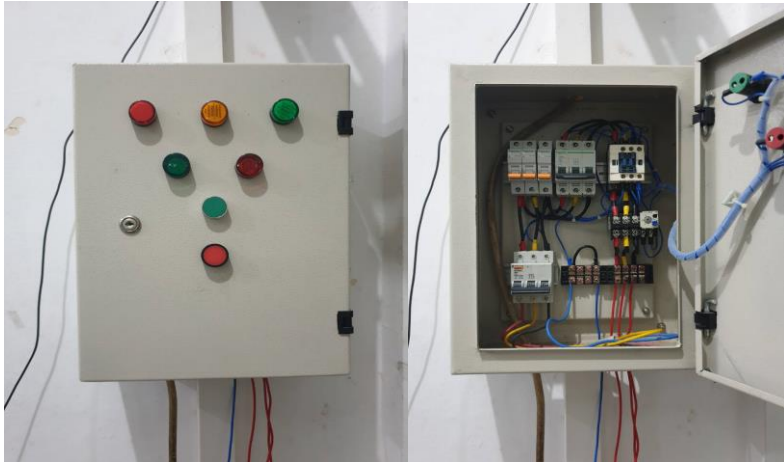
Gambar 3.3 Skema pengurangan arus *inrush* dengan *pre energize*

3.4 Alat Pengujian Pengurangan Arus *Inrush*

Peralatan yang digunakan pada pengujian ini sebagian besar menggunakan peralatan yang ada pada laboratorium. Peralatan yang digunakan adalah transformator pengujian 3 kVA 3 fasa, sumber 3 fasa, komponen *pre-energize*, komponen *switching*, kapasitor demagnetisasi, transformator arus, perangkat akuisisi data NI DAQ 4296, PC yang telah terpasang *software* NI LabVIEW.

3.4.1 Sumber 3 fasa

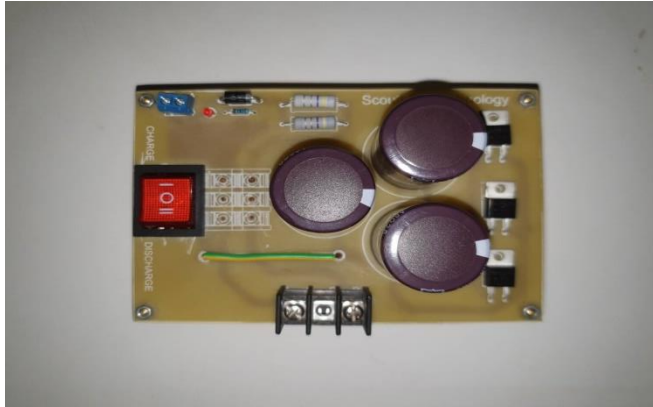
Sumber yang digunakan untuk pengujian ini adalah sumber AC 3 fasa yang berada di laboratorium Tegangan Tinggi dari PLN dengan tegangan 380 V (*line-to-line*) dan frekuensi sebesar 50 Hz. Wujud dari panel sumber 3 fasa dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Panel sumber 3 fasa

3.4.2 Komponen *pre-energize*

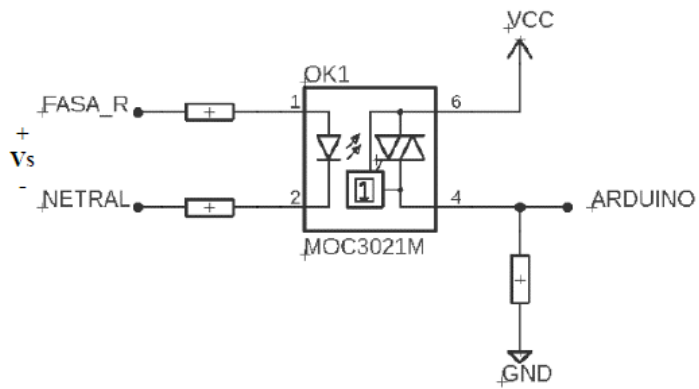
Komponen *pre-energize* yang digunakan pada pengujian ini berfungsi sebagai pemberi fluks DC mula pada transformator. Alat ini terdiri dari kapasitor yang berfungsi menyimpan muatan yang kemudian akan disalurkan kepada transformator, dan dioda yang berfungsi sebagai *bypass* untuk kapasitor agar tidak terjadi *reverse charging*. Kapasitor yang digunakan bernilai sebesar $3 \times 10 \text{ mF}$ dengan *rating* tegangan hingga 50 V dan dioda dengan *rating* arus 10 A. Saklar manual digunakan untuk *charge* dan *discharge* kapasitor. Wujud dan rangkaian komponen *pre-energize* dapat dilihat pada gambar 3.5.



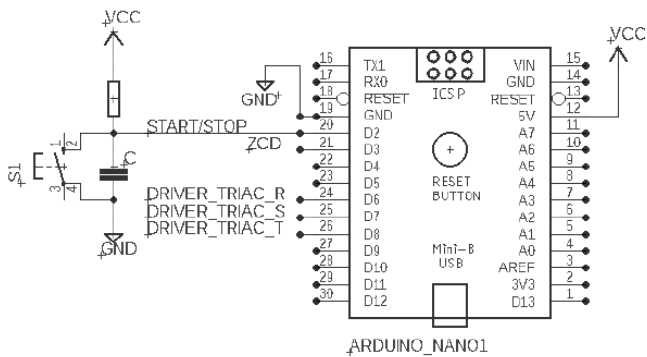
Gambar 3.5 Wujud komponen *pre-energize*

3.4.3 Komponen *Switching*

Komponen *switching* pada pengujian ini digunakan untuk mendapatkan sudut tegangan penyalan sesuai yang diinginkan, dimana sudut penyalan digunakan sebagai penentu kapan transformator di-*energize*. Alat ini terdiri dari 3 komponen utama yaitu rangkaian *zero crossing*, arduino dan triac. Prinsip kerjanya yaitu rangkaian *zero crossing* (gambar 3.6) akan mendeteksi nilai persimpangan nol dari tegangan input yang kemudian akan diolah oleh arduino. Sinyal keluaran dari *zero crossing* akan diterima arduino (gambar 3.7) untuk mengatur delay yang dimana akan digunakan untuk pengaturan sudut penyalan. Selanjutnya arduino akan memberikan sinyal trigger kepada TRIAC dan kemudian TRIAC akan menjalankan perintah untuk membuka/menutup. Wujud dari komponen *switching* dapat dilihat pada gambar 3.8



Gambar 3.6 Rangkaian zero crossing



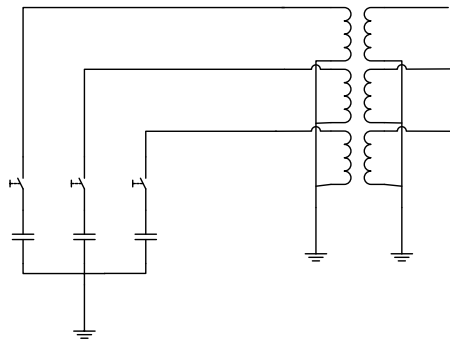
Gambar 3.7 Rangkaian Arduino



Gambar 3.8 Komponen *switching*

3.4.4 Kapasitor Demagnetisasi

Kapasitor Demagnetisasi digunakan sebagai alat pengosongan fluks sisa pada transformator. Tujuan dari demagnetisasi adalah untuk mengosongkan fluks sisa pada transformator setelah melalui proses *energize*, yang dimana akan berdampak pada akurasi data yang diambil dari setiap pengujian. Demagnetisasi dilakukan pada saat transformator dalam keadaan *off* setelah melalui proses *energize*, dengan waktu yang telah ditentukan. Saklar manual digunakan untuk demagnetisasi transformator.



Gambar 3.9 Skema Demagnetisasi

3.4.5 Transformator Arus

Transformator arus atau *current transformers* (CT) adalah peralatan yang digunakan untuk pengukuran arus yang tinggi hingga ratusan ampere. Transformator arus memiliki lilitan primer dan sekunder, lilitan primer berguna menerima induksi dari saluran yang akan diukur, sedangkan lilitan sekunder akan mengubahnya menjadi nilai arus yang lebih kecil sesuai dengan rasio. Pada pengujian ini transformator arus digunakan untuk menurunkan arus agar tidak terlalu tinggi, sehingga dapat dihubungkan dengan aman kepada perangkat akuisisi data NI DAQ 4296. Pada pengujian ini digunakan 3 buah transformator arus dengan rasio 250/5 A. Wujud dari transformator arus yang digunakan pada pengujian ini dapat dilihat pada gambar 3.8.



Gambar 3.10 Transformator Arus

3.4.6 Perangkat Akuisisi Data NI DAQ 4296

DAQ 4296 dari *National Instrument* (NI) merupakan perangkat keras yang digunakan untuk mengukur besaran arus saat dihubungkan dengan sistem. Perangkat ini harus tergabung terlebih dahulu dengan transformator arus (CT) untuk dapat mengukur arus yang mengalir. Transformator arus juga berperan melindungi perangkat ini dari arus sistem yang besar sehingga mencegah kerusakan. Wujud NI DAQ 4296 dapat dilihat pada gambar 3.9.



Gambar 3.11 NI DAQ 4296

3.4.7 Perangkat lunak akuisisi data

Selain menggunakan perangkat keras, perangkat lunak juga diperlukan dalam akuisisi data. Perangkat lunak yang digunakan pada pengujian ini adalah NI LabVIEW dan DIAdem. LabVIEW digunakan sebagai *interface* untuk melihat besaran yang dihasilkan oleh DAQ 4296, sedangkan DIAdem digunakan untuk mengolah data yang diperoleh dalam bentuk tabel maupun grafik.

BAB IV

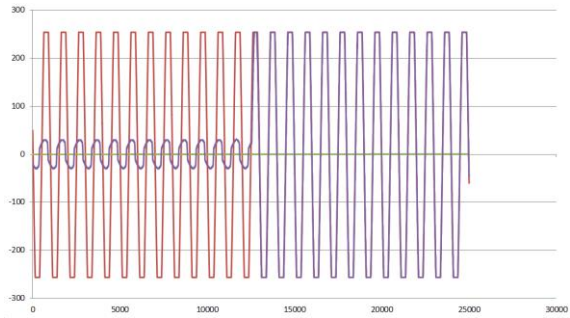
AKUISISI DATA DAN ANALISIS EKSPERIMEN PENGURANGAN ARUS *INRUSH*

Pada bab ini dibahas mengenai pengambilan data pengurangan arus *inrush* transformator 3 fasa. Tahap awal dilakukan kalibrasi sudut penyalan agar didapat sudut penyalan sesuai yang sudah ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan pengujian arus *inrush* tanpa menggunakan *pre energize* dan dengan menggunakan *pre energize*. Hasil yang didapat kemudian akan dibandingkan dan dianalisis.

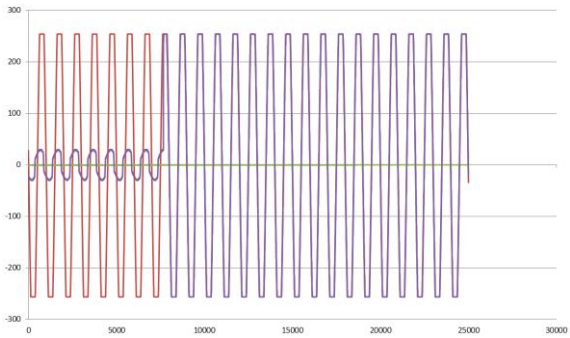
4.1 Kalibrasi sudut penyalan

Kalibrasi sudut penyalan dilakukan dengan cara melihat respons tegangan keluaran rangkaian komponen pensaklaran dan sumber tegangan AC yang akan digunakan untuk meng-*energize* transformator dengan menggunakan osiloskop. Probe *Channel 1* pada osiloskop dihubungkan dengan sumber tegangan AC fasa R, dan probe *Channel 2* osiloskop dihubungkan dengan keluaran dari rangkaian pensaklaran. Setelah menghubungkan kedua probe dari osiloskop selanjutnya sumber AC dinyalakan dan kemudian dilakukan *closing* terhadap *switch* dari komponen pensaklaran. Saat setelah melakukan *closing switch* maka akan muncul sinyal *output* dari kedua *channel* sinyal ini akan disimpan pada USB dan akan diolah melalui komputer. Sinyal akan diolah pada *software* Microsoft excel untuk mendapatkan *delay* yang sesuai pada arduino.

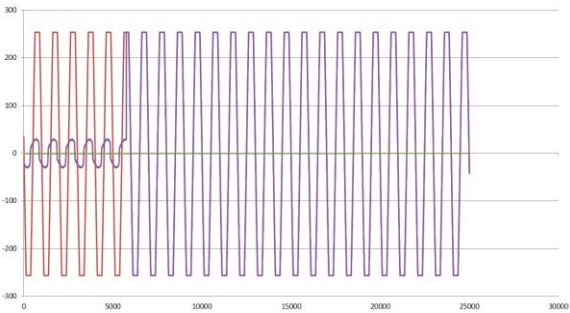
Setelah mendapatkan perkiraan *delay* maka selanjutnya mengaplikasikan nilai tersebut kepada program arduino untuk mendapatkan sudut penyalan yang sesuai dan mengunggah kode tersebut kepada arduino. Pada pengujian ini digunakan 3 sudut tegangan yang berbeda yakni 0, 60, dan 90 derajat secara non-sekuensial dan mengacu pada fasa R (fasa yang tidak dilakukan *pre energize*). Hasil kalibrasi sudut penyalan untuk setiap sudut dapat dilihat pada gambar 4.1, gambar 4.2 dan gambar 4.3.



Gambar 4.1 Kalibrasi sudut penyalan 0 derajat



Gambar 4.2 Kalibrasi sudut penyalan 60 derajat



Gambar 4.3 Kalibrasi sudut penyalan 90 derajat

4.2 Akuisisi data

Akuisisi data arus *inrush* pada transformator 3 fasa 3 kVA dalam kondisi tanpa beban dilakukan dengan menggunakan perangkat keras DAQ 4296 yang kemudian dihubungkan ke komputer dengan menggunakan *software* LabVIEW sebagai *user interface*. Akuisisi data dilakukan pada 3 kondisi sudut penyalan yaitu 0, 60, dan 90 derajat secara non-sekuensial (ketiga fasa di-*energize* secara bersamaan) dengan melakukan proses demagnetisasi terlebih dahulu pada setiap percobaan. Pada setiap sudut penyalan diambil 2 kondisi yakni tanpa *pre energize* dan dengan menggunakan *pre energize*. Berikut adalah ketiga kondisi akuisisi data untuk membandingkan kondisi sudut penyalan dan kondisi tanpa *pre energize* dan dengan menggunakan *pre energize* :

1. Pengujian 1 (sudut penyalan 0 derajat)

- Tanpa *pre energize*
Transformator uji mengalami proses demagnetisasi terlebih dahulu selama 3 menit untuk menghilangkan fluks sisa yang terdapat pada inti agar fluks yang terdapat pada tiap fasa bernilai sama. Transformator di-*energize* secara non-sekuensial pada sudut tegangan 0 derajat untuk mendapatkan nilai arus *inrush*. Percobaan ini dilakukan sebanyak 5 kali.
- Dengan *pre energize*
Transformator uji mengalami proses demagnetisasi terlebih dahulu selama 3 menit untuk menghilangkan fluks sisa yang terdapat pada inti agar fluks yang terdapat pada tiap fasa bernilai sama. Kemudian dilakukan *charging* pada kapasitor komponen *pre energize* selama 25 detik dan setelah itu dilakukan *discharge* kapasitor terhadap fasa S dan T transformator. Setelah melakukan *pre energize*, komponen *pre energize* dilepaskan dari transformator dan transformator di-*energize* dengan sudut tegangan 0 derajat untuk mendapatkan nilai arus *inrush*. Percobaan ini dilakukan sebanyak 5 kali.

2. Pengujian 2 (sudut penyalan 60 derajat)

- Tanpa *pre energize*
Transformator uji mengalami proses demagnetisasi terlebih dahulu selama 3 menit untuk menghilangkan fluks sisa yang terdapat pada inti agar fluks yang terdapat pada tiap fasa bernilai sama. Transformator di-*energize* secara non-sekuensial pada sudut tegangan 60 derajat untuk mendapatkan nilai arus *inrush*. Percobaan ini dilakukan sebanyak 5 kali.
- Dengan *pre energize*
Transformator uji mengalami proses demagnetisasi terlebih dahulu selama 3 menit untuk menghilangkan fluks sisa yang terdapat pada inti agar fluks yang terdapat pada tiap fasa bernilai sama. Kemudian dilakukan *charging* pada kapasitor komponen *pre energize* selama 25 detik dan setelah itu dilakukan *discharge* kapasitor terhadap fasa S dan T transformator. Setelah melakukan *pre energize*, komponen *pre energize* dilepaskan dari transformator dan transformator di-*energize* dengan sudut tegangan 60 derajat untuk mendapatkan nilai arus *inrush*. Percobaan ini dilakukan sebanyak 5 kali.

3. Pengujian 3 (sudut penyalan 90 derajat)

- Tanpa *pre energize*
Transformator uji mengalami proses demagnetisasi terlebih dahulu selama 3 menit untuk menghilangkan fluks sisa yang terdapat pada inti agar fluks yang terdapat pada tiap fasa bernilai sama. Transformator di-*energize* secara non-sekuensial pada sudut tegangan 90 derajat untuk mendapatkan nilai arus *inrush*. Percobaan ini dilakukan sebanyak 5 kali.
- Dengan *pre energize*
Transformator uji mengalami proses demagnetisasi terlebih dahulu selama 3 menit untuk menghilangkan fluks sisa yang terdapat pada inti agar fluks yang terdapat pada tiap fasa bernilai sama. Kemudian dilakukan *charging* pada kapasitor komponen *pre energize* selama 25 detik dan setelah itu dilakukan *discharge* kapasitor terhadap fasa S dan T transformator. Setelah melakukan *pre energize*, komponen *pre energize* dilepaskan dari transformator dan transformator di-

energize dengan sudut tegangan 90 derajat untuk mendapatkan nilai arus *inrush*. Percobaan ini dilakukan sebanyak 5 kali.

Akuisisi data dilakukan secara bergantian untuk setiap sudut penyalan dengan melakukan pengujian tanpa menggunakan *pre energize* dan dengan *pre energize* secara berselingan untuk membandingkan data arus *inrush* tanpa *pre energize* dan dengan *pre energize*. Proses akuisisi data dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Proses pengambilan data arus *inrush* pada transformator

4.3 Hasil pengujian

Pengujian dilakukan pada transformator uji 3 kVA 3 fasa tanpa beban dengan konfigurasi belitan Y-Y dengan merubah sudut tegangan antara 0, 60, dan 90 derajat. Pengujian dilakukan dengan memperhatikan 2 kondisi yaitu tanpa *pre energize* dan dengan menggunakan *pre energize* sebelum transformator diberi tegangan.

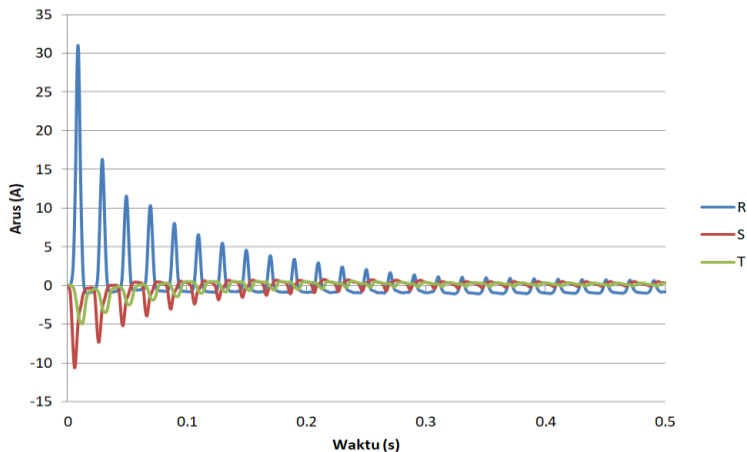
Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan transformator arus pada setiap fasa yang kemudian sisi sekunder dari transformator

arus dihubungkan pada perangkat keras akuisisi data DAQ 4296. Perangkat akuisisi data DAQ 4296 akan terkoneksi dengan komputer melalui *software* LabVIEW yang dimana akan menampilkan hasil pengukuran arus *inrush* yang direkam oleh DAQ 4296. Selanjutnya akan digunakan *software* DIAdem untuk mengolah data-data yang ditampilkan oleh LabVIEW.

4.3.1 Hasil pengujian 1

Pengujian 1 dilakukan pada sudut penyalan tegangan 0 derajat. Transformator uji akan dilakukan demagnetisasi selama 3 menit untuk setiap pengambilan data. Pada kondisi tanpa melakukan *pre energize* transformator langsung di-*energize* setelah dilakukan proses demagnetisasi untuk mengukur besarnya arus *inrush*. Pada kondisi dengan menggunakan *pre energize* transformator akan diberi fluks DC mula dengan menggunakan komponen *pre energize* yang sudah di *charge*, pengisian fluks dilakukan setelah proses demagnetisasi. Proses pengambilan data ini dilakukan sebanyak 5 kali baik pada kondisi tanpa *pre energize* dan kondisi dengan menggunakan *pre energize*.

Salah satu hasil pengukuran pengujian pada sudut penyalan 0 ini dapat dilihat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6. Sedangkan data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.1 dan tabel 4.2.

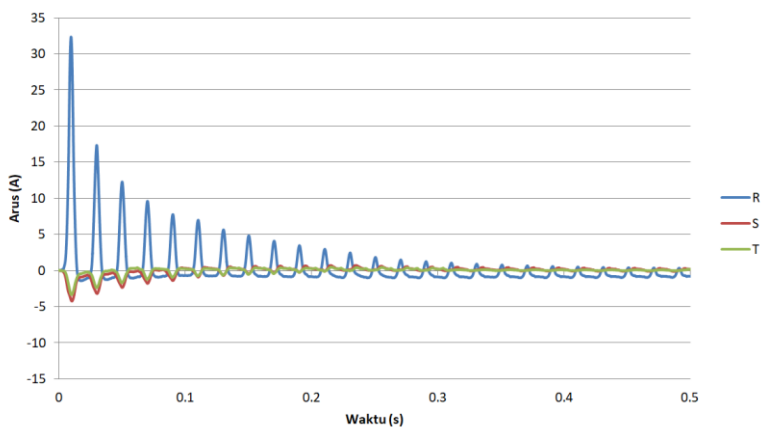


Gambar 4.5 Bentuk gelombang arus *inrush* sudut penyalan 0 derajat tanpa menggunakan *pre energize*

Tabel 4.1 Hasil pengukuran arus *inrush* sudut penyalan 0 derajat tanpa menggunakan *pre energize*

Percobaan Ke-	Arus <i>inrush</i> (A)		
	R	S	T
1	34.09	10.22	4.92
2	31.01	10.63	5.51
3	33.50	9.58	5.69
4	32.81	9.71	4.60
5	32.02	11.82	4.63

Dari hasil pengujian 1 pada sudut penyalan 0 derajat saat kondisi tanpa *pre energize* menunjukkan bahwa arus *inrush* terbesar terjadi pada fasa R dengan rentang nilai 31.01 A – 34.09 A dan nilai rata-rata sebesar 32.69 A. Pada fasa S rentang nilai arus *inrush* sebesar 9.58 A – 11.82 A dan rata-rata arus *inrush* sebesar 10.39 A . Sedangkan arus *inrush* pada fasa T menunjukkan nilai terkecil dengan rentang nilai arus *inrush* sebesar 4.60 A – 5.69 A dan rata-rata arus *inrush* sebesar 5.07 A.



Gambar 4.6 Bentuk gelombang arus *inrush* sudut penyalan 0 derajat dengan menggunakan *pre energize*

Tabel 4.2 Hasil pengukuran arus *inrush* sudut penyalan 0 derajat dengan menggunakan *pre energize*

Percobaan Ke-	Arus <i>inrush</i> (A)		
	R	S	T
1	32.31	4.22	3.86
2	31.28	4.32	3.34
3	33.61	4.15	3.69
4	30.77	4.05	3.73
5	28.82	3.95	3.35

Dari hasil pengujian 1 pada sudut penyalan 0 derajat saat kondisi dengan *pre energize* menunjukkan bahwa arus *inrush* terbesar terjadi pada fasa R dengan rentang nilai sebesar 28.82 A – 33.61 A dan nilai rata-rata sebesar 31.36 A. Pada fasa T rentang nilai arus *inrush* sebesar 3.34 A – 3.86 A dan nilai rata-rata 3.59 A .Sedangkan arus *inrush* pada fasa S menunjukkan nilai terkecil dengan rentang nilai sebesar 3.95 A – 4.32 A dan nilai rata-rata 4.14 A.

Perbandingan nilai arus *inrush* tanpa *pre energize* dan dengan *pre energize* dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perbandingan nilai arus *inrush* sudut 0 deraja tanpa *pre energize* dan dengan menggunakan *pre energize*

Percobaan Ke-	I_{inr} (A)			I_{pre} (A)		
	R	S	T	R	S	T
1	34.09	10.22	4.92	32.31	4.22	3.86
2	31.01	10.63	5.51	31.28	4.32	3.34
3	33.50	9.58	5.69	33.61	4.15	3.69
4	32.81	9.71	4.60	30.77	4.05	3.73
5	32.02	11.82	4.63	28.82	3.95	3.35

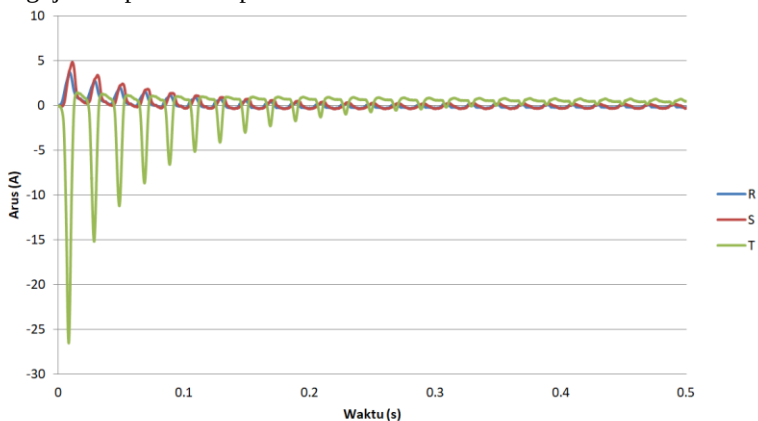
Dari tabel 4.3 menunjukkan bahwa I_{inr} adalah besar arus *inrush* tanpa menggunakan *pre energize* dan I_{pre} adalah besar arus *inrush* dengan menggunakan *pre energize*. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa fasa R tidak ada perubahan yang signifikan dengan nilai rata-rata tanpa *pre energize* sebesar 32.69 A dan dengan menggunakan *pre energize* sebesar 31.36 A. Pada fasa S terdapat penurunan yang

cukup signifikan dari tanpa *pre energize* dan dengan menggunakan *pre energize* dengan nilai rata-rata arus *inrush* tanpa *pre energize* sebesar 10.39 A dan dengan menggunakan *pre energize* sebesar 4.14 A. Pada fasa T terdapat sedikit perubahan nilai arus *inrush* dengan nilai rata-rata untuk tanpa *pre energize* sebesar 5.07 A dan dengan menggunakan *pre energize* sebesar 3.59 A.

4.3.2 Hasil pengujian 2

Pengujian 1 dilakukan pada sudut penyalan tegangan 60 derajat. Transformator uji akan dilakukan demagnetisasi selama 3 menit untuk setiap pengambilan data. Pada kondisi tanpa melakukan *pre energize* transformator langsung di-*energize* setelah dilakukan proses demagnetisasi untuk mengukur besarnya arus *inrush*. Pada kondisi dengan menggunakan *pre energize* transformator akan diberi fluks DC mula dengan menggunakan komponen *pre energize* yang sudah di *charge*, pengisian fluks dilakukan setelah proses demagnetisasi. Proses pengambilan data ini dilakukan sebanyak 5 kali baik pada kondisi tanpa *pre energize* dan kondisi dengan menggunakan *pre energize*.

Salah satu hasil pengukuran pengujian pada sudut penyalan 60 ini dapat dilihat pada gambar 4.7 dan gambar 4.8. Sedangkan data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.4 dan tabel 4.5.

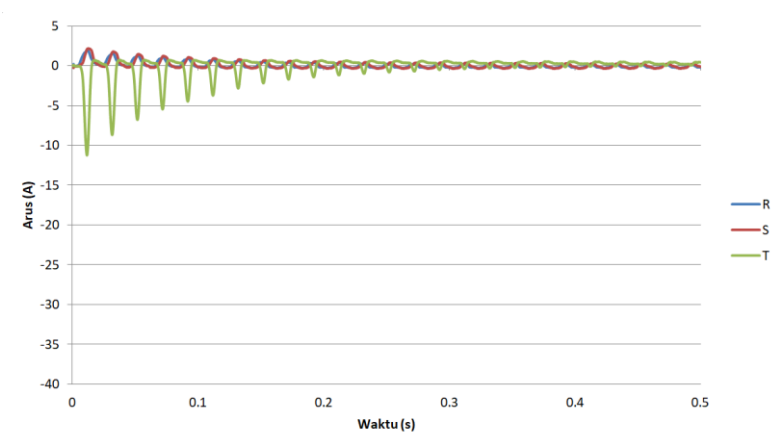


Gambar 4.7 Bentuk gelombang arus *inrush* sudut penyalan 60 derajat tanpa menggunakan *pre energize*

Tabel 4.4 Hasil pengukuran arus *inrush* sudut penyalan 60 derajat tanpa menggunakan *pre energize*

Percobaan Ke-	Arus <i>inrush</i> (A)		
	R	S	T
1	3.68	4.82	26.55
2	4.13	4.26	30.04
3	4.07	4.81	29.25
4	4.16	4.74	29.70
5	3.47	5.28	25.55

Dari hasil pengujian 2 pada sudut penyalan 60 derajat saat kondisi tanpa *pre energize* menunjukkan bahwa arus *inrush* terkecil terjadi pada fasa R dengan rentang nilai 3,47 A – 4.16 A dan nilai rata-rata sebesar 3.89 A. Pada fasa S rentang nilai arus *inrush* sebesar 4.26 A – 5.28 A dan rata-rata arus *inrush* sebesar 4.78 A . Sedangkan arus *inrush* pada fasa T menunjukkan nilai terbesar dengan rentang nilai arus *inrush* sebesar 25.55 A – 30.04 A dan nilai rata-rata 28.22 A .



Gambar 4.8 Bentuk gelombang arus *inrush* sudut penyalan 60 derajat dengan menggunakan *pre energize*

Tabel 4.5 Hasil pengukuran arus *inrush* sudut penyalan 60 derajat dengan menggunakan *pre energize*

Percobaan Ke-	Arus <i>inrush</i> (A)		
	R	S	T
1	1.34	2.95	10.68
2	1.86	2.15	11.22
3	1.91	2.13	10.89
4	1.94	2.30	10.30
5	1.83	2.51	10.42

Dari hasil pengujian 2 pada sudut penyalan 60 derajat saat kondisi dengan *pre energize* menunjukkan bahwa arus *inrush* terkecil terjadi pada fasa R dengan rentang nilai sebesar 1.34 A – 1.94 A dan nilai rata-rata sebesar 1.78 A. Pada fasa S rentang nilai arus *inrush* sebesar 2.13 A – 2.95 A dan rata-rata arus *inrush* sebesar 2.41 A. Sedangkan arus *inrush* pada fasa T menunjukkan nilai terbesar dengan rentang nilai sebesar 10.30 A – 11.22 A dan nilai rata-rata 10.70 A.

Perbandingan nilai arus *inrush* tanpa *pre energize* dan dengan *pre energize* dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perbandingan nilai arus *inrush* sudut 60 derajat tanpa *pre energize* dan dengan menggunakan *pre energize*

Percobaan Ke-	I_{inr} (A)			I_{pre} (A)		
	R	S	T	R	S	T
1	3.68	4.82	26.55	1.34	2.95	10.68
2	4.13	4.26	30.04	1.86	2.15	11.22
3	4.07	4.81	29.25	1.91	2.13	10.89
4	4.16	4.74	29.70	1.94	2.30	10.30
5	3.47	5.28	25.55	1.83	2.51	10.42

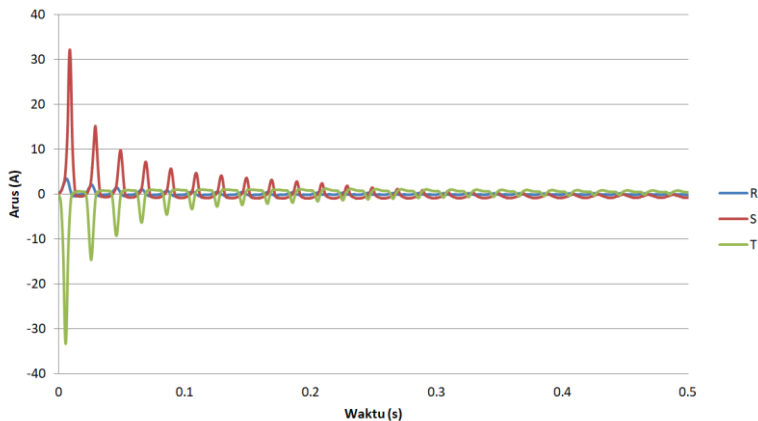
Dari tabel 4.6 menunjukkan bahwa I_{inr} adalah besar arus *inrush* tanpa menggunakan *pre energize* dan I_{pre} adalah besar arus *inrush* dengan menggunakan *pre energize*. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa fasa R tidak ada perubahan yang signifikan dengan nilai rata-rata tanpa *pre energize* sebesar 3.89 A dan dengan menggunakan *pre energize* sebesar 1.78 A. Pada fasa S terdapat sedikit penurunan nilai arus *inrush* dari tanpa *pre energize* dan dengan menggunakan *pre energize* dengan nilai rata-rata arus *inrush* tanpa *pre energize* sebesar 4.26 A dan dengan

menggunakan *pre energize* sebesar 2.41A. Pada fasa T terdapat perubahan yang cukup signifikan terhadap nilai arus *inrush* dengan nilai rata-rata untuk tanpa *pre energize* sebesar 28.22 A dan dengan menggunakan *pre energize* sebesar 10.70 A.

4.3.3 Hasil pengujian 3

Pengujian 3 dilakukan pada sudut penyalan tegangan 90 derajat. Transformator uji akan dilakukan demagnetisasi selama 3 menit untuk setiap pengambilan data. Pada kondisi tanpa melakukan *pre energize* transformator langsung di-*energize* setelah dilakukan proses demagnetisasi untuk mengukur besarnya arus *inrush*. Pada kondisi dengan menggunakan *pre energize* transformator akan diberi fluks DC mula dengan menggunakan komponen *pre energize* yang sudah di *charge*, pengisian fluks dilakukan setelah proses demagnetisasi. Proses pengambilan data ini dilakukan sebanyak 5 kali baik pada kondisi tanpa *pre energize* dan kondisi dengan menggunakan *pre energize*.

Salah satu hasil pengukuran pengujian pada sudut penyalan 90 ini dapat dilihat pada gambar 4.9 dan gambar 4.10. Sedangkan data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.7 dan tabel 4.8.

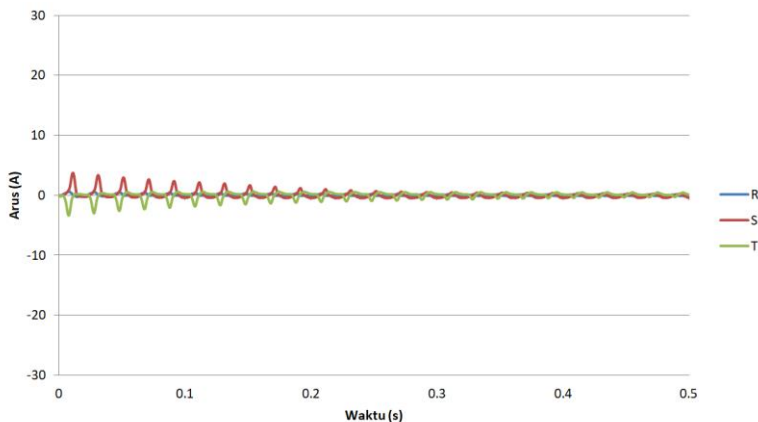


Gambar 4.9 Bentuk gelombang arus *inrush* sudut penyalan 90 derajat tanpa menggunakan *pre energize*

Tabel 4.7 Hasil pengukuran arus *inrush* sudut penyalan 90 derajat tanpa menggunakan *pre energize*

Percobaan Ke-	Arus <i>inrush</i> (A)		
	R	S	T
1	3.41	32.12	32.16
2	2.89	32.52	31.23
3	3.97	34.61	34.41
4	3.81	32.45	32.83
5	3.45	33.11	32.15

Dari hasil pengujian 3 pada sudut penyalan 90 derajat saat kondisi tanpa *pre energize* menunjukkan bahwa arus *inrush* terkecil terjadi pada fasa R dengan rentang nilai 2.89 A – 3.97 A dan nilai rata-rata sebesar 3.51 A. Pada fasa S rentang nilai arus *inrush* sebesar 32.12 A – 34.61 A dan rata-rata arus *inrush* sebesar 32.96 A . Sedangkan arus *inrush* pada fasa T menunjukkan nilai yang berdekatan dengan fasa S dengan rentang nilai arus *inrush* sebesar 31.23 A – 34.41 A dan nilai rata-rata 32.56 A .



Gambar 4.10 Bentuk gelombang *inrush* sudut penyalan 90 derajat dengan menggunakan *pre energize*

Tabel 4.8 Hasil pengukuran arus *inrush* sudut penyalan 90 derajat dengan menggunakan *pre energize*

Percobaan Ke-	Arus <i>inrush</i> (A)		
	R	S	T
1	0.71	3.72	3.57
2	0.70	3.69	3.48
3	0.75	3.12	4.14
4	0.81	3.47	3.78
5	0.74	3.03	4.02

Dari hasil pengujian 3 pada sudut penyalan 90 derajat saat kondisi dengan *pre energize* menunjukkan bahwa arus *inrush* terkecil terjadi pada fasa R dengan rentang nilai sebesar 0.70 A – 0.81 A dan nilai rata-rata sebesar 0.74 A. Pada fasa S rentang nilai arus *inrush* sebesar 3.03 A – 3.72 A dan rata-rata arus *inrush* sebesar 3.41 A. Sedangkan arus *inrush* pada fasa T menunjukkan nilai yang berdekatan dengan fasa S dengan rentang nilai sebesar 3.48 A – 4.14 A dan nilai rata-rata 3.80 A.

Perbandingan nilai arus *inrush* tanpa *pre energize* dan dengan *pre energize* dapat dilihat pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Perbandingan nilai arus *inrush* sudut 90 derajat tanpa *pre energize* dan dengan menggunakan *pre energize*

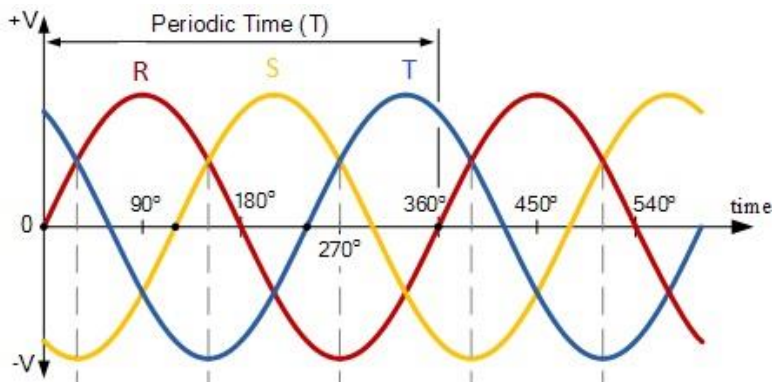
Percobaan Ke-	I_{inr} (A)			I_{pre} (A)		
	R	S	T	R	S	T
1	3.41	32.12	32.16	0.71	3.72	3.57
2	2.89	32.52	31.23	0.70	3.69	3.48
3	3.97	34.61	34.41	0.75	3.12	4.14
4	3.81	32.45	32.83	0.81	3.47	3.78
5	3.45	33.11	32.15	0.74	3.03	4.02

Dari tabel 4.9 menunjukkan bahwa I_{inr} adalah besar arus *inrush* tanpa menggunakan *pre energize* dan I_{pre} adalah besar arus *inrush* dengan menggunakan *pre energize*. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa fasa R terdapat penurunan dengan nilai rata-rata tanpa *pre energize* sebesar 3.51 A dan dengan menggunakan *pre energize* sebesar 0.74A. Pada fasa S terdapat penurunan nilai arus *inrush* yang cukup signifikan dari tanpa *pre energize* dan dengan menggunakan *pre energize* dengan nilai rata-

rata arus *inrush* tanpa *pre energize* sebesar 32.96 A dan dengan menggunakan *pre energize* sebesar 3.41 A. Pada fasa T terdapat perubahan yang cukup signifikan terhadap nilai arus *inrush* dengan nilai rata-rata untuk tanpa *pre energize* sebesar 32.56 A dan dengan menggunakan *pre energize* sebesar 3.80 A.

4.4 Analisis data

Hasil pengukuran arus *inrush* yang sudah didapat sebelumnya akan di analisis lebih lanjut pada subbab ini. Analisis data dilakukan dengan cara membandingkan besarnya arus *inrush* ketiga fasa transformator uji dalam kondisi tanpa *pre energize* dan dalam kondisi dengan *pre energize*. Analisis data dilakukan untuk setiap pengujian dengan sudut penyalan yang berbeda yaitu 0, 60, dan 90 derajat. Analisis juga dilakukan dengan melihat perbandingan arus *inrush* dengan arus nominal trafo. Arus nominal didapat dari membagi kapasitas daya dengan akar 3 tegangan nominal sehingga didapat arus nominal sebesar 4.55 A. Pada Gambar 4.11 ditampilkan grafik tegangan 3 fasa untuk mengetahui besaran tegangan tiap fasa saat sudut penyalan tertentu.



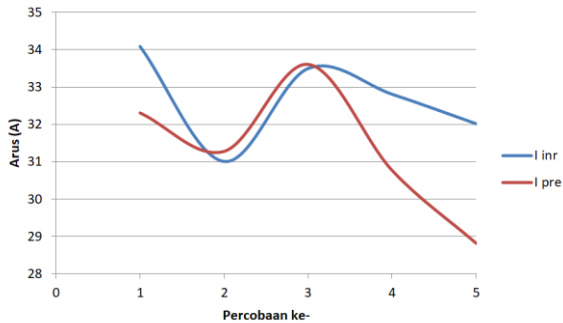
Gambar 4.11 Gelombang tegangan 3 fasa

4.4.1 Analisis data pengujian 1 sudut penyalan 0 derajat

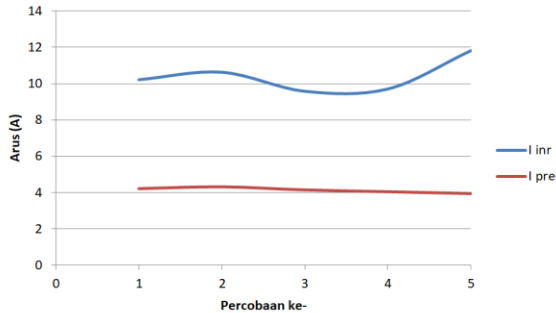
Hasil pengujian sudah didapat sebelumnya dan ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 serta

tabel 4.1 dan 4.2. Akuisisi data dilakukan sebanyak 5 kali untuk setiap kondisi baik tanpa *pre energize* ataupun dengan *pre energize*.

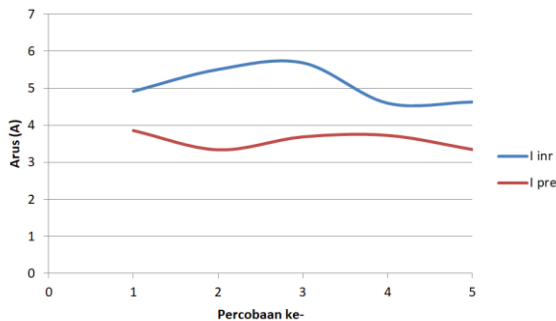
Pada tabel 4.3 sudah dibandingkan antara kedua kondisi tanpa *pre energize* dan dengan *pre energize*. Dari tabel 4.3 dapat dilihat bahwa pada kondisi tanpa *pre energize* nilai arus tertinggi ada pada fasa R yaitu dengan nilai rata-rata sebesar 32.69 A ini dikarenakan pada fasa R nilai tegangan berada pada 0 sehingga transformator akan menarik arus *inrush* yang lebih besar, sedangkan untuk fasa S nilai rata-rata arus *inrush* sebesar 10.39 A dan untuk fasa T nilai rata-rata arus *inrush* sebesar 4.14 A. Jika dilihat nilai rata-rata arus *inrush* untuk kedua fasa S dan T jauh berada di bawah nilai rata-rata arus *inrush* dari fasa R, hal ini dikarenakan pada fasa S dan T memiliki nilai tegangan yang lebih besar dari fasa R (dapat dilihat pada gambar 4.11) sehingga arus *inrush* yang dihasilkan fasa S dan T lebih kecil dari fasa R. Berikut pada gambar 4.12, gambar 4.13, dan gambar 4.14 ditampilkan grafik perbandingan besar arus *inrush* untuk setiap fasa pada kondisi tanpa *pre energize* dan dengan *pre energize*.



Gambar 4.12 Perbandingan arus *inrush* fasa R tanpa *pre energize* dengan *pre energize* sudut 0 derajat



Gambar 4.13 Perbandingan arus *inrush* fasa S tanpa *pre energize* dengan *pre energize* sudut 0 derajat



Gambar 4.14 Perbandingan arus *inrush* fasa T tanpa *pre energize* dengan *pre energize* sudut 0 derajat

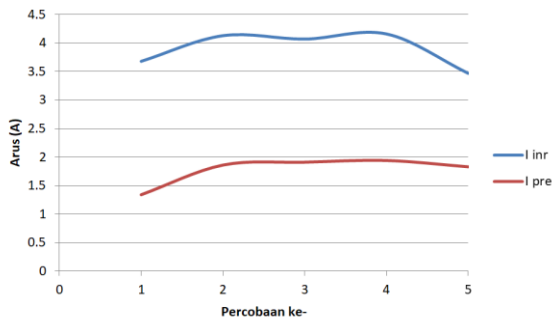
Dapat dilihat dari grafik perbandingan arus *inrush* setiap fasa untuk fasa R tidak mengalami perubahan yang signifikan saat kondisi tanpa *pre energize* dan kondisi dengan *pre energize*. Sedangkan untuk fasa S dan T terdapat penurunan arus *inrush* yang cukup signifikan. Penurunan arus *inrush* rata-rata untuk fasa S sebesar 6.25 A dan penurunan arus *inrush* rata-rata untuk fasa T sebesar 1.48 A. Fasa S dan fasa T mengalami penurunan karena adanya fluks DC mula yg diinjeksikan kepada dua fasa tersebut sehingga arus *inrush* pada transformator dapat diminimalisir. Namun pada fasa R nilai arus *inrush* masih sangat tinggi sebesar 6.89In dikarenakan pada sudut penyalan 0

derajat fasa R berada pada tegangan sebesar 0 yang memicu penarikan arus *inrush* yang besar.

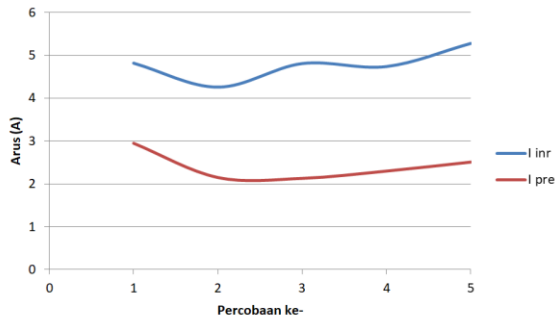
4.4.2 Analisis data pengujian 2 sudut penyalaaan 60 derajat

Hasil pengujian sudah didapat sebelumnya dan ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel pada gambar 4.7 dan gambar 4.8 serta tabel 4.4 dan 4.5. Akuisisi data dilakukan sebanyak 5 kali untuk setiap kondisi baik tanpa *pre energize* ataupun dengan *pre energize*.

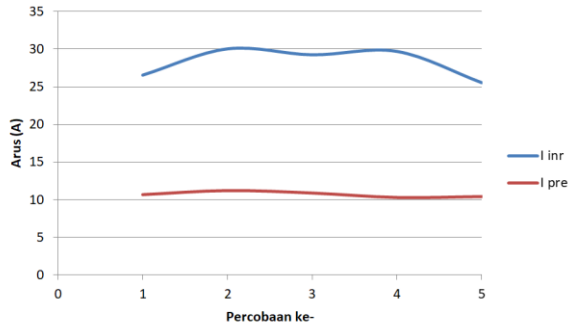
Pada tabel 4.6 sudah dibandingkan antara kedua kondisi tanpa *pre energize* dan dengan *pre energize*. Dari tabel 4.6 dapat dilihat bahwa pada kondisi tanpa *pre energize* nilai arus tertinggi ada pada fasa T yaitu dengan nilai rata-rata sebesar 28.22 A ini dikarenakan pada fasa T nilai tegangan berada pada nilai yang minimum sehingga transformator akan menarik arus *inrush* yang lebih besar, sedangkan untuk fasa R nilai rata-rata arus *inrush* sebesar 3.89 A dan untuk fasa S nilai rata-rata arus *inrush* sebesar 4.78 A. Jika dilihat nilai rata-rata arus *inrush* untuk kedua fasa R dan S jauh berada di bawah nilai rata-rata arus *inrush* dari fasa T, hal ini dikarenakan pada fasa R dan S memiliki nilai tegangan yang lebih besar dari fasa T (dapat dilihat pada gambar 4.11) sehingga arus *inrush* yang dihasilkan fasa R dan S lebih kecil dari fasa T. Berikut pada gambar 4.15, gambar 4.16, dan gambar 4.17 ditampilkan grafik perbandingan besar arus *inrush* untuk setiap fasa pada kondisi tanpa *pre energize* dan dengan *pre energize*.



Gambar 4.15 Perbandingan arus *inrush* fasa R tanpa *pre energize* dengan *pre energize* sudut 60 derajat



Gambar 4.16 Perbandingan arus *inrush* fasa S tanpa *pre energize* dengan *pre energize* sudut 60 derajat



Gambar 4.17 Perbandingan arus *inrush* fasa T tanpa *pre energize* dengan *pre energize* sudut 60 derajat

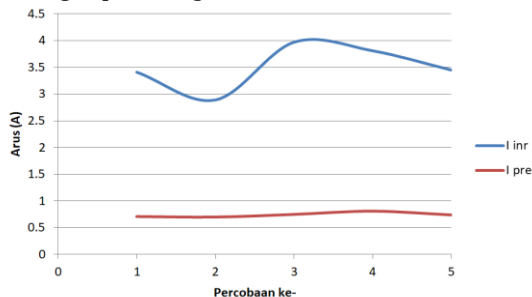
Dapat dilihat dari grafik perbandingan arus *inrush* setiap fasa mengalami penurunan saat kondisi tanpa *pre energize* dan kondisi dengan *pre energize*. Pada fasa R mengalami penurunan arus *inrush* rata-rata sebesar 2.11 A, fasa S mengalami penurunan arus *inrush* rata-rata sebesar 1.85 A, dan fasa T mengalami penurunan arus *inrush* rata-rata yang cukup signifikan sebesar 17.52 A. Dari hasil percobaan ini dapat dikatakan pemberian fluks dengan komponen *pre energize* pada fasa S dan T akan menurunkan besarnya arus *inrush* pada setiap fasa, karena dengan adanya pemberian fluks pada transformator menginisiasi fluks mula mendekati kondisi *steady state* pada transformator sehingga ketika transformator di-*energize* arus *inrush* dapat diminimalisir. Namun arus

inrush pada fasa T berada pada nilai yang cukup tinggi yaitu 28.22 A tanpa *pre energize* dikarenakan pada sudut penyalan 60 derajat tegangan fasa T berada pada nilai minimum (dapat dilihat pada gambar 4.11). Sedangkan setelah dilakukan *pre energize* nilai arus *inrush* rata-rata fasa T menjadi 10.70 A yang dimana sebesar 2.35In dan dapat dikatakan nilai ini masih cukup tinggi.

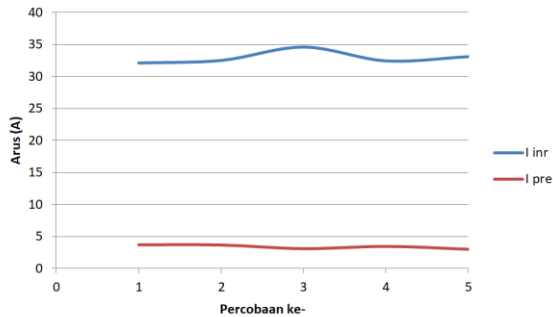
4.4.3 Analisis data pengujian 3 sudut penyalan 90 derajat

Hasil pengujian sudah didapat sebelumnya dan ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel pada gambar 4.9 dan gambar 4.10 serta tabel 4.7 dan 4.8. Akuisisi data dilakukan sebanyak 5 kali untuk setiap kondisi baik tanpa *pre energize* ataupun dengan *pre energize*.

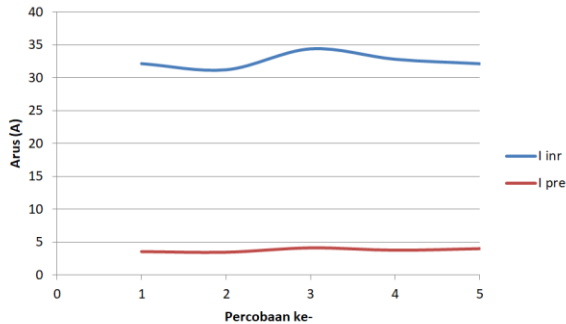
Pada tabel 4.9 sudah dibandingkan antara kedua kondisi tanpa *pre energize* dan dengan *pre energize*. Dari tabel 4.9 dapat dilihat bahwa pada kondisi tanpa *pre energize* nilai arus terendah ada pada fasa R yaitu dengan nilai rata-rata sebesar 3.51 A ini dikarenakan pada fasa R nilai tegangan berada pada nilai yang maksimum sehingga transformator akan menarik arus *inrush* yang minimum, sedangkan untuk fasa S nilai rata-rata arus *inrush* sebesar 32.96 A dan untuk fasa T nilai rata-rata arus *inrush* sebesar 32.56 A. Jika dilihat nilai rata-rata arus *inrush* untuk kedua fasa S dan T jauh berada di atas nilai rata-rata arus *inrush* dari fasa R, hal ini dikarenakan pada fasa S dan T memiliki nilai tegangan yang lebih kecil dari fasa T (dapat dilihat pada gambar 4.11) sehingga arus *inrush* yang dihasilkan fasa S dan T lebih besar dari fasa R. Berikut pada gambar 4.18, gambar 4.19, dan gambar 4.20 ditampilkan grafik perbandingan besar arus *inrush* untuk setiap fasa pada kondisi tanpa *pre energize* dan dengan *pre energize*.



Gambar 4.18 Perbandingan arus *inrush* fasa R tanpa *pre energize* dengan *pre energize* sudut 90 derajat



Gambar 4.19 Perbandingan arus *inrush* fasa S tanpa *pre energize* dengan *pre energize* sudut 90 derajat



Gambar 4.20 Perbandingan arus *inrush* fasa T tanpa *pre energize* dengan *pre energize* sudut 90 derajat

Dapat dilihat dari grafik perbandingan arus *inrush* setiap fasa mengalami penurunan saat kondisi tanpa *pre energize* dan kondisi dengan *pre energize*. Pada fasa R mengalami penurunan arus *inrush* rata-rata sebesar 2.77 A, fasa S mengalami penurunan arus *inrush* rata-rata yang cukup signifikan sebesar 29.55 A, dan fasa T mengalami penurunan arus *inrush* rata-rata yang cukup signifikan sebesar 28.76 A. Dari hasil percobaan ini dapat dikatakan pemberian fluks dengan komponen *pre energize* pada fasa S dan T akan menurunkan besarnya arus *inrush* pada setiap fasa, karena dengan adanya pemberian fluks pada transformator menginisiasi fluks mula yang mendekati nilai fluks pada saat *steady state* pada transformator sehingga ketika transformator di-*energize* arus

inrush dapat diminimalisir. Pada sudut penyalan 90 derajat nilai arus *inrush* tiap fasa dibandingkan dengan arus nominal (I_n) sudah memiliki nilai yang cukup rendah. Pada fasa R nilai arus *inrush* dengan *pre energize* sebesar $0.16I_n$, pada fasa S sebesar $0.75I_n$, dan pada fasa T sebesar $0.84I_n$. Nilai yang didapat pada sudut penyalan 90 berada pada nilai minimum untuk ketiga fasa dibandingkan dengan sudut penyalan 0 derajat yang memiliki nilai fasa R yang tinggi dan sudut penyalan 60 derajat yang memiliki nilai fasa T yang tinggi. Sehingga *energize* transformator dengan metode *pre energize* akan menghasilkan nilai arus *inrush* yang minimum pada sudut penyalan 90 derajat.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan pengujian pengurangan arus *inrush* pada transformator 3 fasa 3 kVA dengan menggunakan metode *pre energize* dengan melakukan 3 pengujian dengan sudut penyalan yang berbeda yaitu 0, 60, dan 90 derajat, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sudut penyalan merupakan salah satu hal yang menentukan besar dan kecilnya nilai arus *inrush* pada transformator. Sudut penyalan 0 derajat pada setiap fasa (tegangan minimum) akan menghasilkan nilai arus *inrush* yang besar pada fasa R dengan nilai rata-rata 32.69 A. Sedangkan sudut penyalan 90 derajat pada setiap fasa (tegangan maksimum) akan menghasilkan nilai arus *inrush* yang minimum dengan nilai rata-rata 0.74 A pada fasa R, 3.41 A pada fasa S dan 3.80 A pada fasa T.
2. Dalam merancang suatu komponen *pre energize* hal utama yang perlu diperhatikan adalah besarnya nilai induktansi magnetisasi (L_m) dari suatu transformator. Jika nilai induktansi magnetisasi dari suatu transformator tidak diketahui (tidak adanya data pabrikan) dapat dilakukan asumsi perhitungan untuk mendapatkan nilai induktansi magnetisasi dari suatu transformator yang sudah dibahas pada studi ini.
3. Nilai arus *inrush* pada setiap pengujian selalu menunjukkan nilai yang lebih rendah untuk transformator uji yang diberi fluks mula terlebih dahulu dibandingkan dengan yang di-*energize* tanpa adanya pemberian fluks DC mula. Selisih pengurangan arus *inrush* untuk setiap fasa dan setiap sudut penyalan berada pada rentang 1.48 A – 28.22 A. Pemberian fluks DC mula dengan menggunakan komponen *pre energize* berupa kapasitor yang di *charge* dan kemudian di *discharge* ke fasa S dan T transformator terbukti dapat mengurangi besarnya nilai arus *inrush* dilihat dari pengujian yang telah dilakukan.
4. Fluks yang berada pada transformator sebelum dilakukan *energize* memengaruhi besarnya nilai arus *inrush* yang terbagkit. Jika fluks yang berada pada inti transformator tidak sesuai dengan saat kondisi *steady state* maka arus *inrush* yang terbangkit kemungkinan dapat

bernilai tinggi. Sedangkan jika fluks yang terdapat pada inti transformator mendekati atau sama dengan nilai fluks pada saat kondisi *steady state* arus *inrush* yang terbangkit akan bernilai rendah. Komponen *pre energize* membantu menginisiasi fluks mula pada trnasformator agar mendekati fluks pada kondisi *steady state*.

5. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan metode *pre energize* akan bekerja maksimal ketika sudut penyalaan 90 derajat, karena arus *inrush* yang dihasilkan bernilai paling kecil, dengan rata-rata 0.74 A pada fasa R, 3.41 A pada fasa S dan 3.80 A pada fasa T. Pada sudut 0 derajat nilai arus *inrush* masih cukup tinggi untuk fasa R dengan nilai rata-rata sebesar 31.36 A. Sedangkan pada sudut 60 arus *inrush* masih bernilai tinggi untuk fasa T dengan rata-rata sebesar 10.70 A.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian serupa selanjutnya adalah perlunya alat pengukur fluks yang presisi agar penelitian dengan topik yang serupa dapat dilakukan lebih sempurna. Bentuk inti transformator modifikasi juga dapat menjadi pertimbangan untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Chiesa, *Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [2] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer engineering: design and practice*. New York: Marcel Dekker, Inc, 2004.
- [3] B. Poulin, R. Del Vecchio, P. Feghali, R. Ahuja, and D. Shah, *Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers*. CRC Press, 2001.
- [4] M. P. J. Kotak and A. Thakur, "INRUSH CURRENT REDUCTION IN THREE PHASE POWER TRANSFORMER BY USING PREFLUXING TECHNIQUE," vol. 5, no. 10, p. 10.
- [5] S. J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- [6] J. Winders, *Power Transformers: Principles and Applications*, vol. 17. CRC Press, 2002.
- [7] N. Chen, C. Wang, J. Zhang, F. Yang, Y. Chen, and W. Hong, "The inrush current analysis and restraining method of energizing no-load transformer," in *2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, Shanghai, China, 2016, pp. 204–207.
- [8] S. A. M. Mirkalaei and F. Hashiesh, "Controlled switching to mitigate power transformers inrush current phenomenon," in *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Stoke On Trent, United Kingdom, 2015, pp. 1–4.
- [9] A. Reis, J. C. de Oliveira, R. Apolonio, and H. S. Bronzeado, "A controlled switching methodology for transformer inrush current elimination: Theory and experimental validation," in *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Lisbon, Portugal, 2011, pp. 1–6.
- [10] M. P. J. Kotak and J. Singh, "Prefluxing Technique to Mitigate Inrush Current of Three-Phase Power Transformer," vol. 4, no. 6, p. 7, 2013.
- [11] D. I. Taylor, J. D. Law, B. K. Johnson, and N. Fischer, "Single-Phase Transformer Inrush Current Reduction Using Prefluxing," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 1, pp. 245–252, Jan. 2012.
- [12] I Made Yulistya Negara, Arif Musthofa, dan Yudha Rohman Setiadi, "Analisis karakteristik arus *inrush* pada trafo 3 fasa akibat

pengaruh residual fluks,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.

BIODATA PENULIS



Hadwim Septiawan, dilahirkan di Jakarta pada 12 September 1997. Merupakan anak tunggal dari pasangan suami istri Bapak Dwi Murtono dan Ibu Eka Haryati. Masa kecil penulis dihabiskan di kota industri Cilegon, dimana penulis menuntut ilmu di TK-SD Al-azhar Syifa budi YPWKS Cilegon selama masing-masing 2 tahun dan 6 tahun. Kemudian penulis melanjutkan studi di jenjang SMP di SMP Negeri 1 Cilegon selama 3 tahun dan dilanjutkan dengan jenjang SMA di SMAN 2 KS Cilegon selama 3 tahun. Setelah menyelesaikan masa SMA, penulis melanjutkan pendidikan ke S1 Teknik Elektro ITS, Surabaya. Selama perkuliahan penulis aktif dalam organisasi forda mahasiswa banten di Surabaya sebagai ketua birokrasi sosial. Penulis juga aktif dalam berbagai bidang kepanitian dalam acara fakultas maupun departemen. Penulis juga aktif dalam berbagai pelatihan *hardskill* ataupun *softskill* mulai dari LKMM Pra TD hingga pelatihan ETAP dan *High Voltage measurement training*. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email hadwims77@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan