TUGAS AKHIR – EE184801

ANALISA SUDUT PENYALAAN *ENERGIZING* TERHADAP ARUS *INRUSH* PADA TRANSFORMATOR 3 FASA

Muhammad Renaldy Jovananda
NRP 07111540000078

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T, M.Sc.
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

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

FINAL PROJECT – EE184801

ANALYSIS OF ENERGIZING SWITCHING ANGLE ON INRUSH CURRENT IN 3-PHASE TRANSFORMER

Muhammad Renaldy Jovananda
NRP 07111540000078

Advisor
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T, M.Sc.
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
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 "**Analisa Sudut Penyalaan *Energizing* terhadap Arus *Inrush* pada Transformator 3 Fasa**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan 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, 21 Mei 2019

Muhammad Renaldy Jovananda
NRP. 07111540000078

ANALISA SUDUT PENYALAAN *ENERGIZING* TERHADAP ARUS *INRUSH* PADA TRANSFORMATOR 3 FASA

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T, M.Sc.	Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 19700712 199802 1001	NIP. 19731119 200003 1001

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

SURABAYA
JULI, 2019

ANALISA SUDUT PENYALAAN *ENERGIZING* TERHADAP ARUS *INRUSH* PADA TRANSFORMATOR 3 FASA

Nama : Muhammad Renaldy Jovananda
NRP : 07111540000078
Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T, M.Sc.
Pembimbing II : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Arus *inrush* merupakan suatu fenomena transien yang umum terjadi pada peralatan listrik yang menggunakan prinsip kerja elektromagnetik. Arus *inrush* dapat menimbulkan beberapa masalah, seperti: menyebabkan kesalahan operasi dari rele proteksi, mengurangi umur dari transformator, dan biasanya dapat mengurangi kualitas daya dari suatu sistem tenaga listrik. Pada studi ini akan dibahas pengaruh dari sudut penyalaan saat proses *energize* terhadap arus *inrush* yang timbul pada transformator 3 fasa. Studi dilakukan dengan melakukan pengujian terhadap transformator uji 3 fasa 3 kVA dengan pembuatan modul pengujian untuk mengatur sudut penyalaan dengan 7 variasi sudut penyalaan dimulai dari 0° hingga 180°. Hasil dari pengujian ini adalah didapat bahwa arus *inrush* yang timbul akan bernilai maksimum ketika tegangan yang diinjeksi ke transformator berada di titik minimum atau berada pada sudut penyalaan 0° atau 180°, sedangkan arus *inrush* akan bernilai minimum ketika tegangan yang diinjeksi ke transformator berada di titik maksimum atau berada pada sudut penyalaan 90°. Hal tersebut dikarenakan kebutuhan fluks dalam transformator mencapai besaran tertentu untuk mencapai titik saturasi yang diinginkan.

Kata kunci: Arus *Inrush*, Sudut Penyalaan, Transformator 3 Fasa, Pengujian

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

ANALYSIS OF ENERGIZING SWITCHING ANGLE ON INRUSH CURRENT IN 3-PHASE TRANSFORMER

Name : **Muhammad Renaldy Jovananda**
NRP : **07111540000078**
Advisor I : **Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T, M.Sc.**
Advisor II : **Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.**

ABSTRACT

Inrush current is a transient phenomenon that commonly happen in electrical equipment that used electromagnetic principle. Inrush current caused some problem, for example: protection relay operation fault, decrease the lifetime of transformer, and usually decrease power quality in power system. In this study, will be discussed about the effect of energizing switching angle on inrush current which arises in 3-phase transformer. Studies conducted with an experiment in 3 kVA 3-phase transformer and a module to control the switching angle with 7 variations of switching angle from 0° to 180°. The result of the experiments is the inrush current will be at maximum value when the voltage that applied is at minimum value or at switching angle 0° and 180°, meanwhile the inrush current will be at minimum value when the voltage that applied is at maximum value or at switching angle 90°. This is because flux in the transformer need to reach some value to get the saturation desired.

Keywords: Inrush Current, Switching Angle, 3-Phase Transformer, Experiment

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan tepat waktunya. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang berjudul:

ANALISIS SUDUT PENYALAAN *ENERGIZING* TERHADAP ARUS *INRUSH* PADA TRANSFORMATOR 3 FASA

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Allah SWT Yang Maha Kuasa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Kedua Orang tua penulis, Bapak Sutedjo Dwi Prasongko dan Ibu Siti Ulfa Chanifah yang selalu memberikan doa, nasehat, dan semangat kepada penulis sehingga tugas akhir ini bisa terselesaikan.
3. Bapak Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T, M.Sc. dan Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dan berbagi ilmu selama penelitian tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. selaku Ketua Departemen serta seluruh dosen dan karyawan yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuannya selama proses perkuliahan di Teknik Elektro ITS.
5. Mas Arief Budi Ksatria dan Mas Aditya Wahyu Ramadhan yang senantiasa membantu memberikan masukan dalam penulisan tugas akhir ini.
6. I Gede Arka Prawira Putra dan Hadwim Septiawan yang senantiasa membantu penulis dalam pengujian di laboratorium.
7. Teman-teman asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
8. Seluruh keluarga besar e-55 atas semangat dan motivasi selama 4 tahun di jurusan teknik elektro.

9. Pihak-pihak lain yang belum bisa penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, 21 Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
PERNYATAAN KEASLIAN
HALAMAN PENGESAHAN
ABSTRAK ..... **i**
ABSTRACT ..... **iii**
KATA PENGANTAR ..... **v**
DAFTAR ISI ..... **vii**
DAFTAR GAMBAR ..... **ix**
DAFTAR TABEL ..... **xiii**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Sistematika Penulisan 2
BAB II TRANSFORMATOR DAN ARUS *INRUSH* **5**
2.1 Transformator 5
2.2 Transformator Ideal dan Tidak ideal 6
2.3 Rugi Transformator 10
2.4 Transformator 3 Fasa 10
2.5 Arus *Inrush* 12
BAB III RANCANGAN PENGATUR SUDUT PENYALAAN DAN SKEMA PENGAMBILAN DATA ARUS INRUSH **15**
3.1 Modul Pengatur Sudut Penyalaan *Energize* 15
3.1.1 *Zero Crossing Detector* 15
3.1.2 Arduino 16
3.1.3 *Driver TRIAC* dan *TRIAC* 17
3.2 Skema Pengambilan Data Arus *Inrush* 19
3.2.1 Sumber 3-Fasa 20
3.2.2 Modul Pengatur Sudut Penyalaan *Energize* 20
3.2.3 Transformator Arus (CT) 21
3.2.4 Transformator 3-Fasa 21
3.2.5 *Data Acquistion (*DAQ) 9246 23
3.2.6 *Personal Computer* (PC) 23
3.2.7 Demagnetisasi 24
3.2.8 Osiloskop 25
BAB IV PENGATURAN SUDUT PENYALAAN DAN ANALISA PENGUJIAN ARUS *INRUSH* **27**
4.1 Pengaturan Sudut Penyalaan 27
4.1.1 Sudut Penyalaan 0 Derajat 29
4.1.2 Sudut Penyalaan 30 Derajat 30

4.1.3 Sudut Penyalaan 60 Derajat 31
4.1.4 Sudut Penyalaan 90 Derajat 32
4.1.5 Sudut Penyalaan 120 Derajat 34
4.1.6 Sudut Penyalaan 150 Derajat 35
4.1.7 Sudut Penyalaan 180 Derajat 36
4.2 Proses Akuisisi Data 37
4.3 Hasil Pengujian 38
4.3.1 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 0 Derajat 39
4.3.2 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 30 Derajat 41
4.3.3 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 60 Derajat 43
4.3.4 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 90 Derajat 45
4.3.5 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 120 Derajat 47
4.3.6 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 150 Derajat 49
4.3.7 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 180 Derajat 51
4.4 Analisis Data 53
BAB V PENUTUP 61
5.1 Kesimpulan 61
5.2 Saran 61
DAFTAR PUSTAKA 63
LAMPIRAN 65
RIWAYAT HIDUP 69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konstruksi Dasar dari Transformator	5
Gambar 2.2	Transformator tipe *shell*.....	6
Gambar 2.3	Transformator tipe *core*	6
Gambar 2.4	Fluks dalam inti transformator.....	7
Gambar 2.5	Kurva histerisis pada transformator.....	9
Gambar 2.6	Tiga transformator 1-fasa yang dihubungkan menjadi satu transformator 3-fasa	11
Gambar 2.7	Transfomator tiga fasa yang terhubung dalam satu lengan	11
Gambar 2.8	Contoh arus *inrush* yang muncul pada suatu transformator	13
Gambar 3.1	Blok diagram modul pengatur sudut penyalaan	15
Gambar 3.2	Rangkaian *zero crossing detector*.....	16
Gambar 3.3	Sinyal keluaran *zero crossing detector*.....	16
Gambar 3.4	Rangkaian Arduino.....	17
Gambar 3.5	Rangkaian driver TRIAC, TRIAC dan snubber.....	18
Gambar 3.6	Contoh keluaran modul sudut 60 derajat	18
Gambar 3.7	Contoh keluaran modul sudut 120 derajat	19
Gambar 3.8	Skema pengambilan data arus *inrush*	19
Gambar 3.9	Panel sumber 3-fasa.....	20
Gambar 3.10	Modul pengatur sudut penyalaan *energize*	20
Gambar 3.11	Transformator arus (CT).....	21
Gambar 3.12	Transformator 3-fasa; (a) tampak depan, (b) tampak samping.....	22
Gambar 3.13	DAQ 9246.....	23
Gambar 3.14	Tampilan LabVIEW	24
Gambar 3.15	Tampilan DIAdem.....	24
Gambar 3.16	Osiloskop GW INSTEK GDS-3254.....	25
Gambar 4.1	Rangkaian pengujian pengaturan sudut penyalaan ..	27
Gambar 4.2	*Source code* Arduino yang diatur	28
Gambar 4.3	Pengaturan sudut penyalaan 0 derajat.....	29
Gambar 4.4	Pengaturan sudut penyalaan 30 derajat.....	30
Gambar 4.5	Pengaturan sudut penyalaan 60 derajat.....	32
Gambar 4.6	Pengaturan sudut penyalaan 90 derajat.....	33
Gambar 4.7	Pengaturan sudut penyalaan 120 derajat.....	34
Gambar 4.8	Pengaturan sudut penyalaan 150 derajat.....	35
Gambar 4.9	Pengaturan sudut penyalaan 180 derajat.....	36

Gambar 4.10 Proses akuisisi data 38
Gambar 4.11 Arus *inrush* tanpa proses demagnetisasi 39
Gambar 4.12 Arus *inrush* dengan proses demagnetisasi selama 30 menit 39
Gambar 4.13 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 0° untuk 3-fasa 40
Gambar 4.14 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 0° untuk fasa R 40
Gambar 4.15 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 0° untuk fasa S 41
Gambar 4.16 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 0° untuk fasa T 41
Gambar 4.17 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 30° untuk 3-fasa 42
Gambar 4.18 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 30° untuk fasa R 42
Gambar 4.19 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 30° untuk fasa S 43
Gambar 4.20 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 30° untuk fasa T 43
Gambar 4.21 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 60° untuk 3-fasa 44
Gambar 4.22 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 60° untuk fasa R 44
Gambar 4.23 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 60° untuk fasa S 45
Gambar 4.24 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 60° untuk fasa T 45
Gambar 4.25 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 90° untuk 3-fasa 46
Gambar 4.26 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 90° untuk fasa R 46
Gambar 4.27 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 90° untuk fasa S 47
Gambar 4.28 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 90° untuk fasa T 47
Gambar 4.29 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 120° untuk 3-fasa 48

Gambar 4.30 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 120° untuk fasa R 48
Gambar 4.31 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 120° untuk fasa S 49
Gambar 4.32 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 120° untuk fasa T 49
Gambar 4.33 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 150° untuk 3-fasa 50
Gambar 4.34 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 150° untuk fasa R 50
Gambar 4.35 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 150° untuk fasa S 51
Gambar 4.36 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 150° untuk fasa T 51
Gambar 4.37 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 180° untuk 3-fasa 52
Gambar 4.38 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 180° untuk fasa R 52
Gambar 4.39 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 180° untuk fasa S 53
Gambar 4.40 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 180° untuk fasa T 53
Gambar 4.41 Perbandingan arus *inrush* fasa R 54
Gambar 4.42 Perbandingan arus *inrush* fasa S 55
Gambar 4.43 Perbandingan arus *inrush* fasa T 55
Gambar 4.44 Perbandingan rata-rata arus *inrush* untuk setiap sudut penyalaan 56

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi transformator 22
Tabel 3.2 Spesifikasi NI DAQ 9246 23
Tabel 4.1 Data pengaturan sudut penyalaan 0 derajat 30
Tabel 4.2 Data pengaturan sudut penyalaan 30 derajat 31
Tabel 4.3 Data pengaturan sudut penyalaan 60 derajat 32
Tabel 4.4 Data pengaturan sudut penyalaan 90 derajat 33
Tabel 4.5 Data pengaturan sudut penyalaan 120 derajat 35
Tabel 4.6 Data pengaturan sudut penyalaan 150 derajat 36
Tabel 4.7 Data pengaturan sudut penyalaan 180 derajat 37
Tabel 4.8 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 0° 57
Tabel 4.9 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 30° 57
Tabel 4.10 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 60° 58
Tabel 4.11 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 90° 58
Tabel 4.12 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 120° 59
Tabel 4.13 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 150° 59
Tabel 4.14 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 180° 60

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem kelistrikan tiga fasa merupakan sistem yang sangat umum digunakan dalam sistem pembangkitan dan distribusi tenaga listrik, dalam konteks ini transformator tiga fasa memiliki peran yang penting dalam sistem pembangkitan, transmisi, dan distribusi tenaga listrik. Transformator tiga fasa dapat disusun dengan dua cara, cara pertama dengan menghubungkan tiga buah transformator satu fasa dan cara kedua dengan langsung menyusun tiga buah belitan masing-masing sisi primer dan sekunder pada satu inti [1].

Dikarenakan peran penting dari transformator 3 fasa dalam sistem kelistrikan, maka keandalan dari transformator 3 fasa harus benar-benar diperhatikan agar kualitas dayanya menjadi lebih baik dan tidak menimbulkan kerugian untuk siapapun. Salah satu masalah keandalan yang timbul pada transformator 3 fasa adalah timbulnya arus inrush. Fenomena arus inrush muncul saat transformator di *energize* dalam keadaan tidak berbeban. Arus inrush dapat memiliki titik puncak / amplitude hingga 10 – 20 kali dari arus ratingnya [2]. Arus inrush yang timbul saat proses energize transformator, dapat muncul dikarenakan oleh fluks residualnya yang tidak sama dengan fluks steady-state-nya [3]. Arus inrush dapat menimbulkan beberapa masalah kedepannya, seperti: menyebabkan kesalahan operasi dari rele proteksi, mengurangi umur dari transformator, dan biasanya dapat mengurangi kualitas daya dari suatu sistem tenaga listrik [4].

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengurangi besarnya arus inrush pada transformator, seperti: sequential phase energization dengan resistor pentanahan, kompensasi seri, switching terkontrol, dan lain-lain [4]. Pada tugas akhir ini khusus membahas tentang sudut penyalaan saat transformator energizing.

Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui karakteristik arus *inrush* pada transformator 3 fasa dengan menganalisa pengaruh serta hubungannya terhadap sudut penyalaan saat *energizing* pada kondisi transformator tanpa beban, dan juga untuk mengetahui skema *energize* mana yang paling baik untuk transformator 3 Fasa. Studi ini juga diharapkan dapat mejadi acuan dalam penelitian transformator dikemudian hari.

Pada pengujian ini dilakukan percobaan dengan mengambil data arus *inrush* pada transformator uji 3 fasa 3 kVA tipe inti merk SAE yang ada pada Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro ITS dengan metode pengukuran berbasis eksperimen. Pengujian dan pengambilan data dilakukan saat masa transien, dimana tepat setelah transformator di-*energize* dengan kondisi tidak berbeban dengan mengubah-ubah sudut penyalaannya. Pengujian dilakukan dengan sudut penyalaan 0 derajat, 30 derajat, 60 derajat, 90 derajat, 120 derajat, 150 derajat, dan 180 derajat. Proses *energize* transformator dilakukan dengan metode dimana ketiga fasanya masuk ke transformator secara bergantian. Saat fasa R masuk ke transformator maka ada delay sebesar 120 derajat sebelum fasa S masuk, yang kemudian terdapat delay sebesar 120 derajat lagi sebelum fasa T masuk.

Urutan kerja yang dilakukan dalam menyelesaikan pengujian ini pertama-tama adalah dilakukan studi literatur yang bertujuan untuk memperkokoh teori pendukung yang berkaitan dengan pengerjaan tugas akhir, seperti : prinsip dan jenis belitan transformator 3 fasa, arus inrush pada transformator 3 fasa, sudut penyalaan pada transformator 3 fasa, dan lain sebagainya. Studi literatur dapat diperoleh dengan membaca jurnal, artikel ilmiah, dan buku – buku yang sesuai dengan topik tugas akhir yang diambil. Setelah dilakukan studi literatur, selanjutnya dilakukan pemodelan rangkaian switching yang berfungsi untuk mengatur sudut penyalaan saat energizing pada transformator 3 fasa. Setelah modul *switching* telah diperoleh, selanjutnya akan dilakukan percobaan dan pengambilan data berupa amplitude dari arus inrush, dengan cara merubah-ubah sudut penyalaan dari transformator 3 fasa dengan modul switching. Data – data yang berupa amplitudo dari arus inrush di setiap sudut penyalaan yang sudah didapatkan akan dikumpulkan dan disusun. Yang kemudian akan dilakukan analisis dari data yang sudah didapat. Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis data mengenai efek dari sudut penyalaan terhadap arus inrush pada transformator 3 fasa, dengan cara membandingkan arus inrush yang timbul dengan variable bebas berupa sudut penyalaan dari transformator 3 fasa.

1.2 Sistematika Penulisan

Pada laporan studi ini terdiri dari beberapa bab. Pada bab satu membahas tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, manfaat, relevansi dari penulisan pada studi ini.

Bab dua berisi teori penunjang yang membahas tentang transformator dan arus inrush yang digunakan dalam pengerjaan studi ini.

Bab tiga membahas tentang rancangan modul serta metode yang digunakan dalam proses akuisisi data.

Bab empat membahas tentang pengaturan sudut penyalaan serta analisis hasil pengujian yang didapat dengan mempertimbangkan pengaruh sudut penyalaan terhadap arus *inrush* pada transformator 3 fasa.

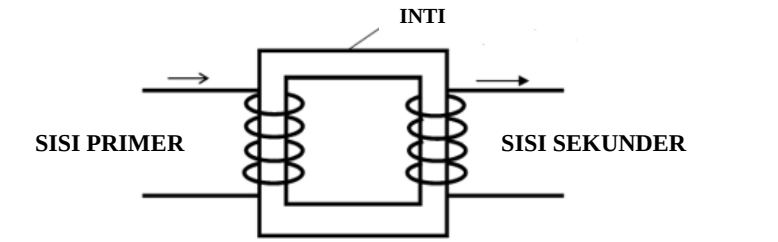
Bab lima membahas tentang kesimpulan yang didapat dari hasil pengujian serta saran untuk penelitian selanjutnya.

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB II
TRANSFORMATOR DAN ARUS *INRUSH*

2.1 Transformator

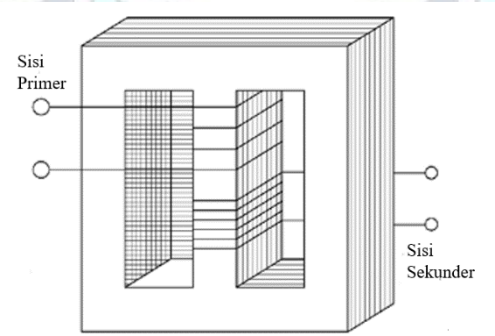
Transformator merupakan salah satu peralatan listrik yang umum digunakan pada sistem kelistrikan. Pada gambar 2.1, dapat dilihat bahwa komponen terpenting dari suatu transformator adalah kumparan primer, inti (besi), dan kumparan sekunder. Transformator memiliki fungsi utama yaitu untuk menaikan dan/atau menurunkan level tegangan dari sisi primer ke sisi sekunder. Arus dan daya dari sisi primer pada prosesnya juga akan di-*transfer* menuju sisi sekunder dari transformator, khususnya pada daya akan sedikit mengalami perbedaan antara bagian primer dan bagian sekunder yang disebabkan oleh adanya rugi-rugi yang terdapat pada transformator, seperti rugi tembaga dan rugi besi.



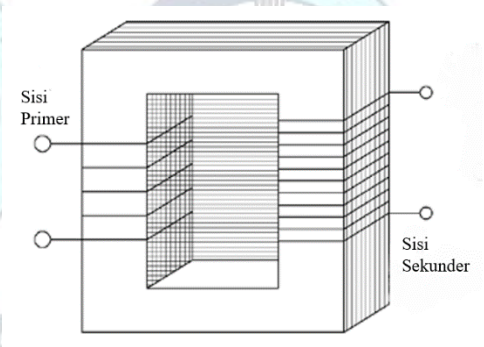
Gambar 2.1 Konstruksi Dasar dari Transformator

Prinsip kerja transformator secara umum yaitu tegangan bolak-balik (AC) yang diberikan pada bagian kumparan primer akan mengalirkan arus bolak-balik (AC), dimana arus bolak-balik tersebut akan menghasilkan fluks bolak-balik (AC) pada inti magnetik. Fluks bolak-balik (AC) kemudian akan menginduksi gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan sekunder [5].

Pada umumnya secara konstruksi, transformator dibagi menjadi dua jenis atau tipe, yaitu tipe cangkang (*shell*-form) dan tipe inti (*core-form*) [1]. Untuk transformator dengan tipe cangkang (*shell-form*), kumparan sisi primer dan kumparan sisi sekundernya berada pada lengan atau sisi transformator yang sama, seperti yang ditunjukan pada gambar 2.2. Sedangkan untuk transformator tipe inti (*core-form*), kumparan sisi primer dan kumparan sisi sekundernya berada pada lengan atau sisi transformator yang berbeda, seperti yang ditunjukan pada gambar 2.3. [2]



Gambar 2.2 Transformator tipe *shell*



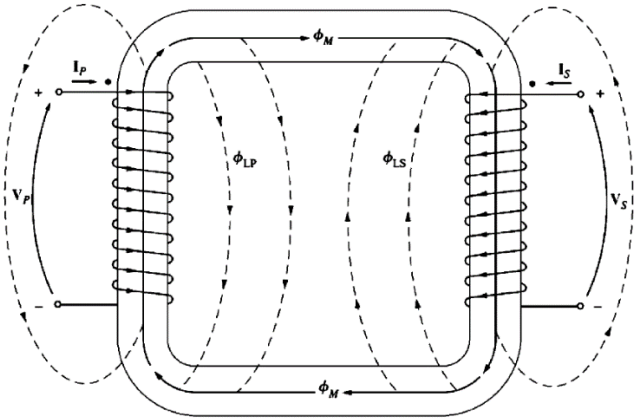
Gambar 2.3 Transformator tipe *core*

2.2 Transformator Ideal dan Tidak ideal

Transformator ideal merupakan transformator yang memiliki nilai efisiensi transfer daya dari sisi primer ke sisi sekunder sebesar 100%. Dengan kata lain pada transformator ideal tidak ada energi yang diubah menjadi bentuk energi yang lain yang bisa dikatakan bahwa transformator ideal tidak memiliki rugi-rugi sama sekali, untuk mencapai transformator dengan kondisi ideal tersebut maka diasumsikan tidak ada rugi inti, tidak ada resistansi lilitan, permeabilitas inti yang sangat tinggi, dan tidak adanya fluks bocor, sehingga daya listrik pada kumparan primer akan bernilai sama dengan daya listrik pada kumparan sekunder. Sejauh ini kondisi ideal pada transformator dalam aplikasi praktiknya hanya bisa didekati dan tidak dapat dicapai, hal tersebut dikarenakan pada setiap

kumparan transformator pasti memiliki hambatan yang menyebabkan transformator menghasilkan fluks bocor.

Melalui gambar 2.4, dapat dilihat bagaimana pergerakan fluks yang timbul dari sebuah transformator. Dimana terlihat bahwa fluks yang timbul dibagi menjadi dua jenis, yaitu: fluks bersama (Φ_M) yang mengalir pada inti transformator dan fluks bocor (Φ_L) yang timbul dimasing-masing belitan dan mengalir melalui udara [1]. Dimana fluks total (Φ) merupakan penjumlahan fluks bersama (Φ_M) dan fluks bocor (Φ_L).



Gambar 2.4 Fluks dalam inti transformator

Pada kondisi transformator ideal dengan asusmi yang sudah dijelasakan sebelumnya. Ketika kumparan primer diberi sumber tegangan AC, pada inti transformator mengalir fluks searah dengan aturan tangan kanan. Besarnya gaya gerak listrik pada kumparan primer dipengaruhi oleh banyaknya jumlah belitan dan fluks yang berubah terhadap waktu. Persamaan untuk perhitungannya dapat ditulis menjadi seperti pada persamaan 2.1.

$$V_P = e_P = N_P \frac{d\Phi}{dt} \tag{2.1}$$

Gaya Gerak Listrik (GGL) yang tercipta akibat induksi dari fluks pada kumparan secara matematis dapat ditulis seperti pada persamaan 2.2.

$$V_S = e_S = N_S \frac{d\Phi}{dt} \tag{2.2}$$

Apabila besar fluks pada kumparan primer sama dengan besar fluks pada kumparan sekunder, maka dapat disimpulkan menjadi:

$$\frac{e_P}{e_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_s} \tag{2.3}$$

Melalui persamaan 2.3 maka dapat diketahui jenis transformator yang biasa kita ketahui berdasarkan fungsinya, yaitu transformator *step-up* dan transformator *step-down*. Saat nilai $N_P > N_S$, maka transformator tersebut merupakan transformator *step-down*, saat nilai $N_P < N_S$, maka transformator tersebut merupakan transformator *step-up*.

Dimana: V_P = Tegangan sisi primer (Volt)
V_S = Tegangan sisi sekunder (Volt)
e_P = GGL sisi primer (Volt)
e_S = GGL sisi sekunder (Volt)
N_P = Jumlah lilitan sisi primer
N_S = Jumlah lilitan sisi sekunder

Seperti yang sudah disampaikan sebelumnya bahwa pada saat ini untuk mencapai kondisi transformator ideal belum bisa dicapai, dikarenakan disetiap transformator pasti memiliki resistansi di setiap kumparannya yang berakibat pada munculnya fluks bocor, selain resistansi pada kumparan dan fluks bocor, permeabilitas inti besi yang terbatas juga menjadi permasalahan yang menyebabkan transformator menjadi tidak ideal atau dengan kata lain tidak bisa memiliki nilai efisiensi transfer daya sebesar 100% (dibawah 100%). Selain ketiga hal diatas transformator tidak ideal atau transformator dengan nilai efisiensi transfer daya dibawah 100% juga dipengaruhi oleh rugi tembaga dan rugi inti. Rugi tembaga dipengaruhi oleh resistansi pada belitan, sedangkan rugi inti dipengaruhi oleh reaktansi magnetik dan resistansi inti yang menyebabkan rugi arus eddy dan rugi histerisis.

Histerisis merupakan hal-hal yang berkaitan dengan magnetisasi trafo dan arus/tegangan AC. Histerisis pada umumnya digambarkan melalui kurva histerisis. Kurva histerisis merupakan suatu kurva yang membandingkan intensitas medan magnet (**H**) dan kerapatan fluks (**B**), contoh kurva histerisis dapat dilihat pada gambar 2.4. Kerapatan fluks didefinisikan sebagai jumlah fluks yang mengalir pada suatu luasan bidang. Dapat ditulis sebagai berikut,

$$B = \mu H \;\; ; \;\; B = \frac{\Phi}{\mathrm{A}} \tag{2.1}$$

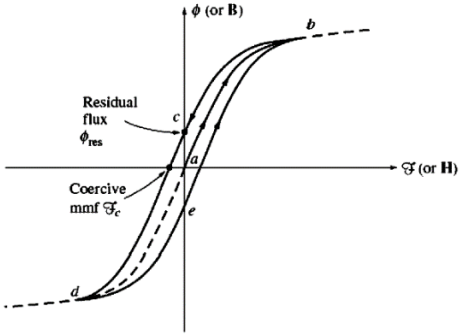
Intensitas medan magnet didapat melalui persamaan berikut,

$$H = \frac{\mathrm{N}.I}{l_m} \tag{2.2}$$

Dimana: B = Kerapatan fluks (Tesla)
H = Intensitas medan magnet (A/m)
μ = Permeabilitas (H/m)
Φ = Fluks (Wb)
A = Luas bidang (m^2)
N = Jumlah lilitan
I = Arus (A)
l_m = Panjang lintasan (m)

Saat transformator tidak ideal diberi sumber tegangan dan arus (*energize*) dan mencapai kondisi saturasi pada inti, yang kemudian transformator dilepaskan dari sumber tegangan dan arus, akan tetap timbul fluks sisa yang terdapat di inti. Fluks sisa yang tetap ada pada inti disebabkan oleh fenomena yang disebut retentivitas, dimana retentivitas adalah kemampuan material untuk mempertahankan sisa magnet yang mengalir setelah proses magnetisasi dihentikan [5].

Besaran nilai fluks yang terdapat pada inti transformator dapat diamati pada kurva histerisis yang ada pada gambar 2.5, mula-mula fluks pada transformator diasumsikan bernilai 0 (titik a), kemudian ketika arus mulai masuk dan naik, fluks akan bergerak membentuk jalur a-b, lalu ketika arus menurun fluks akan membentuk jalur b-c-d, ketika arus kembali naik maka fluks akan membentuk jalur d-e-b.



Gambar 2.5 Kurva histerisis pada transformator

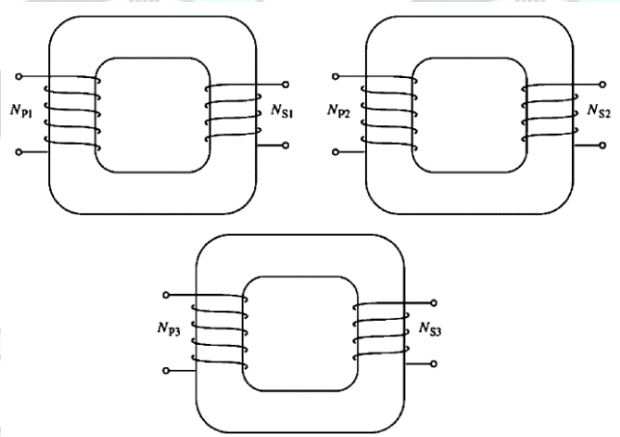
2.3 Rugi Transformator

Dalam kontruksi sebuah transformator, tentunya banyak yang perlu dipertimbangkan agar transformator yang diinginkan mendekati kondisi ideal atau memiliki efisiensi mendekati 100%. Salah satu hal yang perlu dipertimbangkan dalam kontruksi sebuah transformator adalah rugi-rugi yang biasanya muncul menjadi masalah dalam efisiensi transformator. Rugi-rugi tersebut diantaranya [1]:

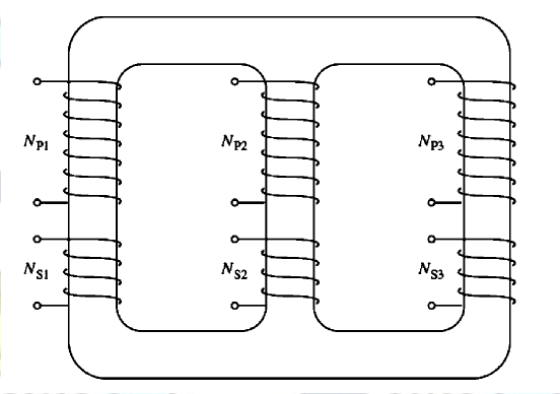
1. Rugi tembaga. Rugi tembaga merupakan suatu rugi yang disebabkan oleh arus yang mengalir pada kumparan, dikarenakan adanya resistansi pada kumparan yang lama-kelamaan akan menghasilkan panas. Nilai dari rugi tembaga sebanding dengan resistansi dan kuadrat dari arus yang mengalir pada kumparan primer maupun kumparan sekunder.
2. Rugi arus *eddy*. Rugi arus *eddy* merupakan suatu rugi yang disebabkan oleh arus *eddy* yang mengalir pada inti suatu transformator dimana lama-kelamaan akan menghasilkan panas. Nilai rugi arus *eddy* sebanding dengan nilai kuadrat dari tegangan yang diigunakan pada sebuah transformator.
3. Rugi histerisis. Rugi histerisis merupakan suatu rugi yang disebabkan oleh sisa dari fluks magnet dari suatu transformator yang sudah tidak dimagnetisasi karena sifat retentivitas dari suatu material ferromagnetik.
4. Fluks bocor. Fluks bocor merupakan fluks yang berada pada sisi primer maupun sisi sekunder yang lepas dan mengalir melalui salah satu kumparan dari suatu transformator.

2.4 Transformator 3 Fasa

Sistem kelistrikan tiga fasa merupakan sistem yang sangat umum digunakan dalam sistem pembangkitan dan distribusi tenaga listrik, dalam konteks ini transformator tiga fasa memiliki peran yang penting dalam sistem pembangkitan, transmisi, dan distribusi tenaga listrik. Transformator tiga fasa dapat disusun dengan dua cara, cara pertama dengan menghubungkan tiga buah transformator satu fasa (seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.6) dan cara kedua dengan langsung menyusun tiga buah belitan masing-masing sisi primer dan sekunder pada satu inti (seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.7). Selain itu tranformator tiga fasa juga terdiri dari tipe inti dan tipe cangkang.



Gambar 2.6 Tiga transformator 1-fasa yang dihubungkan menjadi satu transformator 3-fasa



Gambar 2.7 Transfomator tiga fasa yang terhubung dalam satu lengan

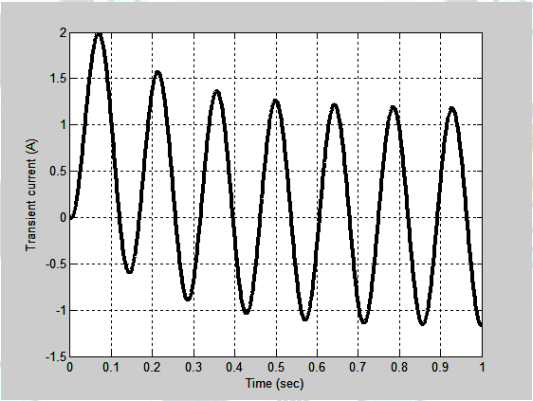
Pada saat ini transformator tiga fasa yang lebih sering digunakan adalah jenis transformator tiga fasa yang langsung terhubung dalam satu lengan, hal ini disebabkan karena transformator tiga fasa yang langsung terhubung dalam satu lengan umumnya lebih murah, lebih ringan, lebih ringkas, dan sedikit memiliki efisiensi yang lebih baik dibanding dengan transformator tiga fasa yang dibuat dengan menghubungkan tiga buah

transformator satu fasa. Namun transformator tiga fasa yang dibuat dengan menghubungkan tiga buah transformator satu fasa memiliki keuntungan dimana bila ada satu fasa saja yang rusak maka hanya perlu mengganti bagian yang rusak itu dan tidak perlu mengganti keseluruhan komponen.

Dikarenakan transformator tiga fasa memiliki masing-masing tiga buah kumparan primer dan kumparan sekunder, maka masing-masing kumparan primer dan kumparan sekunder dari transformator tiga fasa dapat dihubungkan dengan hubungan wye (Y) dan delta (Δ). Yang menyebabkan transformator tiga fasa memiliki kemungkinan empat kombinasi hubungan antara kumparan primer dan kumparan sekunder, yaitu: hubungan Y-Y, hubungan Y-Δ, hubungan Δ-Y, dan hubungan Δ-Δ. Perbedaan fasa untuk masing-masing kumparan pada transformator tiga fasa adalah sebesar 120˚ dan perbedaan fasa antara hubungan Y dan hubungan Δ adalah sebesar 30˚ [1].

2.5 Arus *Inrush*

Peralatan listrik yang menggunakan prinsip elektromagnetik dalam pengoperasiannya seperti transformator, motor, dan lain sebagainya, memiliki suatu masalah transien yang disebut arus *inrush*. Arus *inrush* merupakan suatu arus dengan *magnitude* yang besar dan spektrum harmonisa yang luas yang muncul pada masa transien suatu peralatan dengan prinsip elektromagnetik. Besar dari arus *inrush* bisa mencapai hingga 10 sampai 20 kali dari besar arus nominalnya. Arus *inrush* merupakan masalah pada peralatan listrik yang cukup diperhatikan dikarenakan memiliki dampak yang kurang baik terhadap perlatan, diantaranya: mengurangi umur dari suatu peralatan, mengurangi kualitas daya suatu sistem, dan dapat menimbulkan kesalahan operasi dari rele-rele pengaman.



Gambar 2.8 Contoh arus *inrush* yang muncul pada suatu transformator

Pada transformator, arus *inrush* muncul ketika suatu transformator dilakukan proses *energizing* (*starting*) saat kondisi tidak berbeban. Arus *inrush* yang muncul pada masa transien suatu transformator dapat muncul dikarenakan fluks yang terdapat didalam inti tidak memenuhi nilai fluks yang dibutuhkan saat kondisi *steady-state*. Dengan nilai yang tidak berlebihan (tidak terlalu tinggi) arus *inrush* diperlukan pada starting transformator untuk memenuhi nilai fluks yang dibutuhkan pada kondisi *steady-state*. Arus inrush pada transformator dibagi menjadi dua bagian, yaitu arus magnetisasi dan arus rugi inti. Arus magnetisasi merupakan arus yang diperlukan suatu transformator untuk memenuhi nilai fluks yang dibutuhkan pada kondisi *steady-state*, sedangkan arus rugi inti merupakan arus yang mempengaruhi besarnya rugi histerisis dan rugi arus *eddy*.

Berdasarkan teori yang ada saat ini, magnitude terbesar dari suatu arus *inrush* akan mencapai nilai tertinggi (maksimum) ketika saat proses *energize* diatur dengan sudut penyalaan sebesar 0 derajat. Sedangkan magnitude minimum dari arus *inrush* didapat ketika sudut penyalaan saat proses *energize* diatur sebesar 90 derajat.

Berdasarkan studi yang dilakukan oleh [3], nilai puncak dari arus *inrush* dapat diketahui melauli suatu persamaan yang didalamnya terdiri dari tegangan sumber, induktansi transformator di udara, resistansi total dari transformator, kerapatan fluks pada kondisi normal pada inti transformator, kerapatan fluks sisa pada inti transformator, dan kerapatan

fluks saturasi dari inti transformator. Secara matematis dapat ditulis menjadi

$$i_{puncak} = \frac{\sqrt{2}.V_m}{\sqrt{(\omega.L)^2 + R^2}}\left(\frac{2.B_N + B_R - B_S}{B_N}\right) \quad (2.2)$$

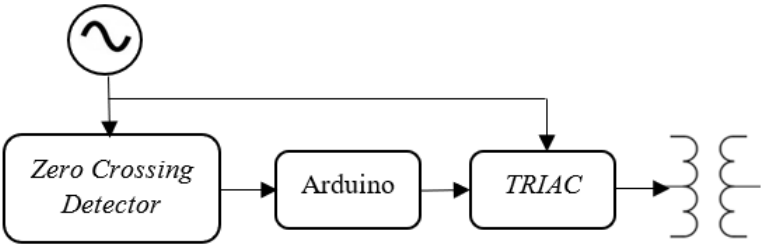
Dimana: V_m = Tegangan yang terpasang (V)
L = Induktansi transformator (H)
R = Resistansi total transformator (Ω)
B_N = Kerapatan fluks normal inti transformator (Wb/m^2)
B_R = Kerapatan fluks sisa inti transformator (Wb/m^2)
B_S = Kerapatan fluks saturasi inti transformator (Wb/m^2)

Terdapat beberapa metode yang sudah dilakukan sebelumnya dengan tujuan untuk mengurangi besarnya nilai arus inrush pada transformator 3 fasa. Seperti: Metode sequential phase energization, dimana dalam transformator 3 fasa setiap fasanya di energize dalam urutan dengan waktu delay diantara fasanya dan dengan penempatan resistor di titik netral [6]. Lalu ada metode switching terkontrol, dimana dilakukan perhitungan fluks residual antar fasa dan sifat magnetisasi inti besi [7].

BAB III
RANCANGAN PENGATUR SUDUT PENYALAAN DAN SKEMA PENGAMBILAN DATA ARUS INRUSH

3.1 Modul Pengatur Sudut Penyalaan *Energize*

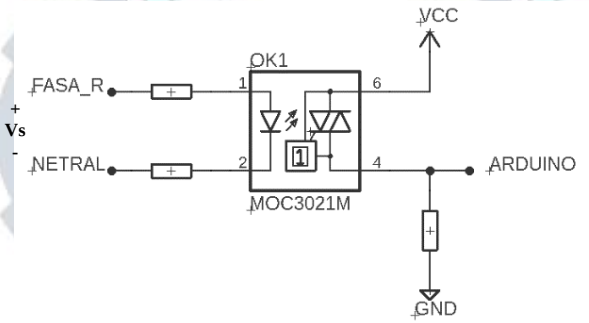
Dalam pengujian ini akan dilakukan analisa pengaruh sudut penyalaan saat *energizing* terhadap arus *inrush* pada transformator tiga fasa. Maka dari itu diperlukan suatu modul yang memiliki fungsi untuk dapat mengatur sudut penyalaan saat proses *energize*. Modul pengatur sudut penyalaan *energize* terdiri dari tiga komponen utama, yang pertama ada pembaca sinyal *zero crossing*, yang kemudian pembacaan sinyal akan diolah lebih lanjut oleh arduino, selanjutnya arduino dikontrol agar menjadi *trigger* untuk *TRIAC* sehingga bisa didapatkan sudut penyalaan yang diinginkan (misal: 0 derajat, 30 derajat, dan lain sebagainya). Untuk skema blok diagramnya dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Blok diagram modul pengatur sudut penyalaan

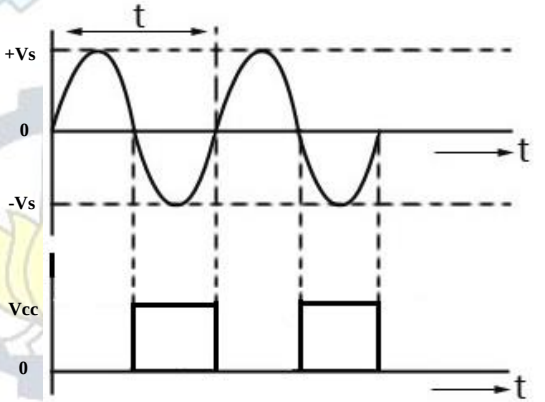
3.1.1 *Zero Crossing Detector*

Zero crossing detector merupakan suatu rangkaian dalam bidang elektronika yang memiliki fungsi untuk mendeteksi titik persimpangan nol dari input sistem. Komponen utama yang digunakan pada *zero crossing detector* adalah *optocoupler MOC3021* dan resistor. Pada rancangan modul pengatur sudut penyalaan *energize* yang akan dibuat, hanya digunakan *zero crossing detector* pada fasa R saja. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan untuk memperkecil besarnya modul dan lebih efisien, sehingga modul nantinya bisa menjadi lebih *compact*. Rangkaian dari *zero crossing detector* dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Rangkaian *zero crossing detector*

Proses pendeteksian titik persimpangan nol terjadi saat tegangan AC dalam keadaan negatif dengan tegangan 1,5 Volt dan arus sebesar 15 mA menyalakan LED optocoupler, sehingga mengakibatkan sinyal keluaran *zerro crossing* berlogika high (3 V_{DC}), sedangkan saat tegangan AC dalam keadaan positif maka LED optocoupler tidak akan menyala dan keluaran zerro crossing berlogika low (0 V_{DC}). Sinyal keluaran *zero crossing detector* ditunjukan pada gambar 3.3.

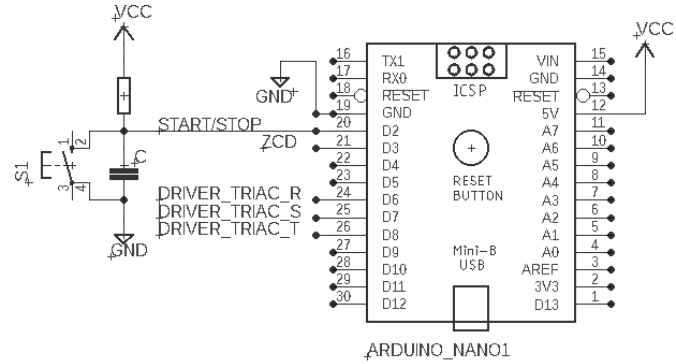


Gambar 3.3 Sinyal keluaran *zero crossing detector*

3.1.2 Arduino

Arduino pada modul pengatur sudut penyalaan *energize* memiliki fungsi untuk menerima keluaran sinyal yang dikeluarakan oleh *zero crossing detector*, yang kemudian diolah datanya, dan selanjutnya berfungsi untuk memberikan sinyal *trigger* kepada *driver TRIAC.*

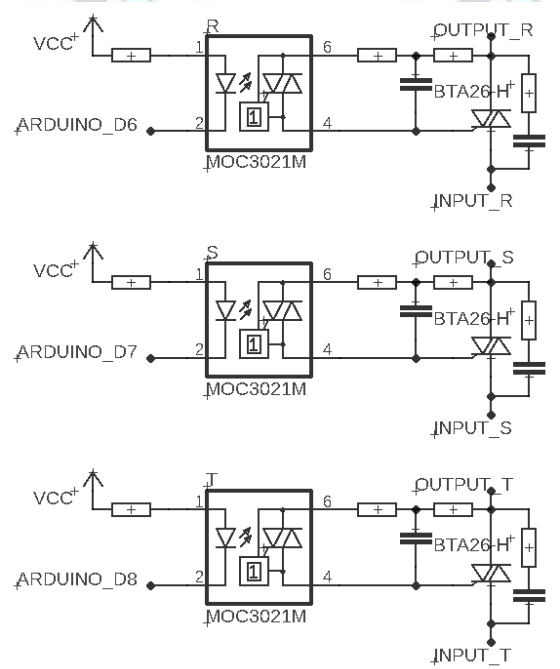
Arduino digunakan disini dengan tujuan supaya modul pengatur sudut penyalaan *energize* dapat mengatur waktu *delay*, pengaturan waktu *delay* bertujuan untuk mengatur sudut penyalaan agar dapat diatur menjadi sudut yang diinginkan (misal: 0 derajat, 90 derajat, dan lain sebagainya). Dengan kata lain dalam pengujian ini, Arduino pada modul pengatur sudut penyalaan *energize* berfungsi untuk mengatur sudut penyalaan dari sumber menuju transformator pengujian. Arduino yang digunakan merupakan jenis Arduino Nano. Untuk rangkaian Arduino yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Rangkaian Arduino

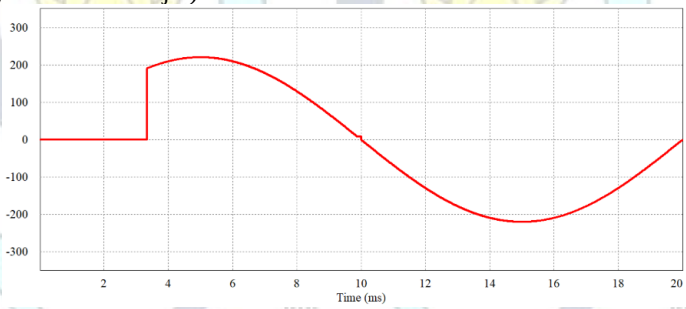
3.1.3 *Driver TRIAC* dan *TRIAC*

Driver TRIAC merupakan suatu rangkaian yang berfungsi untuk memberikan sinyal ke *TRIAC* yang inputnya merupakan sinyal *trigger* yang dikeluarkan oleh Arduino. *Driver TRIAC* terdiri dari *optocoupler MOC3021* yang memiliki dua fungsi utama, yang pertama sebagai pemberi sinyal masukan kepada *TRIAC* dan yang kedua sebagai pengaman komponen penyaklaran terhadap tegangan tinggi dan tegangan pada kondisi transien. *Driver TRIAC* juga terdiri dari rangkaian snubber yang berisi resistor dan kapasitor, yang memiliki fungsi sebagai pengaman *TRIAC* dan juga mengurangi kerugian daya yang ditimbulkan oleh proses penyaklaran. TRIAC yang digunakan merupakan jenis BTA26. Untuk rangkaian *driver TRIAC* dan *TRIAC* dapat dilihat pada gambar 3.5.

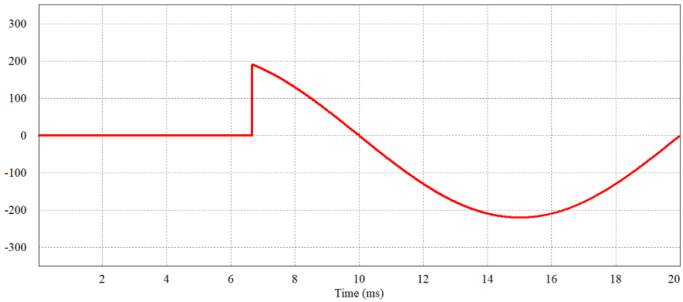


Gambar 3.5 Rangkaian driver TRIAC, TRIAC dan snubber

Contoh sinyal keluaran dari modul pengatur sudut penyalaan *energize* dalam bentuk simulasi dapat dilihat pada gambar 3.6 (untuk contoh sudut penyalaan 60 derajat) dan gambar 3.7 (untuk contoh sudut penyalaan 120 derajat).



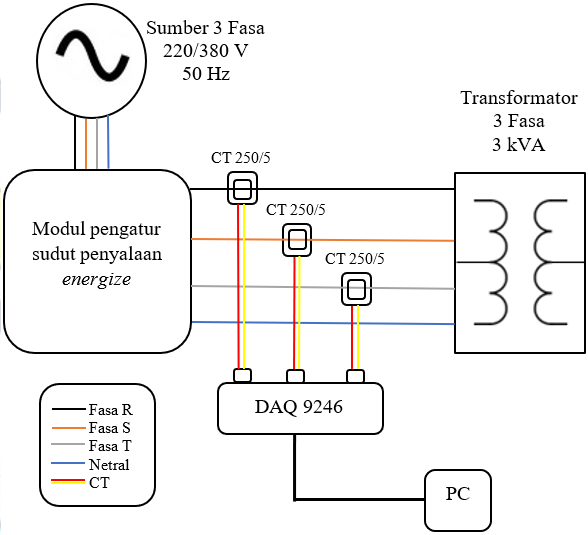
Gambar 3.6 Contoh keluaran modul sudut 60 derajat



Gambar 3.7 Contoh keluaran modul sudut 120 derajat

3.2 Skema Pengambilan Data Arus *Inrush*

Pada pengujian mengenai "Analisa Sudut Penyalaan *Energizing* terhadap Arus *Inrush* pada Transformator 3 Fasa" ini akan dilakukan pengambilan data berupa arus *inrush* sesuai dengan skema yang ditunjukan pada gambar 3.8. Berdasarkan gambar 3.8 dapat dilihat bahwa dalam pengujian diperlukan sumber 3-fasa, modul pengatur sudut penyalaan *energize*, transformator arus (CT), transformator 3-fasa, DAQ 9246, dan *personal computer* (PC) untuk mengambil serta mengolah data yang didapat.



Gambar 3.8 Skema pengambilan data arus *inrush*

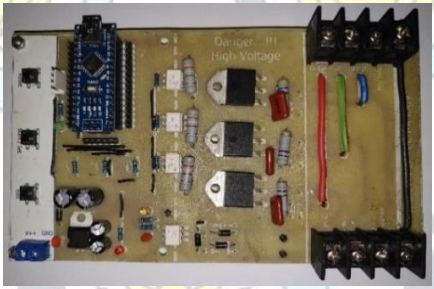
3.2.1 Sumber 3-Fasa

Pada pengujian ini sumber 3-fasa yang digunakan didapat dari panel sumber 3-fasa yang terdapat pada Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro ITS A.102 yang berasal dari PLN. Sumber 3-fasa yang digunakan memiliki level tegangan sebesar 220/380 V dengan frekuensi 50 Hz. Bentuk dari panel sumber 3-fasa yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.9.

Gambar 3.9 Panel sumber 3-fasa

3.2.2 Modul Pengatur Sudut Penyalaan *Energize*

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa modul pengatur sudut penyalaan *energize* memiliki fungsi untuk mengatur sudut penyalaan dari sumber yang akan menuju transformator. Sehingga proses *energizing* transformator dapat diatur sudut penyalaannya. Seperti yang sudah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya bahwa modul pengatur dusut penyalaan *energize* terdiri dari 3 komponen utama yaitu *zero crossing detector*, Arduino, serta *driver TRIAC* dan *TRIAC*. Bentuk dari modul pengatur sudut penyalaan *energize* dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Modul pengatur sudut penyalaan *energize*

3.2.3 Transformator Arus (CT)

Transformator arus merupakan suatu peralatan dalam sistem kelistrikan yang umumnya berfungsi untuk menunurunkan besaran arus, transformator arus memang umum digunakan dalam suatu pengujian yang bertujuan untuk menganalisa arus dengan level tegangan yang sangat tinggi (seperti pengujian mengenai arus *inrush*). Hal tersebut bertujuan sebagai pengaman dari komponen-komponen pengujian yang lain dikarenakan arus yang sangat tinggi dapat merusak peralatan listrik. Dalam konteks pengujian ini, transformator arus digunakan untuk mengurangi arus yang masuk pada DAQ 9246 (peralatan untuk pengambilan data). Transformator arus memiliki prinsip kerja yang sama dengan transformator pada umumnya yaitu terdapat dua belitan, primer dan sekunder, dimana belitan primer akan menginduksi belitan sekunder dan mentransferkan arus pada sisi sekunder transformator arus, sesuai dengan rasio lilitan yang dimiliki oleh transformator arus tersebut. Transformator arus yang digunakan dalam pengujian merupakan transformator arus dengan rasio 250/5 A, *burden* sebesar 5 VA, dan kelas *metering* 1. Bentuk dari transformator arus yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.11.

Gambar 3.11 Transformator arus (CT)

3.2.4 Transformator 3-Fasa

Transformator 3-fasa yang digunakan dalam pengujian ini adalah transformator 3-fasa merk SAE yang memiliki kapasitas daya sebesar 3 kVA, spesifikasi dari transformator 3-fasa yang digunakan

dapat dilihat secara lengkap pada tabel 3.1. Bentuk dari transformator 3-fasa yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.12.

Tabel 3.1 Spesifikasi transformator

Fasa	3 fasa
Kapasitas Daya	3 kVA
Tegangan Sisi Primer	127 V
Tegangan Sisi Sekunder	220 V
Hubungan Belitan	Y-Y
Jumlah Lilitan Primer	196
Jumlah Lilitan Sekunder	340
Frekuensi	50/60 Hz

(a)

(b)

Gambar 3.12 Transformator 3-fasa; (a) tampak depan, (b) tampak samping

3.2.5 *Data Acquistion (*DAQ) 9246

Pada pengujian ini dalam pengambilan data digunakan peralatan yang disebut dengan *Data Acquistion* (DAQ) 9246. DAQ 9246 merupakan peralatan yang digunakan untuk mengakuisisi data dalam bentuk arus. DAQ 9246 yang digunakan pada pengujian ini diproduksi oleh *National Instruments*. Input dari DAQ 9246 merupakan output sisi sekunder dari transformator arus, dimana output dari DAQ 9246 nantinya akan dibaca dan disimpan oleh LabVIEW. Bentuk dari DAQ 9246 dapat dilihat pada gambar 3.13. Spesifikasi dari DAQ 9246 yang diproduksi oleh *National Instruments* dapat dilihat pada tabel 3.2

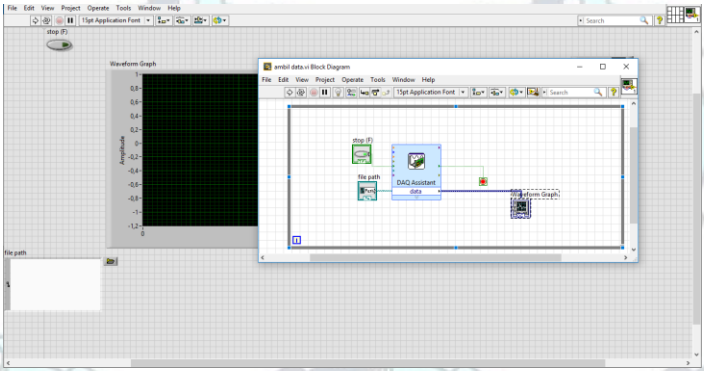
Gambar 3.13 DAQ 9246

Tabel 3.2 Spesifikasi NI DAQ 9246

Input Channel	3 analog input channel
Sample Rate	50 kS/s per channel
Arus	20 A rms; 30 Apk
Tegangan	300 VLN; 480 VLL

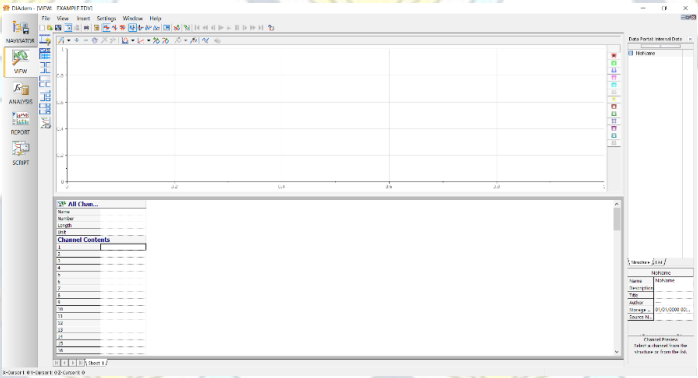
3.2.6 *Personal Computer* (PC)

Personal computer (PC) dalam pengujian ini digunakan untuk membuka aplikasi LabVIEW dan DIAdem. LabVIEW merupakan perangkat lunak yang memiliki fungsi untuk menyimpan data yang didapat dari DAQ 9246. Tampilan dari LabVIEW dapat dilihat pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 Tampilan LabVIEW

DIAdem merupakan perangkat lunak yang memiliki fungsi untuk mengolah, memvisualisasi, dan menganalisa data yang sudah disimpan oleh LabVIEW sebelumnya. Tampilan dari DIAdem dapat dilihat pada gambar 3.15.



Gambar 3.15 Tampilan DIAdem

3.2.7 Demagnetisasi

Demagnetisasi merupakan suatu metode yang dilakukan dengan tujuan untuk menghilangkan atau mengurangi magnet sisa yang terdapat pada suatu bahan ferromagnetik. Demagnetisasi dilakukan dalam rentang waktu tertentu. Dalam pengujian ini demagnetisasi dapat dilakukan dengan dua cara. Cara pertama adalah dengan menghubungkan masing-masing fasa dan netral transformator ke 3 buah kapasitor dengan kapasitas 40 uF yang tersusun secara paralel. Cara kedua adalah dengan

menghubungkan masing-masing fasa dan netral transformator ke grounding dari sumber PLN.

3.2.8 Osiloskop

Sebelum dilakukannya pengambilan data arus *inrush* dan terhubung ke transformator, modul pengatur sudut penyalaan *energize* perlu dilakukan kalibrasi terlebih dahulu. Hal tersebut bertujuan untuk dapat mendapatkan sudut penyalaan yang sesuai seperti yang diinginkan, proses kalibrasi dan penyesuaian sudut penyalaan dilakukan dengan menggunakan osiloskop. Osiloskop yang digunakan pada pengujian kali ini di produksi oleh GW INSTEK dengan tipe GDS-3254. Osiloskop GW INSTEK GDS-3254 memiliki 4 probe channel yang dapat digunakan (dalam pengujian hanya digunakan dua probe, satu probe untuk mengukur tegangan input dari sumber dan satu probe untuk mengukur tegangan keluaran dari modul pengatur sudut penyalaan *energize*), memiliki impedansi sebesar 1 MΩ, dan input tegangan maksimum sebesar 300 Vrms. Bentuk dari osiloskop GW INSTEK GDS-3254 dapat dilihat pada gambar 3.16.

Gambar 3.16 Osiloskop GW INSTEK GDS-3254

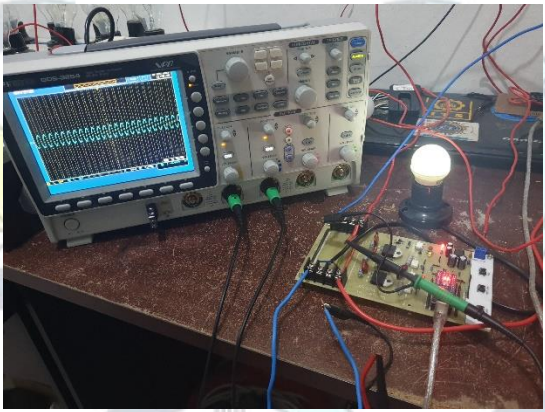
(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB IV
PENGATURAN SUDUT PENYALAAN DAN ANALISA PENGUJIAN ARUS *INRUSH*

Pengujian "Analisa Sudut Penyalaan *Energizing* terhadap Arus *Inrush* pada Transformator 3 Fasa" bertujuan untuk mengetahui pengaruh dan karakteristik dari arus *inrush* pada transformator 3-fasa apabila sudut penyalaan saat proses *energizing* nilainya bervariasi. Metode pengumpulan data yang dilakukan dalam pengujian mengenai arus *inrush* ini adalah dengan eksperimen menguhubungkan langsung ke transformator uji. Dalam pengujian ini dilakukan pengambilan data pada sudut penyalaan 0 derajat, 30 derajat, 60 derajat, 90 derajat, 120 derajat, 150 derajat, dan 180 derajat, dengan masing-masing derajatnya dilakukan pengambilan data sebanyak 15 kali.

4.1 Pengaturan Sudut Penyalaan

Sebelum dilakukannya pengujian arus *inrush* dan terhubung ke transformator, perlu dilakukan pengaturan sudut penyalaan agar mendapatkan sudut penyalaan yang diinginkan (0 derajat, 30 derajat, 60 derajat, 90 derajat, 120 derajat, 150 derajat, dan 180 derajat). Untuk skema pengujian untuk mengatur sudut penyalaan dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Rangkaian pengujian pengaturan sudut penyalaan

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa modul pengatur sudut penyalaan *energize* terhubung kepada sumber, beban, dan osiloskop. Modul pengatur sudut penyalaan hanya dilengkapi oleh satu buah rangkaian *zero crossing detector* yang dialokasikan hanya terhadap sumber fasa R, haltersebut dilakukan dengan tujuan memperkecil luasan dari modul sehinggal modul menjadi lebih *compact*, sedangkan untuk fasa S dan fasa T diatur dengan menggunakan arduino yang akan diberikan delay masing-masing 120 derajat atau sekitar 6,66 ms. Delay sebesar 120 derajat diberikan karena pada pengujian ini akan dilakukan pengambilan data dengan metode sekuensial, yang artinya ketiga *switching* tidak terbuka secara bersama-sama dalam satu waktu melainkan terbuka secara bergantian dengan jarak antar fasa sebesar 120 derajat. Beban yang digunakan untuk mengatur sudut penyalaan adalah lampu LED dengan kapasitas daya sebesar 1 W. Selanjutnya digunakan dua buah probe dari osiloskop yang terhubung dengan modul pengatur sudut penyalaan *energize*, satu probe digunakan untuk mengukur tegangan input modul yang berasal dari panel sumber 3-fasa dan satu probe lainnnya digunakan untuk mengukur tegangan ouput dari modul yang terhubung dengan beban lampu LED 1 W.

Setelah merangkai rangkaian pengujian untuk mengatur sudut penyalaan seperti pada gambar 4.1 selanjutnya adalah mengatur *source code* dari Arduino dan mengunggah ke Arduino yang terdapat pada modul pengatur sudut penyalaan *energize*.

```
#define BTN_START_PIN      2
#define ZCD_PIN            3

#define PHASE_ANGLE        0
#define DELAY_OFFSET       9740

float delay_R, delay_S, delay_T, delay_1_4_cycle;
```

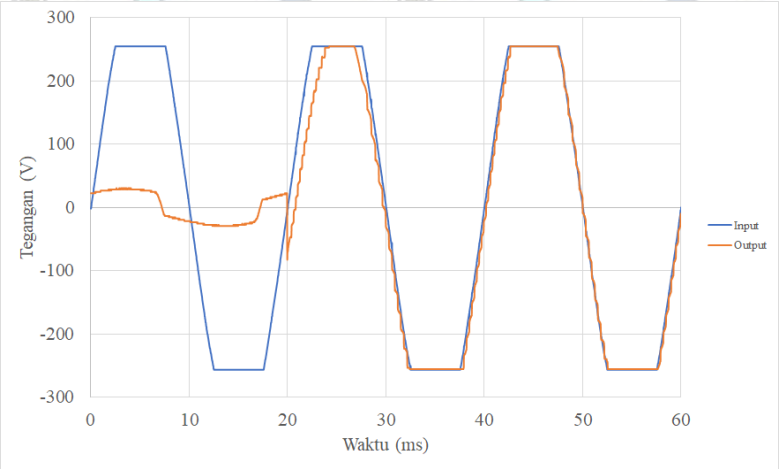
Gambar 4.2 *Source code* Arduino yang diatur

Untuk bagian dari *source code* arduino yang diubah-ubah sesuai dengan sudut yang diinginkan dapat dilihat pada bagian yang diberi lingkaran merah gambar 4.2. Pada bagian tersebut diatur angka sesuai dengan sudut penyalaan yang kita inginkan, misal diinginkan sudut penyalaan 0 derajat maka ditulis “0” pada bagian tersebut, bila diingkan sudut penyalaan 60 derajat maka ditulis “60” pada bagian tersebut, dan lain sebagainya.

Dalam pengaturan sudut penyalaan terdapat tingkat kesalahan yang dapat ditolerir, untuk pengujian ini diambil tingkat kesalahan sebesar ± 100 µs atau bila dikonversi kedalam bentuk sudut terdapat tingkat toleransi sebesar ± 1,8˚. Tingkat kesalahan tersebut didasari oleh tingkat toleransi *delay* dari komponen penyaklaran, penyederhanaan bilangan desimal (angka dibelakang koma) pada Arduino, tingkat ketelitian baca osiloskop, dan juga dikarenakan adanya *ripple* dari sumber yang digunakan.

4.1.1 Sudut Penyalaan 0 Derajat

Pada sudut penyalaan 0 derajat, kondisi yang diinginkan adalah dimana saat sakelar terbuka pada tegangan input bernilai 0 dan dalam kondisi memulai polaritas positif, seperti yang ditampilkan pada pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Pengaturan sudut penyalaan 0 derajat

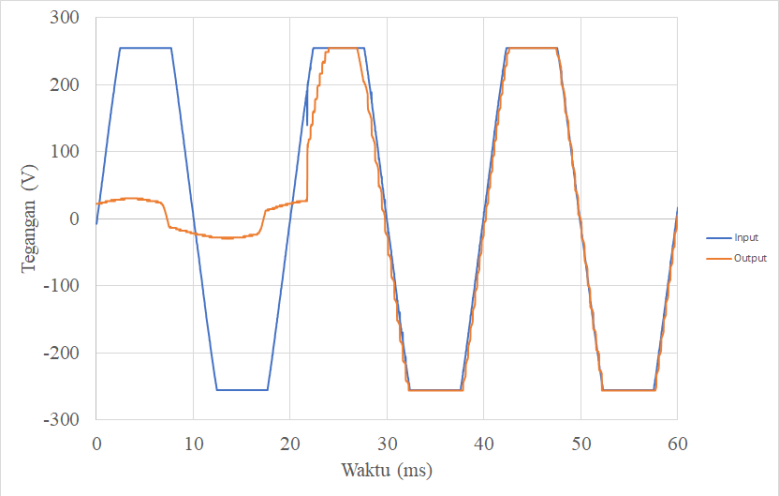
Dari tabel 4.1 dapat diketahui bahwa pada saat waktu = 0.01988 s merupakan waktu saat sakelar mulai terbuka dan pada waktu = 0.01992 s merupakan waktu saat tegangan input bernilai 0, dimana selisih keduanya bernilai 0.00004 s atau 40 µs, yang masih didalam batas toleransi sebesar ± 100 µs.

Tabel 4.1 Data pengaturan sudut penyalaan 0 derajat

Waktu (s)	Tegangan (V)	
	Input	Output
0.01986	-8	22
0.01988	-12	-82
0.01990	-2	-70
0.01992	0	-68
0.01994	-2	-70

4.1.2 Sudut Penyalaan 30 Derajat

Kondisi sudut penyalaan 30 derajat yang diinginkan ditunjukan pada gambar 4.4, dimana sakelar terbuka dengan delay yang diinginkan dari saat tegangan input bernilai 0 dan dalam kondisi memulai polaritas positif. Sebuah gelombang penuh terjadi selama 2π radian, bila dikonversi kedalam bentuk derajat maka 2π = 360 derajat. Untuk frekuensi 50 Hz, satu gelombang penuh akan memiliki periode sebesar 20.000 µs. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa dalam satu gelombang penuh = 0-360 derajat = 0-20.000 µs. Maka sudut 30 derajat bila dikonversi kedalam satuan detik menjadi $\frac{30}{360}$ x 20000 µs = 1666,67 µs.



Gambar 4.4 Pengaturan sudut penyalaan 30 derajat

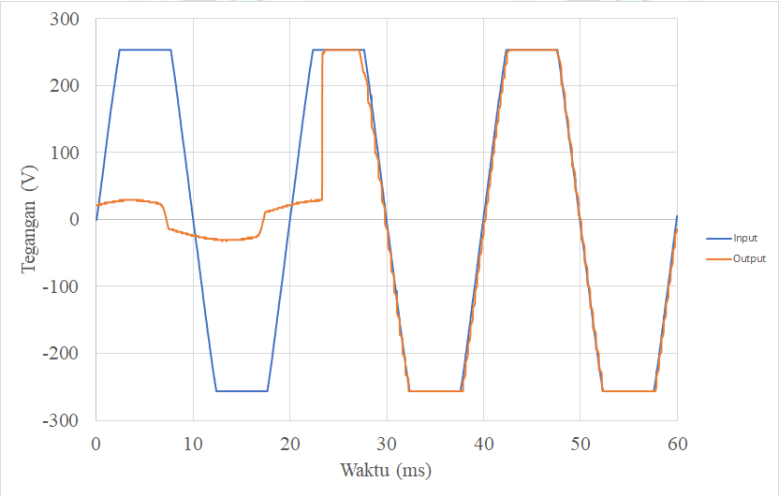
Bila dilihat dari tabel 4.2, saat waktu = -0.19754 s merupakan kondisi saat saklar terbuka dan saat waktu = -0.19928 s merupakan kondisi awal dari gelombang tegangan input. Selisih dari dua kondisi tersebut didapat bernilai sebesar 0.00174 s atau 1740 µs. Untuk sudut 30 derajat, 1740 µs masih didalam batas toleransi yang diizinkan, dimana |1740 µs – 1666,67 µs| = 73,33 µs (masih dibawah ± 100 µs).

Tabel 4.2 Data pengaturan sudut penyalaan 30 derajat

Waktu (s)	Tegangan (V)	
	Input	Output
-0.19930	-2	22
-0.19928	0	22
…	…	…
-0.19754	140	36
-0.19752	188	96

4.1.3 Sudut Penyalaan 60 Derajat

Kondisi sudut penyalaan 60 derajat yang diinginkan ditunjukan pada gambar 4.5, dimana sakelar terbuka sesuai dengan delay yang diinginkan dari saat tegangan input bernilai 0 dan dalam kondisi memulai polaritas positif. Dengan cara yang sama dengan sudut 30 derajat, sudut 60 derajat bila dikonversi kedalam satuan detik menjadi $\frac{60}{360}$ x 20000 µs = 3333,33 µs.



Gambar 4.5 Pengaturan sudut penyalaan 60 derajat

Bila dilihat dari tabel 4.3, saat waktu = -0.19652 s merupakan kondisi saat saklar terbuka dan saat waktu = -0.19986 s merupakan kondisi awal dari gelombang tegangan input. Selisih dari dua kondisi tersebut didapat bernilai sebesar 0.00334 s atau 3340 µs. Untuk sudut 60 derajat, 3340 µs masih didalam batas toleransi yang diizinkan, dimana |3340 µs – 3333,33 µs| = 6,67 µs (masih dibawah ± 100 µs).

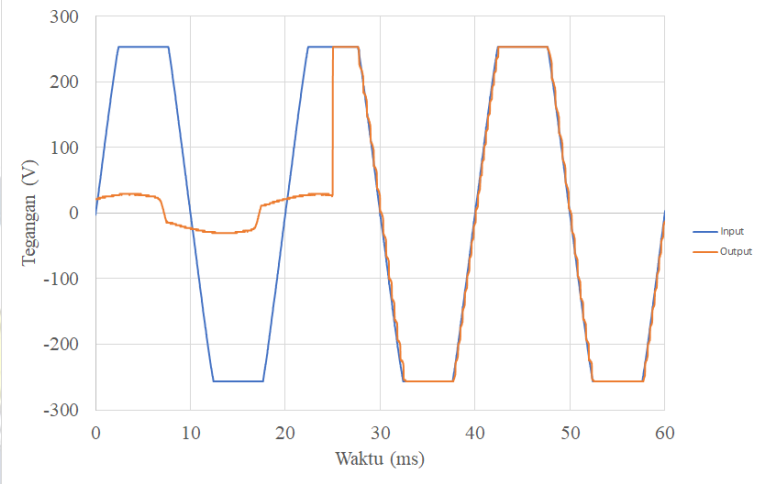
Tabel 4.3 Data pengaturan sudut penyalaan 60 derajat

Waktu (s)	Tegangan (V)	
	Input	Output
-0.19988	-2	22
-0.19986	0	22
…	…	…
-0.19654	254	30
-0.19652	254	220

4.1.4 Sudut Penyalaan 90 Derajat

Kondisi sudut penyalaan 90 derajat yang diinginkan ditunjukan pada gambar 4.6, dimana sakelar terbuka dengan sesuai dengan delay

yang diinginkan dari saat tegangan input bernilai 0 dan dalam kondisi memulai polaritas positif. Dengan cara yang sama dengan sudut-sudut sebelumnya, sudut 90 derajat bila dikonversi kedalam satuan detik menjadi $\frac{90}{360}$ x 20000 µs = 5000 µs.



Gambar 4.6 Pengaturan sudut penyalaan 90 derajat

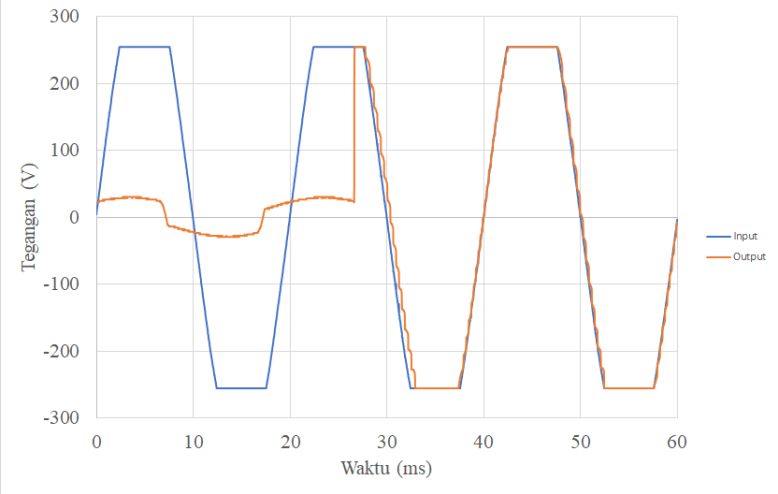
Bila dilihat dari tabel 4.4, saat waktu = 0.14482 s merupakan kondisi saat saklar terbuka dan saat waktu = 0.13982 s merupakan kondisi awal dari gelombang tegangan input. Selisih dari dua kondisi tersebut didapat bernilai sebesar 0.005 s atau 5000 µs. Maka diketahui bahwa hasil perhitungan dan hasil pengujian berada pada angka yang sama, 5000 µs

Tabel 4.4 Data pengaturan sudut penyalaan 90 derajat

Waktu (s)	Tegangan (V)	
	Input	Output
0.13980	-2	22
0.13982	0	22
…	…	…
0.14480	254	28
0.14482	254	200

4.1.5 Sudut Penyalaan 120 Derajat

Kondisi sudut penyalaan 120 derajat yang diinginkan ditunjukan pada gambar 4.7, dimana sakelar terbuka dengan sesuai dengan delay yang diinginkan dari saat tegangan input bernilai 0 dan dalam kondisi memulai polaritas positif. Dengan cara yang sama dengan sudut-sudut sebelumnya, sudut 120 derajat bila dikonversi kedalam satuan detik menjadi $\frac{120}{360}$ x 20000 µs = 6666,67 µs.



Gambar 4.7 Pengaturan sudut penyalaan 120 derajat

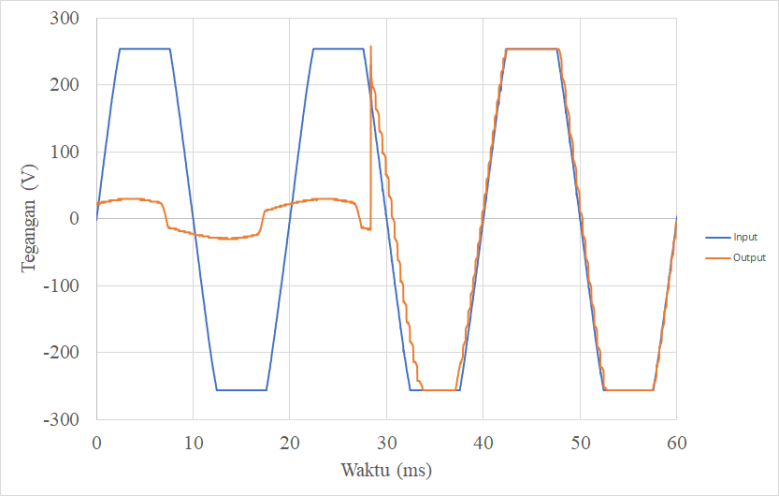
Bila dilihat dari tabel 4.5, saat waktu = 0.00662 s merupakan kondisi saat saklar terbuka dan saat waktu = -0.00004 s merupakan kondisi awal dari gelombang tegangan input. Selisih dari dua kondisi tersebut didapat bernilai sebesar 0.00666 s atau 6660 µs. Untuk sudut 120 derajat, 6660 µs masih didalam batas toleransi yang diizinkan, dimana |6660 µs – 6666,67 µs| = 6,67 µs (masih dibawah ± 100 µs).

Tabel 4.5 Data pengaturan sudut penyalaan 120 derajat

Waktu (s)	Tegangan (V)	
	Input	Output
-0.00006	-2	22
-0.00004	2	22
…	…	…
0.00660	254	22
0.00662	252	238

4.1.6 Sudut Penyalaan 150 Derajat

Kondisi sudut penyalaan 150 derajat yang diinginkan ditunjukan pada gambar 4.8, dimana sakelar terbuka dengan sesuai dengan delay yang diinginkan dari saat tegangan input bernilai 0 dan dalam kondisi memulai polaritas positif. Dengan cara yang sama dengan sudut-sudut sebelumnya, sudut 150 derajat bila dikonversi kedalam satuan detik menjadi $\frac{150}{360}$ x 20000 µs = 8333,33 µs.



Gambar 4.8 Pengaturan sudut penyalaan 150 derajat

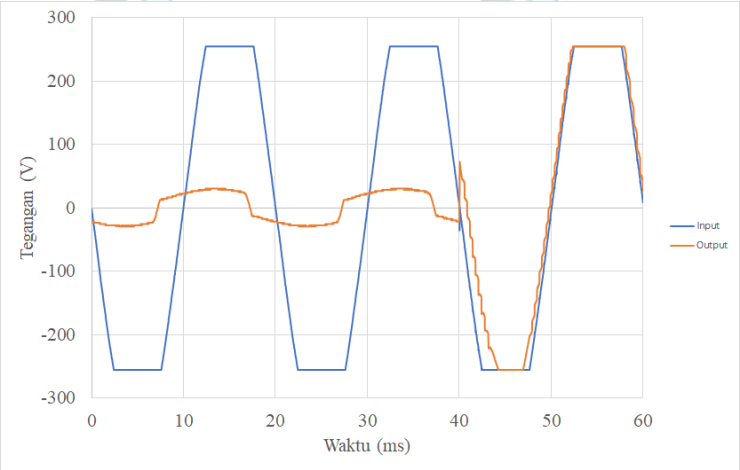
Bila dilihat dari tabel 4.6, saat waktu = -0.11162 s merupakan kondisi saat saklar terbuka dan saat waktu = -0.11998 s merupakan kondisi awal dari gelombang tegangan input. Selisih dari dua kondisi tersebut didapat bernilai sebesar 0.00836 s atau 8360 ns. Untuk sudut 150 derajat, 8360 ns masih didalam batas toleransi yang diizinkan, dimana |8360 µs – 8333,33 µs| = 26,67 µs (masih dibawah ± 100 µs).

Tabel 4.6 Data pengaturan sudut penyalaan 150 derajat

Waktu (s)	Tegangan (V)	
	Input	Output
-0.12000	-2	22
-0.11998	0	22
…	…	…
-0.11164	180	-16
-0.11162	230	254

4.1.7 Sudut Penyalaan 180 Derajat

Kondisi sudut penyalaan 180 derajat yang diinginkan ditunjukan pada gambar 4.9, dimana sakelar terbuka saat tegangan input bernilai 0 dan berganti polaritas.



Gambar 4.9 Pengaturan sudut penyalaan 180 derajat

Dari tabel 4.7 dapat diketahui bahwa pada saat waktu = -0.00004 s merupakan waktu saat sakelar mulai terbuka dan pada waktu = 0.00000 s merupakan waktu saat tegangan input bernilai 0 dan sesaat sebelum memulai pergantian polaritas, dimana selisih keduanya bernilai 0.00004 s atau 40 µs, yang masih didalam batas toleransi sebesar ± 100 µs.

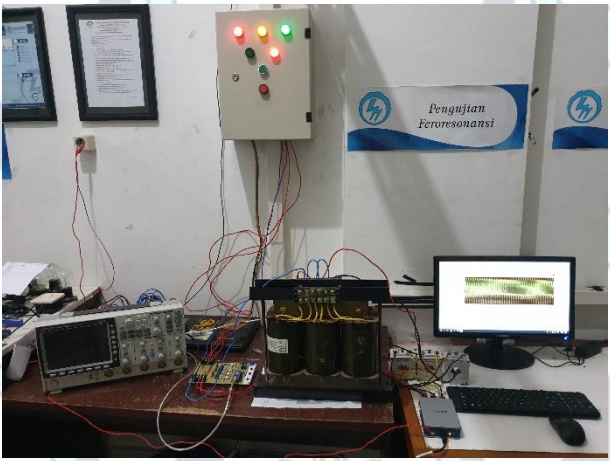
Tabel 4.7 Data pengaturan sudut penyalaan 180 derajat

Waktu (s)	Tegangan (V)	
	Input	Output
-0.00006	2	-22
-0.00004	-36	20
-0.00002	-12	60
0.00000	0	72
0.00002	-6	66

4.2 Proses Akuisisi Data

Proses akuisisi data untuk mengetahui pengaruh sudut penyalaan *energizing* terhadap arus *inrush* pada transformator uji 3-fasa dengan kapasitas 3 kVA, dilakukan dengan menggunakan perangkat keras dan perangkat lunak yang terdapat pada Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro ITS A.102. Untuk perangkat keras menggunakan DAQ 9246 yang diproduksi oleh *National Instruments*, yang memiliki fungsi untuk menangkap data arus *inrush* yang didapat dari transformator arus. Serta perangkat lunak berupa LabVIEW yang berfungsi untuk menyimpan dan memvisualisasi data arus *inrush* yang didapat dari DAQ 9246.

Pengujian dilakukan dengan 7 variasi sudut penyalaan, yaitu 0 derajat, 30 derajat, 60 derajat, 90 derajat, 120 derajat, 150 derajat, dan 180 derajat. Untuk setiap masing-masing sudut dilakukan pengujian sebanyak 15 kali, dan disetiap pengujiannya diberi jeda 30 detik dari pengambilan data pertama ke pengambilan data kedua dan seterusnya sampai pengambilan data kelima belas. Pengujian dilakukan tanpa melakukan proses demagnetisasi baik sebelum pengujian maupun disetiap jeda antar pengujian.



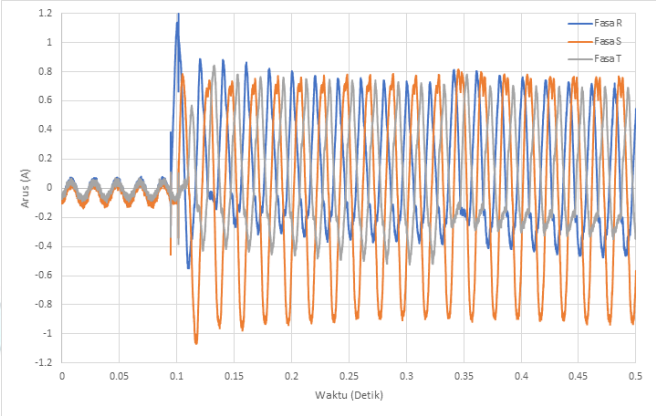
Gambar 4.10 Proses akuisisi data

4.3 Hasil Pengujian

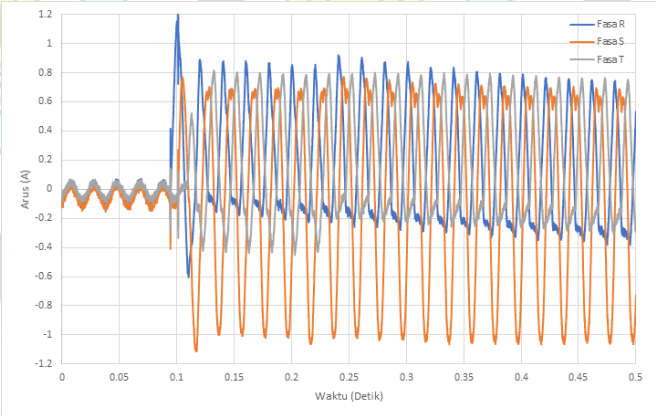
Pengujian dilakukan dengan menghubungkan peralatan-peralatan yang akan digunakan seperti sumber 3-fasa, modul pengatur sudut penyalaan *energize*, perangkat akuisisi data, dan transformator uji 3-fasa sesuai dengan yang sudah dibahas pada subbab sebelumnya. Transformator uji 3-fasa yang digunakan memiliki kapasitas daya sebesar 3 kVA, dihubungkan dengan jenis konfigurasi belitan Y-Y, dan tanpa diberi beban.

Sebelum dilakukan pengujian dengan mengatur sudut penyalaan saat proses *energize*, pertama-tama dilakukan pengujian terhadap pengaruh demagnetisasi terhadap arus inrush yang muncul. Pengujian dilakukan pada kondisi sudut penyalaan 90° dan untuk data saat dilakukan demagnetisasi, proses demganetisasi dilakukan selama 30 menit. Arus *inrush* yang muncul pada saat tidak dilakukan proses demagnetisasi ditunjukan pada gambar 4.11, dan arus *inrush* yang muncul setelah dilakukan proses demagnetisasi selama 30 menit ditunjukan pada gambar 4.12.

Dapat dilihat dengan membandingkan gambar 4.11 dan gambar 4,12 bahwa tidak ada perbedaan, dikarenakan nilai arus puncak dari masing-masing fasa R, fasa S, dan fasa T bernilai sama. Oleh karena itu untuk proses pengujian selanjutnya tidak dilakukan proses demagnetisasi disetiap percobaan pengambilan datanya.



Gambar 4.11 Arus *inrush* tanpa proses demagnetisasi



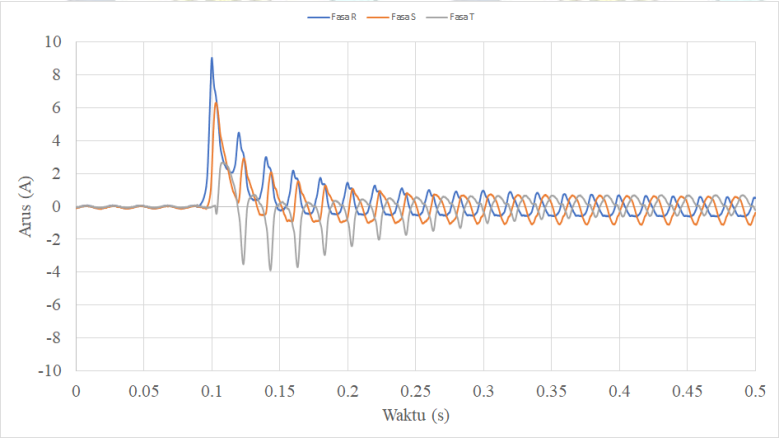
Gambar 4.12 Arus *inrush* dengan proses demagnetisasi selama 30 menit

4.3.1 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 0 Derajat

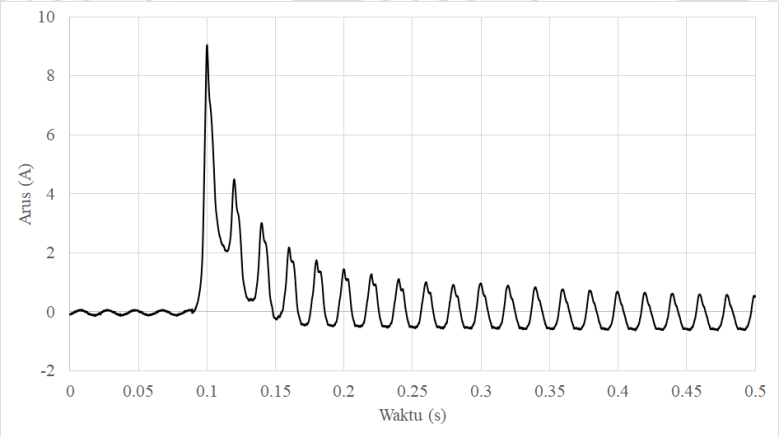
Salah satu hasil pengujian yang didapat oleh DAQ 9246 dapat dilihat pada gambar 4.13 untuk bentuk 3-fasa dan gambar 4.14, 4.15, dan 4.16 untuk masing-masing fasa.

Pada tabel 4.8 menunjukan hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 0° sebanyak 15 kali percobaan. Dari tabel 4.8 dapat dilihat bahwa pada fasa R didapat arus *inrush* berkisar diantara 8,13 A - 9,73 A dengan nilai rata-rata ada diangka 8,64 A. Untuk fasa S didapat

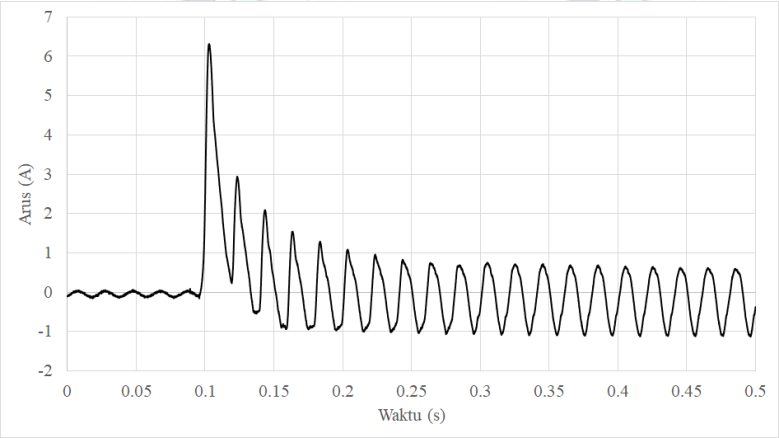
arus *inrush* berkisar diantara 5,97 A – 6,50 A dengan nilai rata-rata ada diangka 6,34 A. Sedangkan untuk fasa T didapat arus *inrush* berkisar diantara -3,27 A – (-4,17) A dengan nilai rata-rata ada diangka -3,84 A.



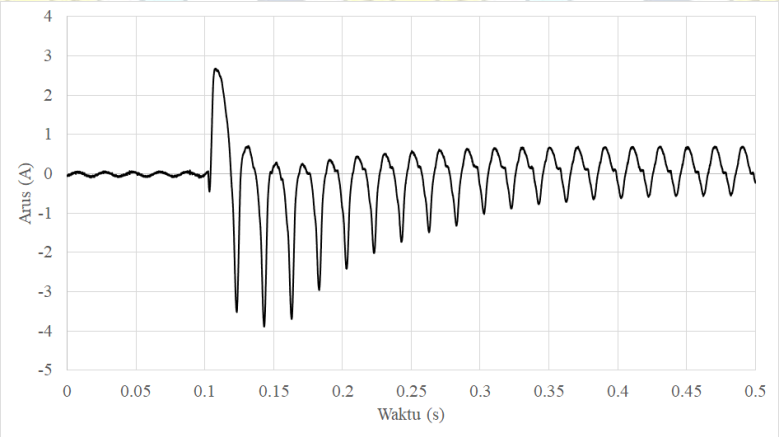
Gambar 4.13 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 0° untuk 3-fasa



Gambar 4.14 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 0° untuk fasa R



Gambar 4.15 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 0° untuk fasa S



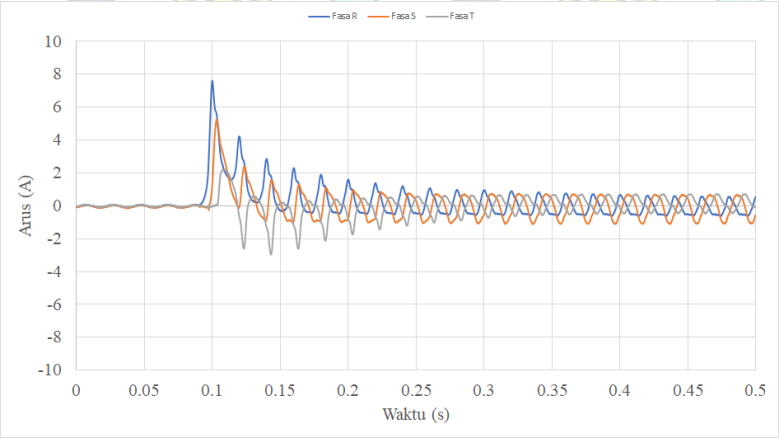
Gambar 4.16 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 0° untuk fasa T

4.3.2 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 30 Derajat

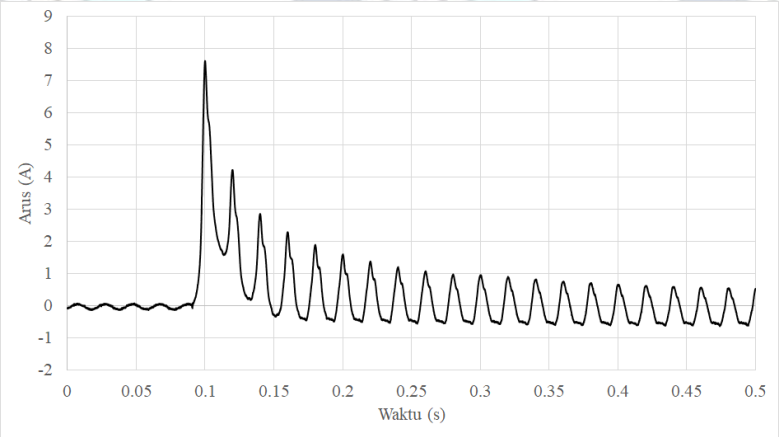
Salah satu hasil pengujian yang didapat oleh DAQ 9246 dapat dilihat pada gambar 4.17 untuk bentuk 3-fasa dan gambar 4.18, 4.19, dan 4.20 untuk masing-masing fasa.

Pada tabel 4.9 menunjukan hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 30° sebanyak 15 kali percobaan. Dari tabel 4.9 dapat dilihat bahwa pada fasa R didapat arus *inrush* berkisar diantara 7,07 A - 9,22 A dengan nilai rata-rata ada diangka 8,24 A. Untuk fasa S didapat

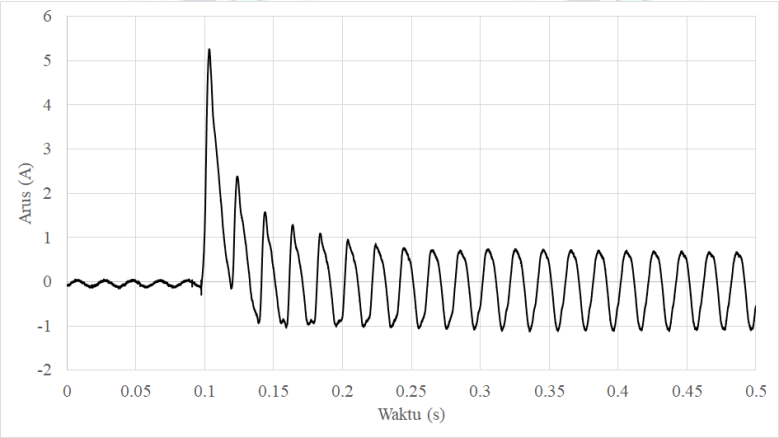
arus *inrush* berkisar diantara 4,42 A – 5,45 A dengan nilai rata-rata ada diangka 5,19 A. Sedangkan untuk fasa T didapat arus *inrush* berkisar diantara -2,64 A – (-3,07) A dengan nilai rata-rata ada diangka -2,89 A.



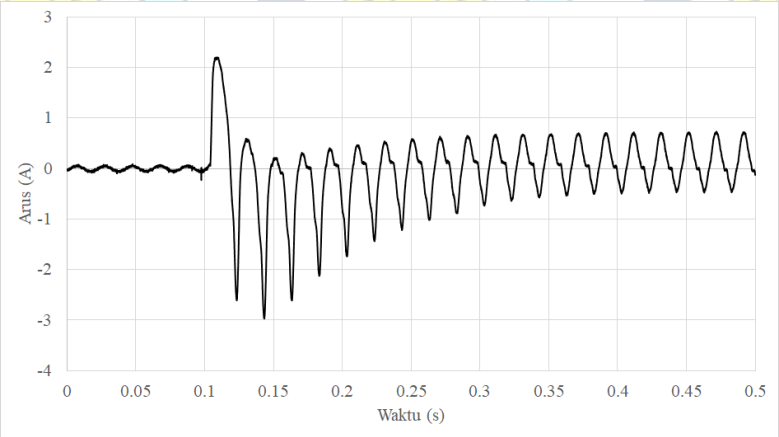
Gambar 4.17 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 30° untuk 3-fasa



Gambar 4.18 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 30° untuk fasa R



Gambar 4.19 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 30° untuk fasa S



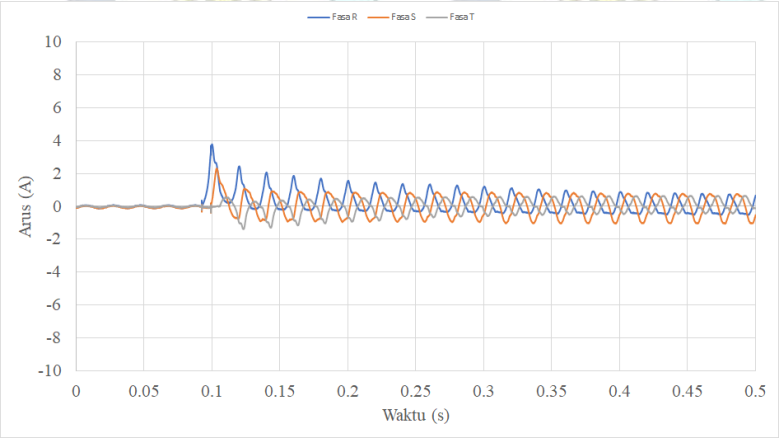
Gambar 4.20 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 30° untuk fasa T

4.3.3 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 60 Derajat

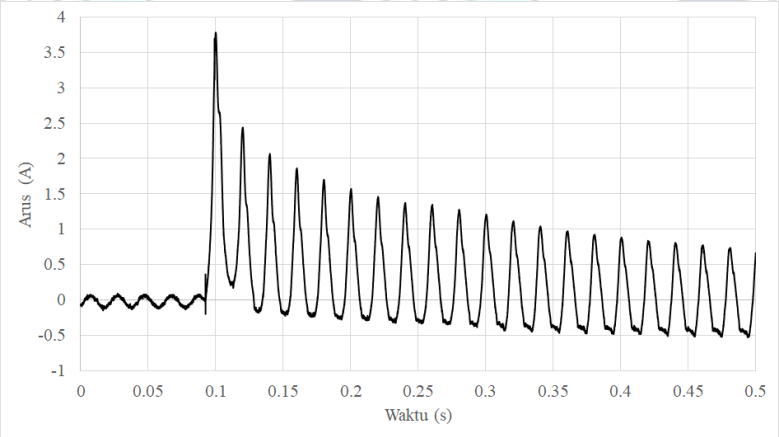
Salah satu hasil pengujian yang didapat oleh DAQ 9246 dapat dilihat pada gambar 4.21 untuk bentuk 3-fasa dan gambar 4.22, 4.23, dan 4.24 untuk masing-masing fasa.

Pada tabel 4.10 menunjukan hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 60° sebanyak 15 kali percobaan. Dari tabel 4.10 dapat dilihat bahwa pada fasa R didapat arus *inrush* berkisar diantara 3,12 A - 3,81 A dengan nilai rata-rata ada diangka 3,50 A. Untuk fasa S didapat

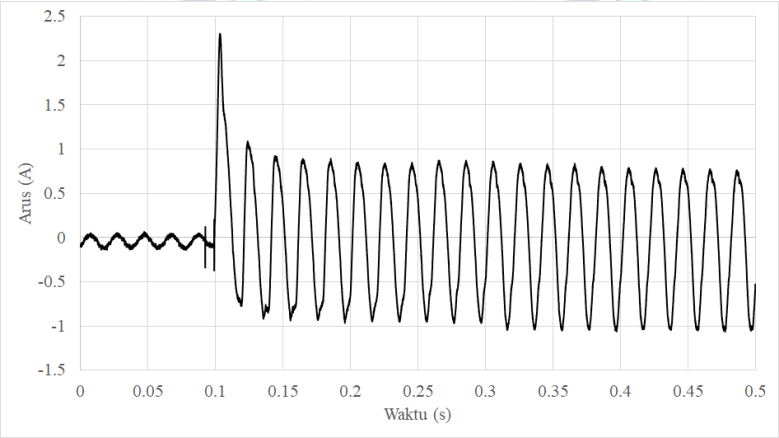
arus *inrush* berkisar diantara 1,91 A – 2,35 A dengan nilai rata-rata ada diangka 2,15 A. Sedangkan untuk fasa T didapat arus *inrush* berkisar diantara -1,13 A – (-1,44) A dengan nilai rata-rata ada diangka -1,31 A.



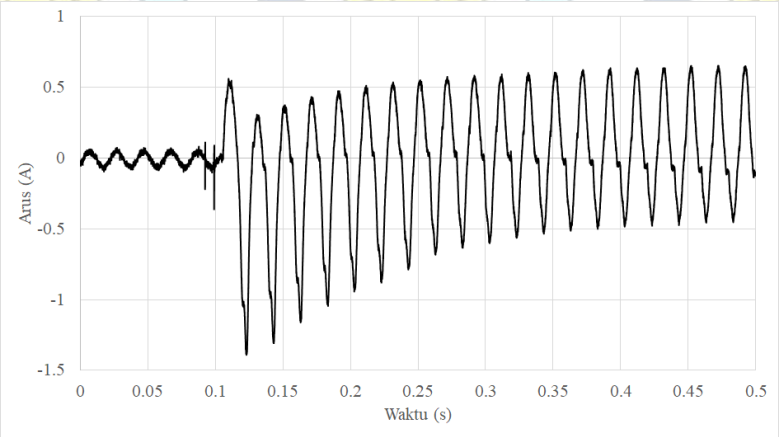
Gambar 4.21 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 60° untuk 3-fasa



Gambar 4.22 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 60° untuk fasa R



Gambar 4.23 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 60° untuk fasa S



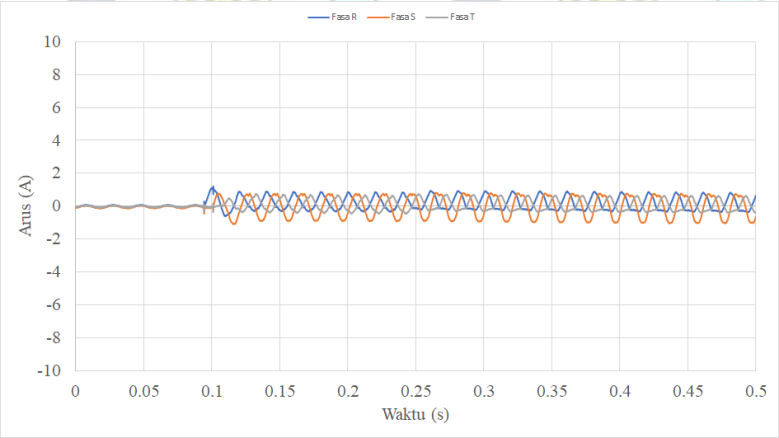
Gambar 4.24 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 60° untuk fasa T

4.3.4 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 90 Derajat

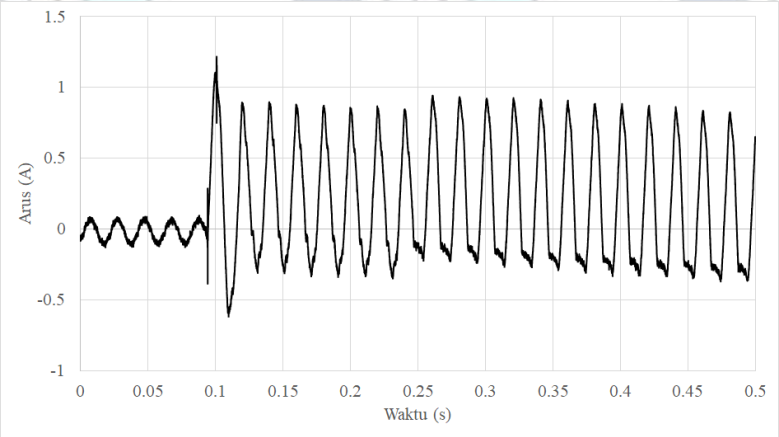
Salah satu hasil pengujian yang didapat oleh DAQ 9246 dapat dilihat pada gambar 4.25 untuk bentuk 3-fasa dan gambar 4.26, 4.27, dan 4.28 untuk masing-masing fasa.

Pada tabel 4.11 menunjukan hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 90° sebanyak 15 kali percobaan. Dari tabel 4.11 dapat dilihat bahwa pada fasa R didapat arus *inrush* berkisar diantara 1,06 A – 1,23 A dengan nilai rata-rata ada diangka 1,13 A. Untuk fasa S didapat

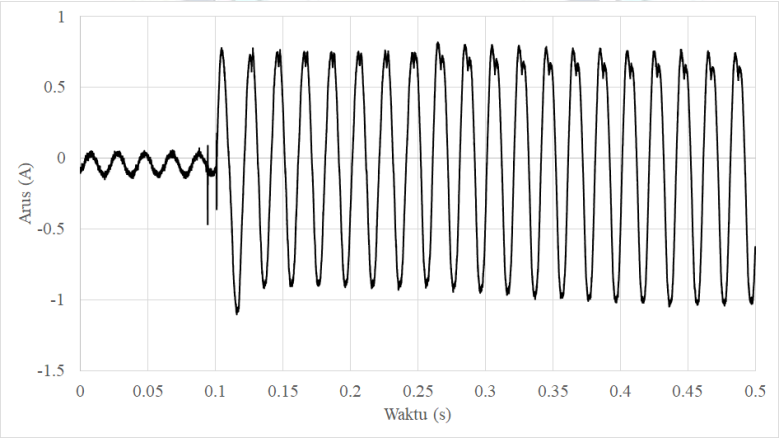
arus *inrush* berkisar diantara -1,08 A – (-1,12) A dengan nilai rata-rata ada diangka -1,10 A. Sedangkan untuk fasa T didapat arus *inrush* berkisar diantara 0,73 A – 0,87 A dengan nilai rata-rata ada diangka 0,81 A.



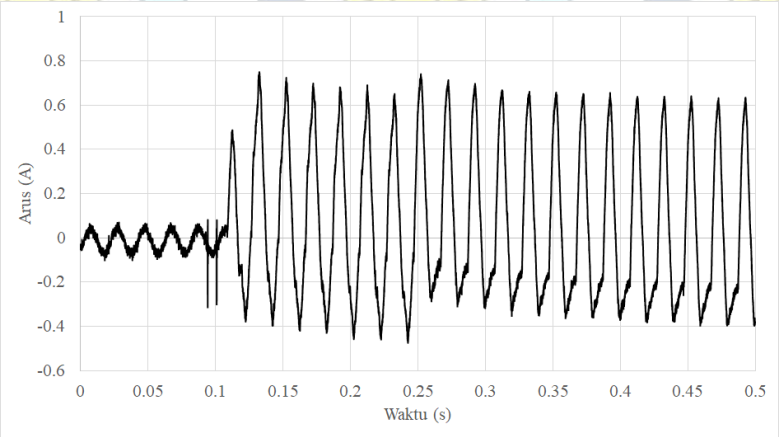
Gambar 4.25 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 90° untuk 3-fasa



Gambar 4.26 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 90° untuk fasa R



Gambar 4.27 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 90° untuk fasa S



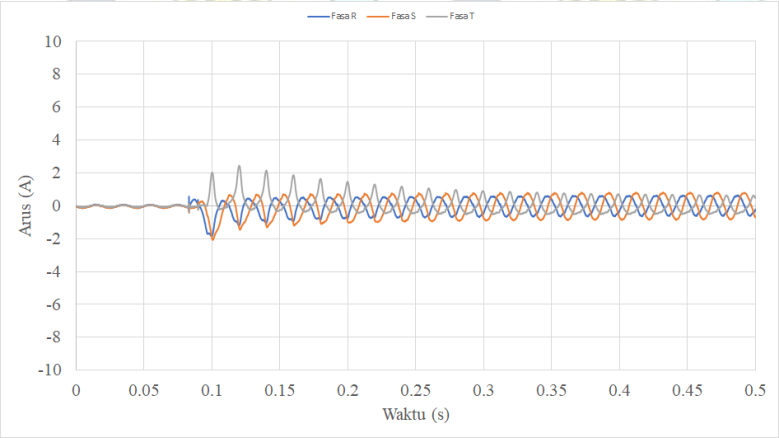
Gambar 4.28 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 90° untuk fasa T

4.3.5 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 120 Derajat

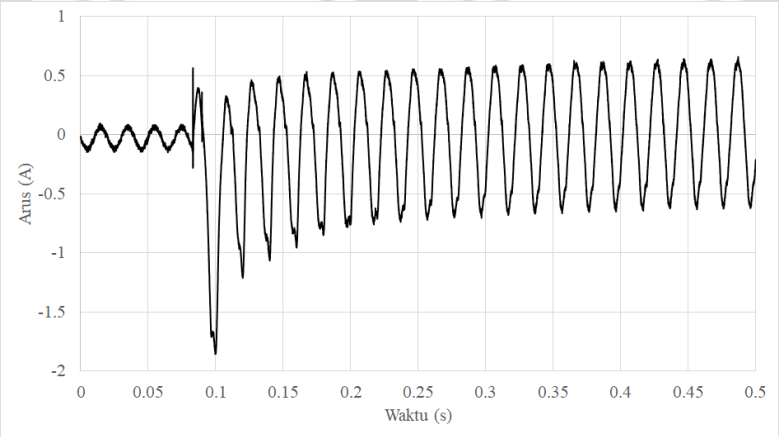
Salah satu hasil pengujian yang didapat oleh DAQ 9246 dapat dilihat pada gambar 4.29 untuk bentuk 3-fasa dan gambar 4.30, 4.31, dan 4.32 untuk masing-masing fasa.

Pada tabel 4.12 menunjukan hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 120° sebanyak 15 kali percobaan. Dari tabel 4.12 dapat dilihat bahwa pada fasa R didapat arus *inrush* berkisar diantara -1,61 A – (-2,29) A dengan nilai rata-rata ada diangka -1,76 A. Untuk fasa S didapat

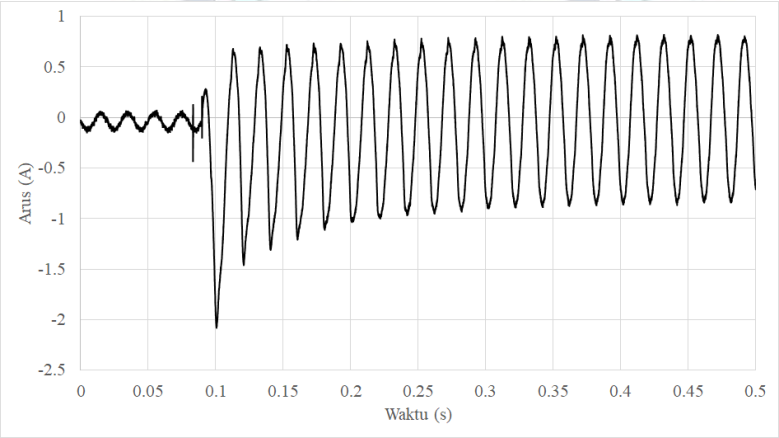
arus *inrush* berkisar diantara -1,88 A – (-2,49) A dengan nilai rata-rata ada diangka -1,99 A. Sedangkan untuk fasa T didapat arus *inrush* berkisar diantara 2,05 A – 2,96 A dengan nilai rata-rata ada diangka 2,29 A.



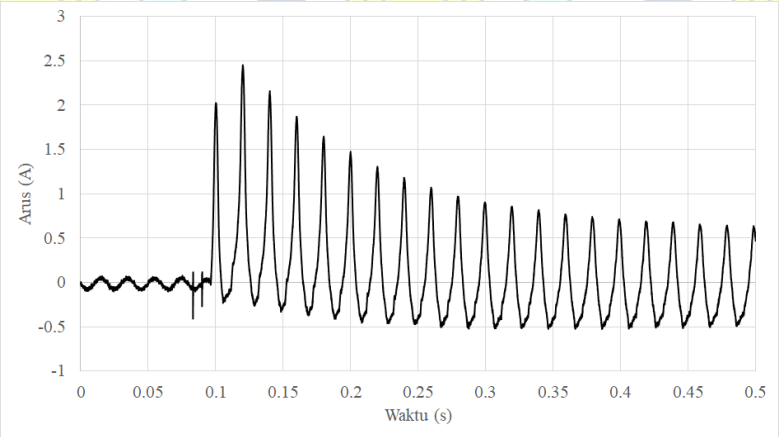
Gambar 4.29 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 120° untuk 3-fasa



Gambar 4.30 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 120° untuk fasa R



Gambar 4.31 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 120° untuk fasa S



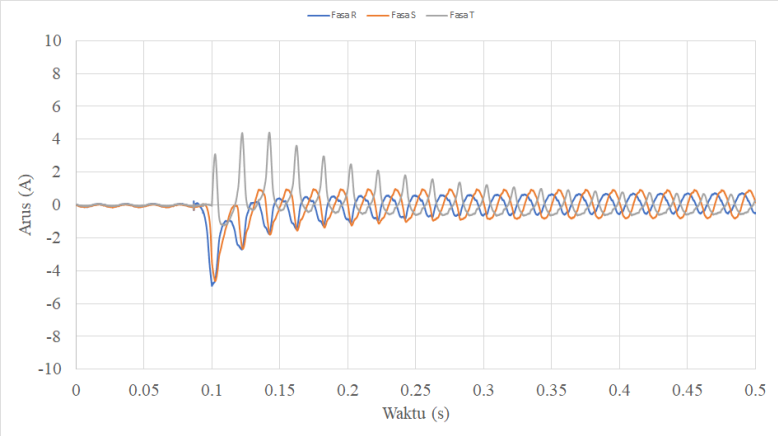
Gambar 4.32 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 120° untuk fasa T

4.3.6 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 150 Derajat

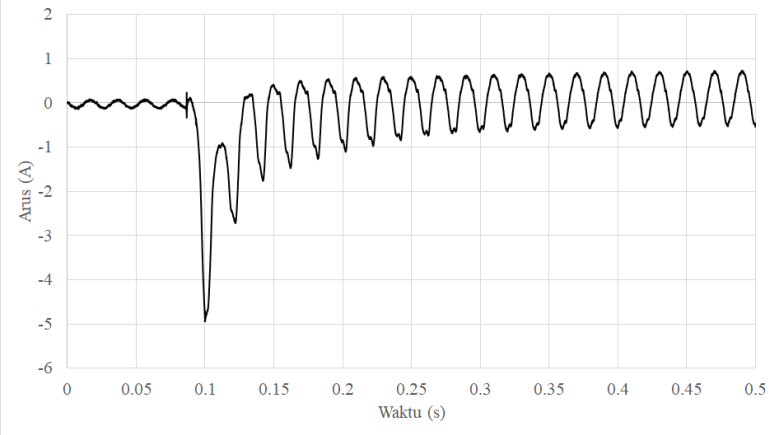
Salah satu hasil pengujian yang didapat oleh DAQ 9246 dapat dilihat pada gambar 4.33 untuk bentuk 3-fasa dan gambar 4.34, 4.35, dan 4.36 untuk masing-masing fasa.

Pada tabel 4.13 menunjukan hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 150° sebanyak 15 kali percobaan. Dari tabel 4.13 dapat

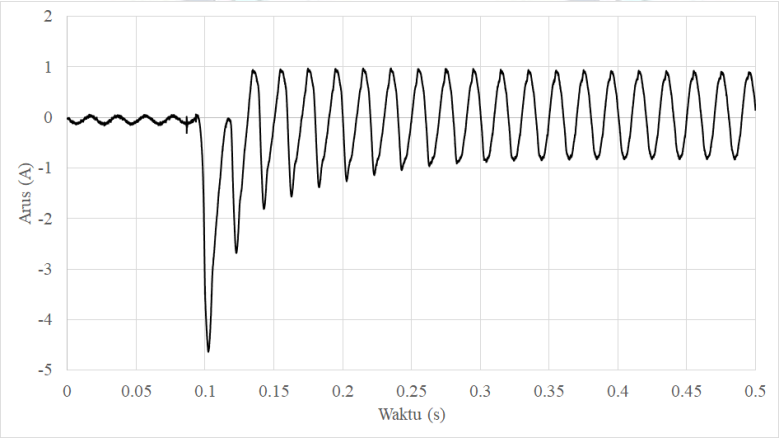
dilihat bahwa pada fasa R didapat arus *inrush* berkisar diantara -4,57 A – (-6,25) A dengan nilai rata-rata ada diangka -5,03 A. Untuk fasa S didapat arus *inrush* berkisar diantara -4,40 A– (-5,50) A dengan nilai rata-rata ada diangka -4,65 A. Sedangkan untuk fasa T didapat arus *inrush* berkisar diantara 4,30 A – 4,65 A dengan nilai rata-rata ada diangka 4,51 A.



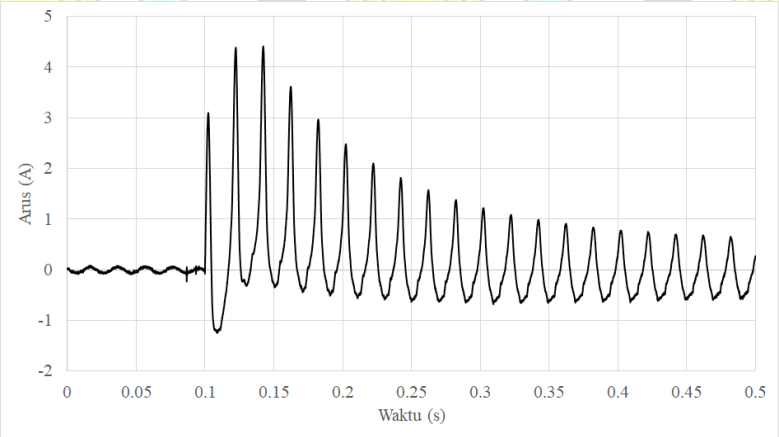
Gambar 4.33 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 150° untuk 3-fasa



Gambar 4.34 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 150° untuk fasa R



Gambar 4.35 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 150° untuk fasa S



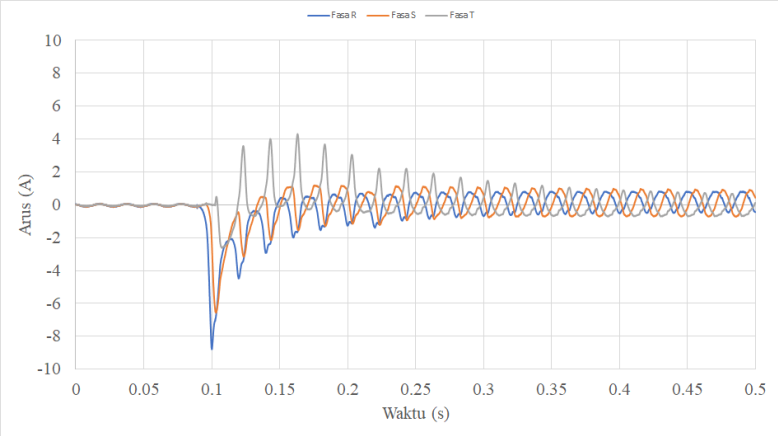
Gambar 4.36 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 150° untuk fasa T

4.3.7 Hasil Pengujian Sudut Penyalaan 180 Derajat

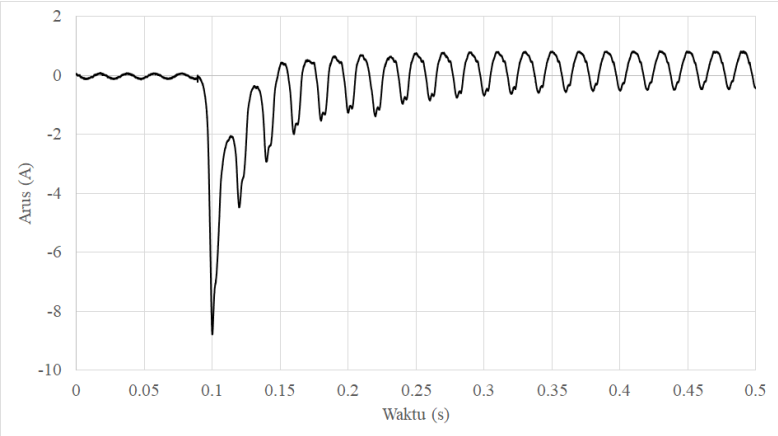
Salah satu hasil pengujian yang didapat oleh DAQ 9246 dapat dilihat pada gambar 4.37 untuk bentuk 3-fasa dan gambar 4.38, 4.39, dan 4.40 untuk masing-masing fasa.

Pada tabel 4.14 menunjukan hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 0° sebanyak 15 kali percobaan. Dari tabel 4.14 dapat

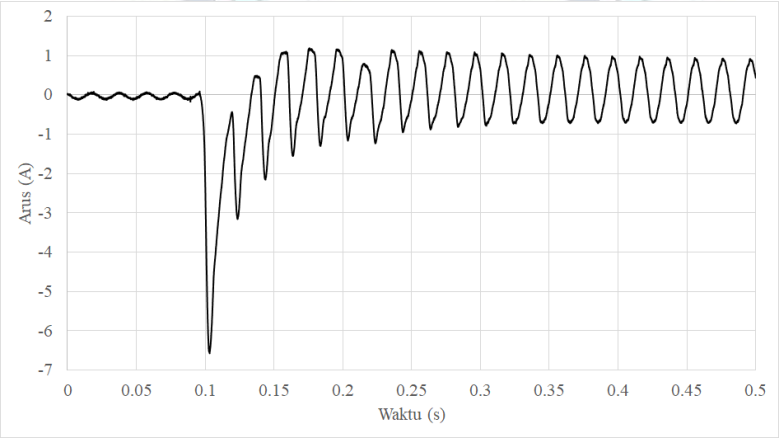
dilihat bahwa pada fasa R didapat arus *inrush* berkisar diantara -8,08 A – (-9,90) A dengan nilai rata-rata ada diangka -9,02 A. Untuk fasa S didapat arus *inrush* berkisar diantara -6,36 A – (-6,56) A dengan nilai rata-rata ada diangka -6,49 A. Sedangkan untuk fasa T didapat arus *inrush* berkisar diantara 3,90 A – 4,56 A dengan nilai rata-rata ada diangka 4,21 A.



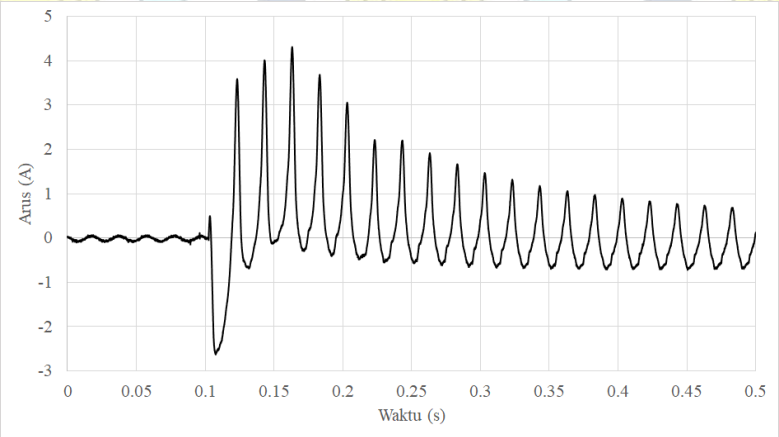
Gambar 4.37 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 180° untuk 3-fasa



Gambar 4.38 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 180° untuk fasa R



Gambar 4.39 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 180° untuk fasa S



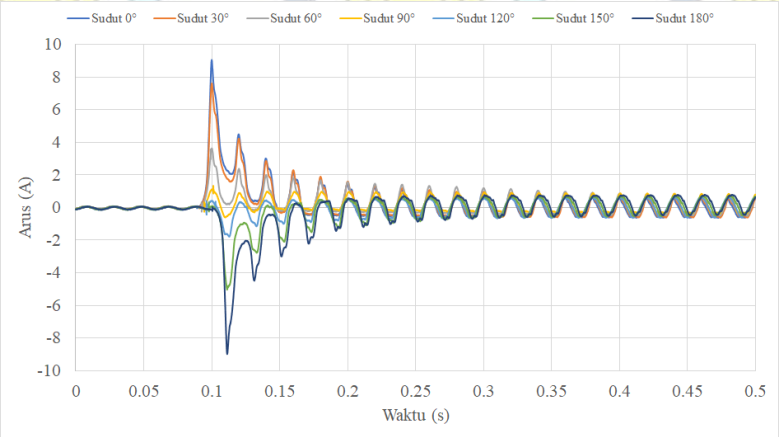
Gambar 4.40 Hasil pengujian arus *inrush* pada sudut penyalaan 180° untuk fasa T

4.4 Analisis Data

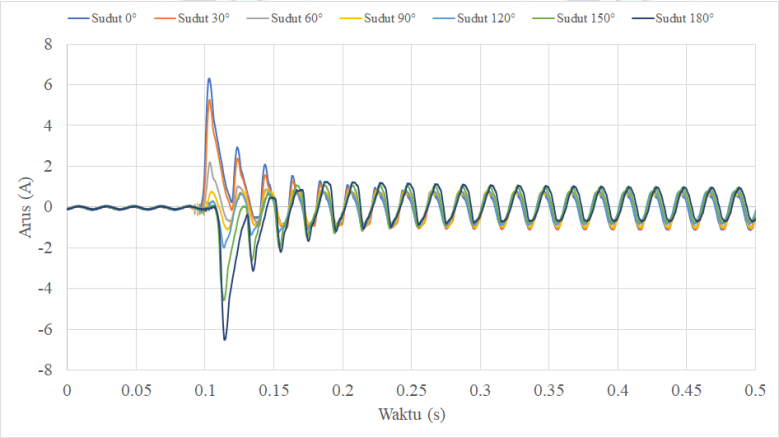
Sesuai dengan judul dan tujuan tentang studi ”Analisa Sudut Penyalaan *Energizing* terhadap Arus *Inrush* pada Transformator 3 Fasa”, semua hasil pengujian yang didapat dari proses akuisisi data yang sudah dibahas pada subbab-subbab sebelumnya dapat digunakan sebagai acuan

untuk mengetahui sifat / karakteristik dari arus *inrush* pada transformator 3 fasa dengan variabel sudut penyalaan saat proses *energizing* transformator 3 fasa tanpa beban yang diubah-ubah. Dalam pengujian ini akan dicari pengaruh sudut penyalaan saat proses *energizing* transformator 3 fasa dengan 7 variasi sudut yang berbeda yaitu 0 derajat, 30 derajat, 60 derajat, 90 derajat, 120 derajat, 150 derajat, dan 180 derajat. Dengan total pengujian sebanyak 15 kali untuk setiap sudut penyalaannya tanpa proses demagnetisasi.

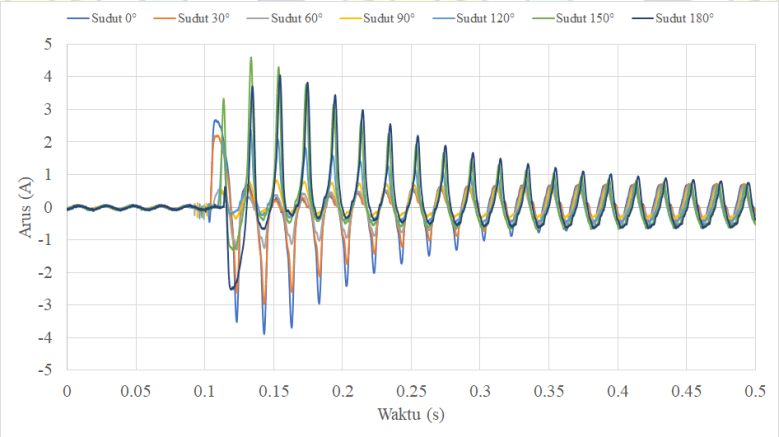
Gambar 4.41, 4.42, dan 4.43 menunjukan perbandingan arus *inrush* yang muncul untuk setiap fasanya. Bila dilihat dan diamati, arus *inrush* akan mencapai nilai puncaknya di sisi positif pada saat sudut penyalaan diatur menjadi 0 derajat, setelah melebihi 90 derajat arus *inrush* akan berubah polaritasnya dari yang tadinya bernilai positif menjadi negatif (fasa R dan fasa S) begitu juga yang tadinya bernilai negatif menjadi positif (fasa T), dan titik puncak arus *inrush* pada sisi negatif dapat diamati berada pada saat sudut penyalaan diatur menjadi 180 derajat.



Gambar 4.41 Perbandingan arus *inrush* fasa R



Gambar 4.42 Perbandingan arus *inrush* fasa S

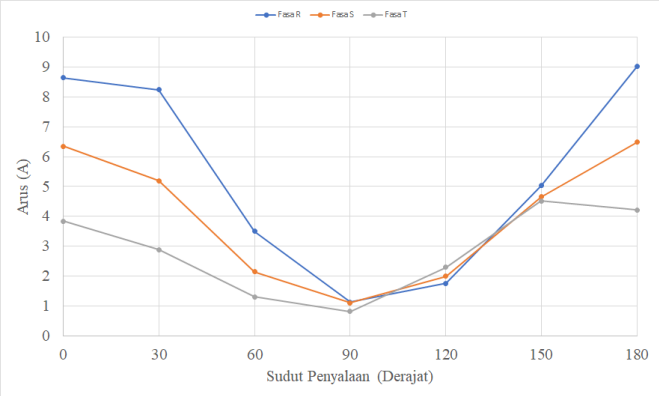


Gambar 4.43 Perbandingan arus *inrush* fasa T

Bila dilihat dari tabel 4.8 hingga tabel 4.14, arus *inush* yang timbul untuk disetiap sudut penyalaan memiliki nilai yang cukup bervariasi disetiap percobaan ke-1 hingga percobaan ke-15. Hal tersebut disebabkan oleh dua faktor utama, yang pertama dikarenakan tingkat ketelitian dari waktu *delay* yang diberikan pada komponen *switching* sehingga sakelar tidak selalu tepat membuka pada sudut yang diinginkan. Faktor yang kedua disebabkan oleh adanya fluks sisa yang terdapat pada magnet di transformator uji, nilai fluks sisa yang bervariasi yang

menyebabkan nilai arus *inrush* yang timbul juga bervariasi untuk disetiap percobaannya. Sedangkan untuk fasa R, fasa S, dan fasa T memiliki nilai arus *inrush* yang berbeda-beda dikarenakan adanya *delay* pada proses penyakelaran sebesar 120 derajat atau 6,67 ms untuk setiap fasanya, hal tersebut dikarenakan pada proses pengujian modul pengatur sudut penyalaan *energize* diatur agar proses *energize* berlangsung secara sekuensial (sakelar terbuka secara bergantian untuk setiap fasa).

Gambar 4.44 menampilkan grafik perbandingan rata-rata arus *inrush* yang timbul pada setiap sudut penyalaan dari 0 derajat hingga 180 derajat. Dapat dilihat bahwa arus *inrush* tertinggi muncul ketika sudut penyalaan diatur menjadi 0 derajat dan 180 derajat, yang mana kedua kondisi tersebut merupakan kondisi dimana tegangan yang digunakan dalam proses *energizing* mencapai nilai minimumnya (mendekati 0 V). Sedangkan dapat dilihat juga arus *inrush* terkecil muncul saat transformator di *energize* pada sudut penyalaan 90 derajat, dimana sudut penyalaan 90 derajat merupakan kondisi dimana tegangan berada di kondisi puncak atau maksimumnya. Hal tersebut dikarenakan saat tegangan rating maksimum nilai fluks juga tinggi, sehingga tidak memerlukan persimpangan arus yang besar untuk memenuhi fluks mencapai kondisi saturasi, namun tidak melebihi tegangan rating transformator karena inti transformator bisa menjadi sangat saturasi yang menyebabkan penumpukan panas dan dapat merusak transformator [8]. Oleh karena itu, saat diatur sudut penyalaan 90 derajat merupakan proses *energizing* transformator yang terbaik.



Gambar 4.44 Perbandingan rata-rata arus *inrush* untuk setiap sudut penyalaan

Tabel 4.8 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 0°

Percobaan ke-	Arus Puncak (A)			Perbandingan Arus *Inrush*		
	R	S	T	R	S	T
1	9,05	6,31	-3,88	1,14 I_n	0,80 I_n	0,49 I_n
2	9,50	6,43	-4,02	1,20 I_n	0,81 I_n	0,51 I_n
3	8,30	6,34	-3,95	1,05 I_n	0,80 I_n	0,50 I_n
4	9,25	6,34	-3,75	1,17 I_n	0,80 I_n	0,47 I_n
5	8,35	6,41	-3,95	1,05 I_n	0,81 I_n	0,50 I_n
6	8,37	6,34	-3,91	1,06 I_n	0,80 I_n	0,49 I_n
7	9,73	5,97	-3,27	1,23 I_n	0,75 I_n	0,41 I_n
8	8,93	6,35	-3,88	1,13 I_n	0,80 I_n	0,49 I_n
9	8,94	6,38	-3,86	1,13 I_n	0,81 I_n	0,49 I_n
10	9,61	6,50	-3,93	1,22 I_n	0,82 I_n	0,49 I_n
11	7,82	6,27	-3,61	0,99 I_n	0,79 I_n	0,45 I_n
12	8,35	6,34	-4,04	1,06 I_n	0,80 I_n	0,51 I_n
13	7,46	6,35	-3,46	0,94 I_n	0,80 I_n	0,43 I_n
14	7,82	6,34	-3,98	0,99 I_n	0,80 I_n	0,50 I_n
15	8,13	6,41	-4,16	1,03 I_n	0,81 I_n	0,52 I_n

Tabel 4.9 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 30°

Percobaan ke-	Arus Puncak (A)			Perbandingan Arus *Intush*		
	R	S	T	R	S	T
1	7,27	5,13	-2,85	0,92 I_n	0,65 I_n	0,36 I_n
2	8,25	5,45	-2,78	1,04 I_n	0,69 I_n	0,35 I_n
3	7,45	5,24	-2,88	0,94 I_n	0,66 I_n	0,36 I_n
4	9,22	5,28	-2,93	1,17 I_n	0,67 I_n	0,37 I_n
5	9,18	5,30	-2,96	1,16 I_n	0,67 I_n	0,37 I_n
6	7,79	5,38	-2,97	0,98 I_n	0,68 I_n	0,37 I_n
7	8,90	5,43	-3,03	1,13 I_n	0,68 I_n	0,38 I_n
8	7,65	4,90	-2,75	0,97 I_n	0,62 I_n	0,34 I_n
9	7,07	4,42	-2,54	0,89 I_n	0,56 I_n	0,32 I_n
10	8,81	5,31	-2,97	1,11 I_n	0,67 I_n	0,37 I_n
11	9,01	5,42	-3,03	1,14 I_n	0,68 I_n	0,38 I_n
12	7,62	5,26	-2,97	0,96 I_n	0,66 I_n	0,37 I_n
13	9,01	5,40	-3,03	1,14 I_n	0,68 I_n	0,38 I_n
14	9,17	5,43	-3,07	1,16 I_n	0,68 I_n	0,39 I_n
15	7,24	4,48	-2,64	0,91 I_n	0,56 I_n	0,33 I_n

Tabel 4.10 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 60°

Percobaan ke-	Arus Puncak (A)			Perbandingan Arus *Inrush*		
	R	S	T	R	S	T
1	3,72	2,21	-1,44	0,47 I_n	0,28 I_n	0,18 I_n
2	3,61	2,26	-1,39	0,45 I_n	0,28 I_n	0,17 I_n
3	3,81	2,35	-1,42	0,48 I_n	0,29 I_n	0,18 I_n
4	3,78	2,30	-1,38	0,48 I_n	0,29 I_n	0,17 I_n
5	3,57	2,27	-1,35	0,45 I_n	0,28 I_n	0,17 I_n
6	3,34	2,06	-1,24	0,42 I_n	0,26 I_n	0,15 I_n
7	3,16	2,06	-1,22	0,40 I_n	0,26 I_n	0,15 I_n
8	3,15	1,91	-1,13	0,40 I_n	0,24 I_n	0,14 I_n
9	3,40	2,10	-1,26	0,43 I_n	0,26 I_n	0,16 I_n
10	3,63	2,20	-1,30	0,46 I_n	0,28 I_n	0,16 I_n
11	3,12	2,01	-1,25	0,39 I_n	0,25 I_n	0,15 I_n
12	3,58	2,15	-1,31	0,45 I_n	0,27 I_n	0,16 I_n
13	3,37	2,06	-1,24	0,42 I_n	0,26 I_n	0,15 I_n
14	3,65	2,20	-1,40	0,46 I_n	0,28 I_n	0,17 I_n
15	3,55	2,14	-1,35	0,45 I_n	0,27 I_n	0,17 I_n

Tabel 4.11 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 90°

Percobaan ke-	Arus Puncak (A)			Perbandingan Arus *Inrush*		
	R	S	T	R	S	T
1	1,05	-1,12	0,85	0,13 I_n	0,14 I_n	0,10 I_n
2	1,14	-1,12	0,84	0,14 I_n	0,14 I_n	0,10 I_n
3	1,12	-1,11	0,78	0,14 I_n	0,14 I_n	0,09 I_n
4	1,06	-1,11	0,84	0,13 I_n	0,14 I_n	0,10 I_n
5	1,17	-1,11	0,84	0,14 I_n	0,14 I_n	0,10 I_n
6	1,12	-1,10	0,87	0,14 I_n	0,14 I_n	0,11 I_n
7	1,12	-1,09	0,83	0,14 I_n	0,13 I_n	0,10 I_n
8	1,13	-1,08	0,83	0,14 I_n	0,13 I_n	0,10 I_n
9	1,07	-1,11	0,84	0,13 I_n	0,14 I_n	0,10 I_n
10	1,14	-1,11	0,73	0,14 I_n	0,14 I_n	0,09 I_n
11	1,20	-1,11	0,79	0,15 I_n	0,14 I_n	0,10 I_n
12	1,11	-1,10	0,75	0,14 I_n	0,14 I_n	0,09 I_n
13	1,20	-1,09	0,81	0,15 I_n	0,13 I_n	0,10 I_n
14	1,18	-1,08	0,80	0,15 I_n	0,13 I_n	0,10 I_n
15	1,23	-1,10	0,79	0,15 I_n	0,14 I_n	0,10 I_n

Tabel 4.12 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 120°

Percobaan ke-	Arus Puncak (A)			Perbandingan Arus *Inrush*		
	R	S	T	R	S	T
1	-1,88	-2,03	2,28	0,23 I_n	0,25 I_n	0,29 I_n
2	-1,74	-1,97	2,30	0,22 I_n	0,25 I_n	0,29 I_n
3	-1,61	-1,88	2,11	0,20 I_n	0,23 I_n	0,26 I_n
4	-1,80	-1,99	2,28	0,22 I_n	0,25 I_n	0,29 I_n
5	-1,67	-1,92	2,32	0,21 I_n	0,24 I_n	0,29 I_n
6	-1,61	-1,90	2,05	0,20 I_n	0,24 I_n	0,26 I_n
7	-1,72	-1,99	2,20	0,21 I_n	0,25 I_n	0,27 I_n
8	-1,61	-1,92	2,07	0,20 I_n	0,24 I_n	0,26 I_n
9	-1,74	-1,97	2,25	0,22 I_n	0,25 I_n	0,28 I_n
10	-2,29	-2,49	2,96	0,29 I_n	0,31 I_n	0,37 I_n
11	-1,69	-1,92	2,22	0,21 I_n	0,24 I_n	0,28 I_n
12	-1,78	-2,00	2,38	0,22 I_n	0,25 I_n	0,30 I_n
13	-1,64	-1,94	2,21	0,20 I_n	0,24 I_n	0,28 I_n
14	-1,72	-1,96	2,33	0,21 I_n	0,25 I_n	0,29 I_n
15	-1,85	-2,06	2,45	0,23 I_n	0,26 I_n	0,31 I_n

Tabel 4.13 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 150°

Percobaan ke-	Arus Puncak (A)			Perbandingan Arus *Inrush*		
	R	S	T	R	S	T
1	-5,11	-4,65	4,55	0,64 I_n	0,59 I_n	0,57 I_n
2	-6,25	-5,50	4,51	0,79 I_n	0,69 I_n	0,57 I_n
3	-5,03	-4,61	4,58	0,64 I_n	0,58 I_n	0,58 I_n
4	-4,89	-4,61	4,54	0,62 I_n	0,58 I_n	0,57 I_n
5	-5,04	-4,65	4,58	0,64 I_n	0,59 I_n	0,58 I_n
6	-4,67	-4,41	4,35	0,59 I_n	0,56 I_n	0,55 I_n
7	-5,03	-4,58	4,59	0,63 I_n	0,58 I_n	0,58 I_n
8	-5,07	-4,66	4,60	0,64 I_n	0,59 I_n	0,58 I_n
9	-4,84	-4,50	4,50	0,61 I_n	0,57 I_n	0,57 I_n
10	-5,27	-4,75	4,65	0,67 I_n	0,60 I_n	0,59 I_n
11	-4,80	-4,52	4,44	0,61 I_n	0,57 I_n	0,56 I_n
12	-4,57	-4,40	4,30	0,58 I_n	0,55 I_n	0,54 I_n
13	-5,01	-4,61	4,60	0,63 I_n	0,58 I_n	0,58 I_n
14	-4,92	-4,63	4,41	0,62 I_n	0,58 I_n	0,56 I_n
15	-5,00	-4,68	4,52	0,63 I_n	0,59 I_n	0,57 I_n

Tabel 4.14 Hasil pengukuran arus *inrush* dengan sudut penyalaan 180°

Data ke-	Arus Puncak (A)			Perbandingan Arus *Inrush*		
	R	S	T	R	S	T
1	-8,10	-6,40	4,00	1,02 I_n	0,81 I_n	0,50 I_n
2	-8,85	-6,50	4,11	1,12 I_n	0,82 I_n	0,52 I_n
3	-9,19	-6,56	4,52	1,16 I_n	0,83 I_n	0,57 I_n
4	-9,81	-6,55	3,97	1,24 I_n	0,83 I_n	0,50 I_n
5	-8,32	-6,46	4,25	1,05 I_n	0,82 I_n	0,54 I_n
6	-9,34	-6,49	4,56	1,18 I_n	0,82 I_n	0,57 I_n
7	-8,98	-6,51	4,04	1,14 I_n	0,82 I_n	0,51 I_n
8	-9,17	-6,51	4,42	1,16 I_n	0,82 I_n	0,56 I_n
9	-9,35	-6,52	4,38	1,18 I_n	0,82 I_n	0,55 I_n
10	-9,61	-6,49	3,90	1,22 I_n	0,82 I_n	0,49 I_n
11	-9,20	-6,54	4,31	1,16 I_n	0,83 I_n	0,54 I_n
12	-9,90	-6,57	4,31	1,25 I_n	0,83 I_n	0,54 I_n
13	-8,62	-6,39	3,92	1,09 I_n	0,81 I_n	0,49 I_n
14	-8,08	-6,36	4,16	1,02 I_n	0,80 I_n	0,52 I_n
15	-8,79	-6,54	4,31	1,11 I_n	0,83 I_n	0,54 I_n

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dengan mengubah-ubah variabel sudut penyalaan sebanyak 7 variasi dari 0 derajat hingga 180 derajat saat proses *energizing* dan pengaruhnya terhadap arus *inrush* pada transformator 3-fasa dengan kapasitas daya 3 kVA, maka didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses demagnetisasi yang dicoba dalam pengujian ini tidak memiliki efek yang cukup signifikan terhadap besarnya nilai arus *inrush* yang timbul, baik dengan dialirkan menggunakan kapasitor yang disusun secara paralel maupun dialirkan menuju ground, dengan durasi waktu 1, 3, 9, dan 30 menit.
2. Arus *inrush* yang timbul pada fasa R memiliki nilai rata-rata tertinggi pada saat sudut penyalaan 180 derajat, berada pada angka 9,02 A (1,15 I_n), sedangkan memiliki nilai rata-rata terendah pada saat sudut penyalaan 90 derajat, berada diangka 1,13 A (0,14 I_n).
3. Arus *inrush* yang timbul pada fasa S memiliki nilai rata-rata tertinggi pada saat sudut penyalaan 180 derajat, berada pada angka 6,49 A (0,82 I_n), sedangkan memiliki nilai rata-rata terendah pada saat sudut penyalaan 90 derajat, berada diangka 1,10 A (0.14 I_n).
4. Arus *inrush* yang timbul pada fasa T memiliki nilai rata-rata tertinggi pada saat sudut penyalaan 150 derajat, berada pada angka 4,51 A (0,57 I_n), sedangkan memiliki nilai rata-rata terendah pada saat sudut penyalaan 90 derajat, berada diangka 0,81 A (0,10 I_n).
5. Pada saat *energizing* transformator 3-fasa sudut penyalaan terbaik adalah 90 derajat, dikarenakan pada saat sudut penyalaan 90 derajat tegangan yang diinjeksikan berada pada kondisi maksimum, sehingga fluks juga menjadi tinggi yang mengakibatkan tidak terlalu besarnya arus yang dibutuhkan untuk mencapai fluks pada kondisi saturasi yang dibutuhkan transformator.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil yang didapat pada pengujian ini adalah bagaimana pengaruh sudut penyalaan saat *energize* transformator saat sakelar dibuka secara non-sekuensial dan juga perlu dikembangkan proses demagnetisasi yang lebih baik.

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Higher Education, 2005.

[2] A. W. Ramadhan, "Analysis of Inrush Current Characteristic on 3-Phase Transformer With Different Leg Based on Experiment," *Final Proj.*, vol. 1, no. 1, pp. 10–11, 2018.

[3] M. Jamali, M. Mirzaie, and S. Asghar-Gholamian, "Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions," *Electron. Electr. Eng.*, vol. 109, no. 3, Mar. 2011.

[4] R. Cano-González, A. Bachiller-Soler, J. A. Rosendo-Macías, and G. Álvarez-Cordero, "Inrush current mitigation in three-phase transformers with isolated neutral," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 121, pp. 14–19, Apr. 2015.

[5] Y. R. Setiadi, "Analysis of Inrush Current Characteristics Transformer 3-Phase Due To The Effect of Residual Flux," 2017.

[6] Department of Electrical and Electronics Engineering. Federal University of Technology, PMB 65, Minna, Nigeria and E. Asizehi, "Effect of Switching angle on Magnetizing flux and Inrush current of a Transformer," *IOSR J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 20–22, 2013.

[7] T. Koshizuka, H. Kusuyama, M. Saito, H. Maehara, Y. Sato, and H. Toda, "Controlled switching for energizing 3-phase transformers in isolated neutral system," in *2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Seoul, South Korea, 2009, pp. 1–4.

[8] J. L. Blackburn and T. J. Domin, "Protective Relaying: Principles and Applications," p. 638, 2006.

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

LAMPIRAN

Source code Arduino

```
#define LED_PIN             17
#define LED_ON              digitalWrite(LED_PIN, HIGH)
#define LED_OFF             digitalWrite(LED_PIN, LOW)

#define OUT_PHASE_R_PIN     9
#define PHASE_R_ON          digitalWrite(OUT_PHASE_R_PIN, LOW)
#define PHASE_R_OFF         digitalWrite(OUT_PHASE_R_PIN, HIGH)

#define OUT_PHASE_S_PIN     10
#define PHASE_S_ON          digitalWrite(OUT_PHASE_S_PIN, LOW)
#define PHASE_S_OFF         digitalWrite(OUT_PHASE_S_PIN, HIGH)

#define OUT_PHASE_T_PIN     11
#define PHASE_T_ON          digitalWrite(OUT_PHASE_T_PIN, LOW)
#define PHASE_T_OFF         digitalWrite(OUT_PHASE_T_PIN, HIGH)

#define DEBUG_PIN           12
#define DEBUG_PIN_ON        digitalWrite(DEBUG_PIN, HIGH)
#define DEBUG_PIN_OFF       digitalWrite(DEBUG_PIN, LOW)

#define BTN_START_PIN       2
#define ZCD_PIN             3

#define PHASE_ANGLE         0
#define DELAY_OFFSET        9740

float delay_R, delay_S, delay_T, delay_1_4_cycle;

enum m_mode {START,STOP};

m_mode mode = STOP;

char buffer[64];

bool low_detection = false;

//-- A function for blinking LED --//
void LED_blink()
{
  for (int i = 0; i < 4; i++)
  {
    LED_ON;
    delay(150);
    LED_OFF;
```

```
    delay(150);
  }
  delay(1000);
  for (int i = 0; i < 2; i++)
  {
    LED_ON;
    delay(1000);
    LED_OFF;
    delay(1000);
  }
}

//-- Interrupt routine for changing mode when push button is presed --//
void ISR_btn_start()
{
  detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(BTN_START_PIN));
  delay(1000);
  if (mode == STOP)
  {
    mode = START;
    LED_ON;
    pinMode(ZCD_PIN, INPUT);
    low_detection = true;
    Serial.println("Mode --> START");
  }
  else
  {
    mode = STOP;
    LED_OFF;
    // Set all phases OFF
    PHASE_R_OFF;
    PHASE_S_OFF;
    PHASE_T_OFF;
    Serial.println("Mode --> STOP");
  }
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(BTN_START_PIN), ISR_btn_start, FALLING);
  delay(1000);
}

//-- Interrupt routine when zero crossing is detected --//
void ISR_ZCD()
{
//  Serial.println("ZCD Detected...");
  DEBUG_PIN_ON;
  DEBUG_PIN_OFF;
  delayMicroseconds(delay_1_4_cycle);
  delayMicroseconds(delay_1_4_cycle);
  delayMicroseconds(DELAY_OFFSET);
  delayMicroseconds(delay_R);
```

```
  PHASE_R_ON;
  delayMicroseconds(delay_S);
  PHASE_S_ON;
  delayMicroseconds(delay_T);
  PHASE_T_ON;
  detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ZCD_PIN));
}

//-- Setup function to initialize some configurations of ports, etc. --//
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
  pinMode(OUT_PHASE_R_PIN, OUTPUT);
  pinMode(OUT_PHASE_S_PIN, OUTPUT);
  pinMode(OUT_PHASE_T_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DEBUG_PIN, OUTPUT);

  //-- Initialize output of phase control pins to be off --//
  PHASE_R_OFF;
  PHASE_S_OFF;
  PHASE_T_OFF;

  DEBUG_PIN_OFF;

  //-- Initialize for some interrupts --//
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(BTN_START_PIN), ISR_btn_start, FALLING);
  detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ZCD_PIN));

  //Initialize serial and wait for port to open:
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
  Serial.println("Welcome...!!!");
  Serial.println("ScoutLED Technology");
  delay(1000); // waits for a second

  // Set delay for each phase
  delay_1_4_cycle = (float)(1.0*20000)*0.25;
  delay_R = (float)(1.0*20000*(PHASE_ANGLE)/360);
  delay_S = (float)(1.0*20000*120/360);
  delay_T = (float)(1.0*20000*120/360);

  Serial.print("Delay_R --> ");
  Serial.print(delay_R);
  Serial.print(" Delay_S --> ");
  Serial.print(delay_S);
  Serial.print(" Delay_T --> ");
  Serial.print(delay_T);
```

```
  Serial.println();
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  switch(mode)
  {
    case START:
      Serial.println("Mode --> START");
      // Detec LOW signal from ZCD
      if (low_detection)
      {
        while (digitalRead(ZCD_PIN)){;}
        {
          delayMicroseconds(9500);
          if (!digitalRead(ZCD_PIN))
          {
            low_detection = false;
            // Activate zero crossing interrupt
            attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ZCD_PIN), ISR_ZCD, RISING);
          }
        }
      }

    break;
    case STOP:
      Serial.println("Mode --> STOP");
      // Deactivate zero crossing interrupt
      detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ZCD_PIN));
    default:
    break;
  }
}
```

RIWAYAT HIDUP

Muhammad Renady Jovananda, lahir di Surabaya pada tanggal 12 Januari 1998. Anak kedua dari dua bersaudara. Menempuh pendidikan formal di SDN 01 Gunung Sindur pada tahun 2003-2004, SDN PUSPITEK pada tahun 2004-2007, SDS PB Soedirman pada tahun 2007-2009, SMPN 103 Jakarta pada tahun 2009-2012, SMAN 28 Jakarta pada tahun 2012-2015. Dan pada tahun 2015 diterima sebagai mahasiswa jurusan Departemen Teknik Elekto, Fakultas Teknologi Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama menjalani kuliah, penulis aktif di beberapa kegiatan kampus dalam kepanitiaan seperti GERIGI ITS, ELECTRA HIMATEKTRO ITS, tim kaderisasi HIMATEKTRO ITS, PANWASLU PEMILU ITS, dan lain sebagainya. Penulis dapat dihubungi pada email: harenva28@gmail.com

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)