



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENGURANGAN ARUS *INRUSH* PADA *CAPACITOR*
BANK MENGGUNAKAN METODE *SOFT SWITCHING***

Yudhatama Dwi Putra
NRP 0711144000075

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENGURANGAN ARUS *INRUSH* PADA *CAPACITOR*
BANK MENGGUNAKAN METODE *SOFT SWITCHING***

Yudhatama Dwi Putra
NRP 0711144000075

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

REDUCTION OF INRUSH CURRENT IN CAPACITOR BANK USING SOFT SWITCHING METHOD

Yudhatama Dwi Putra
NRP 0711144000075

Supervisors

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

**PENGURANGAN ARUS *INRUSH* PADA *CAPACITOR BANK*
MENGUNAKAN METODE *SOFT SWITCHING***

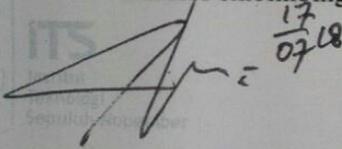
TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

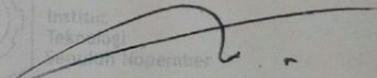
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I


17/07/18

Dosen Pembimbing II



Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D
NIP. 197311192000031001

Dr. Ir. Soedibyo., M.MT
NIP. 195512071980031004



**SURABAYA
JULI, 2018**

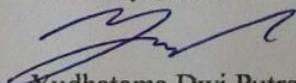
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**PENGURANGAN ARUS INRUSH PADA CAPACITOR BANK MENGGUNAKAN METODE SOFT SWITCHING**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018


Yudhatama Dwi Putra
07111440000075

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENGURANGAN ARUS *INRUSH* PADA *CAPACITOR BANK* MENGGUNAKAN METODE *SOFT SWITCHING*

Nama mahasiswa : Yudhatama Dwi Putra
Dosen Pembimbing I : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

Abstrak:

Dalam sistem kelistrikan industri sering dijumpai berbagai masalah kelistrikan. Salah satunya adalah faktor daya yang rendah (di bawah 0,85). Faktor daya yang rendah diakibatkan karena beban induktif seperti beban motor tiga fasa. Untuk mengatasi masalah ini, pada umumnya industri memasang *capacitor bank* untuk menaikkan faktor daya agar sesuai standard PLN yaitu di atas 0,85. Namun dalam memasang *capacitor bank*, sering menimbulkan masalah yaitu timbulnya arus *inrush*. Umumnya pada peralatan yang sudah ada digunakan reaktor untuk mengurangi arus *inrush*. Namun pemasangan reaktor ini sering dihindari karena dapat mengakibatkan terjadinya resonansi. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah metode untuk menghubungkan *capacitor bank* ke sistem yang dapat mengurangi timbulnya arus *inrush*. Metode *soft switching* adalah metode yang tepat untuk mengatasi masalah ini. *Capacitor bank* terpasang paralel dengan beban induktif. Sebagai saklar penyalaaan digunakan TRIAC agar dapat dikontrol waktu penyalaaannya. Dengan metode *soft switching*, waktu penyalaaan *capacitor bank* diatur agar tepat saat tegangan *capacitor bank* sama dengan tegangan sistem. Metode ini yang membuat arus *inrush* berkurang saat *capacitor bank* akan dihubungkan ke sistem kelistrikan industri. Arus *inrush* yang dapat dikurangi dapat mendekati 100% dari arus *inrush* yang terjadi. Sehingga metode ini sangat tepat untuk diaplikasikan dan dikembangkan untuk mendukung sistem kelistrikan industri.

Kata kunci: *Arus Inrush, Capacitor Bank, Soft Switching, TRIAC*

Halaman ini sengaja dikosongkan

REDUCTION OF INRUSH CURRENT IN CAPACITOR BANK USING SOFT SWITCHING METHOD

Student Name : Yudhatama Dwi Putra
Supervisor I : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Supervisor II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

Abstract:

. In industrial electric system, there are some problems about electricity. One of them is about low power factor (under 0,85). Low power factor is caused inductive load as three phase motor load. To resolve this problem, generally industrial are using capacitor bank to raise up power factor as PLN standard, it is up to 0,85. But if we want to use capacitor bank, there are some problems, one of them is inrush current. Generally in industry that using now, it use reactor to reduce the inrush current. But this method often avoided because it can cause resonance. So we need a method for connecting capacitor bank to system that can reduce inrush current. Soft Switching method is appropriate method to resolve this problem. Capacitor bank are connected parallel with inductive load. As turn on switching, we use TRIAC because we can control time of switching. With soft switching method, time switching of capacitor bank are controlled when capacitor voltage value same as with voltage system. This method can make inrush current reduce when capacitor bank are connected to industrial electric system. Inrush current that can be reduced until 100% from inrush current that happen. So this method can be applied and developed to support industrial electric system.

Key Word: *Capacitor Bank, Inrush Current, Soft Switching, TRIAC*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“PENGURANGAN ARUS *INRUSH* PADA *CAPACITOR BANK* MENGGUNAKAN METODE *SOFT SWITCHING*”**.

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

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu, Bapak dan Kakak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Dedet dan Bapak Dibyo selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Teman-teman keluarga Laboratorium Konversi Energi Listrik 2014 yang telah memberi dukungan dan banyak membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir.
6. Teman saya Badrut, Mas Ridwan dan Mas Firyal yang sudah membantu kelancaran tugas akhir saya.
7. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, Juli 2018

Yudhatama Dwi Putra

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	v
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Permasalahan	1
1. 3 Tujuan.....	2
1. 4 Batasan Masalah	2
1. 5 Metodologi	2
1. 6 Sistematika Penulisan.....	4
1. 7 Relevansi	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Kualitas Daya.....	7
2.2 <i>Power Factor Controlled (PFC)</i>	8
2.3 <i>Capacitor Bank</i>	10
2.4 Arus <i>Inrush</i>	12
2.5 TRIAC.....	13
2.6 <i>Zero Crossing Detector</i>	15
2.7 Komparator Analog Arduino	16
2.8 Rangkaian SR Flip Flop	17
2.9 <i>Soft Switching</i> Dengan TRIAC	19
BAB 3 PERANCANGAN DAN PEMODELAN.....	21
3.1 Simulasi	21
3.1.1 Simulasi Tanpa <i>Soft Switching</i>	22
3.1.2 Simulasi Dengan <i>Soft Switching</i>	24
3.2 Implementasi	27
3.2.1 Rangkaian Sensor Tegangan	28
3.2.2 Rangkaian Komparator Analog Arduino	29
3.2.3 Rangkaian <i>Latching</i>	30
3.2.4 Penentuan Nilai <i>Capacitor Bank</i>	32
3.2.5 Rangkaian <i>Soft Switching</i> Dengan TRIAC	33
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS.....	37
4.1 Pengujian Tanpa <i>Soft Switching</i>	38
4.2 Pengujian Dengan <i>Soft Switching</i>	39
4.2.1 Pengujian Sensor Tegangan	40

4.2.2 Pengujian Komparator Analog Arduino	40
4.2.3 Pengujian Rangkaian <i>Latching</i>	41
4.2.4 Pengujian Arus <i>Inrush</i>	42
BAB 5 KESIMPULAN	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA.....	47
LAMPIRAN.....	49
BIODATA PENULIS.....	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Letak Pemasangan <i>Capacitor Bank</i>	8
Gambar 2.2 Bentuk Arus <i>Inrush</i>	9
Gambar 2.3 Pemasangan <i>Air Coil</i> Pada <i>Capacitor Bank</i>	9
Gambar 2.4 <i>Capacitor Bank</i> Terhubung Delta (A) dan Bintang (B).....	12
Gambar 2.6 Kurva Karakteristik Arus – Tegangan Pada TRIAC	14
Gambar 2.7 Cara Kerja TRIAC Sebagai Saklar	14
Gambar 2.8 Rangkaian <i>Zero Crossing Detector</i>	15
Gambar 2.9 Gelombang Keluaran <i>Zero Crossing Detector</i>	16
Gambar 2.10 Blok Diagram Komparator Analog Arduino.....	16
Gambar 2.11 SR Flip Flop Dengan Gerbang Logika NOR	18
Gambar 2.12 SR Flip Flop Dengan Gerbang Logika NAND	18
Gambar 2.13 Rangkaian <i>Soft Switching</i> Menggunakan TRIAC	19
Gambar 3.1 Rangkaian <i>Soft Switching Capacitor Bank</i>	22
Gambar 3.2 Tegangan <i>Capacitor Bank</i> Tanpa <i>Soft Switching</i>	22
Gambar 3.3 Arus <i>Inrush Capacitor Bank</i> Tanpa <i>Soft Switching</i>	23
Gambar 3.4 Tegangan Sistem dan Tegangan <i>Capacitor Bank</i>	24
Gambar 3.5 Sinyal Keluaran Komparator.....	25
Gambar 3.6 Tegangan <i>Capacitor Bank</i> Dengan <i>Soft Switching</i>	25
Gambar 3.7 Arus <i>Capacitor Bank</i> Dengan <i>Soft Switching</i>	26
Gambar 3.8 Blok Diagram Rangkaian Pengurangan Arus <i>Inrush</i> Pada <i>Capacitor Bank</i> Menggunakan Metode <i>Soft Switching</i> ..	27
Gambar 3.9 Rangkaian Sensor Tegangan	28
Gambar 3.10 Blok Diagram Komparator Analog Arduino.....	29
Gambar 3.11 Flowchart Pengaktifan Komparator Analog.....	30
Gambar 3.12 Rangkaian <i>Latching</i> Dengan IC NAND	31
Gambar 3.13 Diagram Waktu SR Flip Flop	31
Gambar 3.14 Nilai Pengukuran Faktor Daya, Daya Aktif dan Daya Reaktif Beban Induktif.....	32
Gambar 3.15 <i>Capacitor Bank</i>	33
Gambar 3.16 Rangkaian <i>Soft Switching</i> Dengan TRIAC	34
Gambar 3.17 Rangkaian Implementasi <i>Soft Switching Capacitor Bank</i> 35	
Gambar 4.1 Pengujian Alat Tugas Akhir	37
Gambar 4.2 Hasil Pengujian Tanpa <i>Soft Switching</i>	39
Gambar 4.3 Sinyal Hasil Sensor Tegangan.....	40
Gambar 4.4 Sinyal Komparator Analog Dengan Mode <i>Interrupt</i>	41
Gambar 4.5 Sinyal Keluaran Rangkaian <i>Latching</i>	42
Gambar 4.6 Hasil Pengujian Dengan <i>Soft Switching</i>	43

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Tegangan <i>Line – Line</i> dan <i>Line – Netral</i>	12
Tabel 2.2 Tabel Mode <i>Interrupt</i>	17
Tabel 2.3 <i>Truth Tabel</i> SR Flip Flop.....	18

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam sistem kelistrikan industri seperti garmen, pupuk, semen, dll, dibutuhkan mesin – mesin seperti motor untuk membantu produksi sebuah industri. Mesin – mesin motor membutuhkan daya reaktif untuk membangkitkan medan magnet agar dapat berputar. Hal ini akan mengakibatkan faktor daya pada sistem kelistrikan menjadi rendah (di bawah 0,85). Faktor daya yang rendah akan sangat merugikan industri, karena selain harus membayar penggunaan daya aktif (kWh), industri harus membayar penggunaan daya reaktif (kVARh) juga. Sehingga apabila penggunaan daya reaktif semakin besar, maka biaya yang harus ditanggung oleh industri juga semakin besar. Oleh karena itu, tindakan yang dilakukan umumnya adalah dengan memasang *capacitor bank* pada mesin – mesin motor untuk menaikkan faktor daya sekaligus untuk mengurangi biaya pemakaian daya reaktif [1].

Dalam memasang *capacitor bank*, akan menimbulkan masalah. *Capacitor bank* akan menyebabkan timbulnya arus *inrush* akibat penyaklaran *capacitor bank*. Solusi yang digunakan biasanya adalah dengan menambahkan reaktor untuk mengurangi arus *inrush* selama penyaklaran. Namun kombinasi antara *capacitor bank* dengan reaktor akan menyebabkan timbulnya resonansi [2]. Sehingga metode ini biasanya dihindarkan. Sesuai dengan IEC 70, arus *inrush* maksimal yang diijinkan adalah 100 kali nilai arus rms *capacitor bank* [3]. Namun arus *inrush* yang terjadi dapat mencapai 200 kali nilai arus rms *capacitor bank*. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah metode untuk mengurangi timbulnya arus *inrush* saat penyaklaran *capacitor bank*. Metode *soft switching* merupakan metode yang tepat untuk digunakan dalam mengurangi timbulnya arus *inrush* saat penyaklaran *capacitor bank*.

1.2 Permasalahan

Dengan menggunakan metode *soft switching*, digunakan TRIAC sebagai saklar penyalan agar dapat diatur waktu yang tepat untuk memasang *capacitor bank* ke sistem. Untuk menentukan waktu yang tepat, digunakan sinyal dari tegangan sistem yang dimasukkan ke komparator sehingga menghasilkan sinyal digital yang merepresentasikan

nilai tegangan sistem sama dengan nilai tegangan *capacitor bank*. Saat *capacitor bank* dilepas dari sistem, *capacitor bank* akan *discharge* dan akan mengalami penurunan tegangan apabila terhubung dengan resistor. Saat *capacitor bank* akan dipasang ke sistem, harus tepat saat tegangan kapasitor memiliki tegangan yang sama dengan nilai tegangan sistem. Dengan begitu, arus *inrush* yang timbul akan berkurang.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Mendesain dan mengimplementasikan *soft switching capacitor bank* yang terpasang paralel dengan beban induktif
2. Menemukan waktu penyalan yang tepat bagi TRIAC agar arus *inrush* pada *capacitor bank* dapat berkurang
3. Membandingkan nilai arus *inrush* yang timbul saat menggunakan metode *soft switching* dan tanpa metode *soft switching*

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Simulasi menggunakan *software Power Simulator (PSIM)*
2. Penelitian ini menggunakan aplikasi tegangan rendah (*low voltage*)
3. Implementasi digunakan pada aplikasi 1 fasa
4. Penelitian ini tidak menyangkut *Automatic Controlled Power Factor Correction*

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi pustaka
Memahami latar belakang masalah mengapa dapat timbul arus *inrush* saat *capacitor bank* diaktifkan dengan sistem. Mempelajari konsep *soft switching*. Memahami bagaimana karakteristik dari TRIAC sebagai saklar penyalan dan bagaimana metode untuk mematikan TRIAC. TRIAC membutuhkan sinyal *trigger* untuk diaktifkan dan dimatikan. Serta mempelajari bagaimana konsep rangkaian komparator pada arduino agar dapat menghasilkan sinyal *zero crossing* yang diinginkan.

2. Simulasi

Mensimulasikan rangkaian *soft switching capacitor bank* pada *software Power Simulator*. Dengan simulasi dapat dimengerti konsep kerja dari *soft switching*. Mulai dari proses terbentuknya sinyal digital hasil keluaran komparator hingga bentuk arus dan tegangan yang timbul saat menggunakan *soft switching* dan tanpa *soft switching*. Saat simulasi pula dapat dicari waktu yang tepat untuk mengaktifkan TRIAC. Selain itu dengan simulasi pula dapat menentukan nilai dan jenis komponen yang akan digunakan.

3. Implementasi Alat

Mengimplementasikan rangkaian yang telah disimulasikan. Tahap pertama adalah membuat rangkaian yang menghubungkan sumber ke beban induktif. Dari rangkaian ini kita dapat mengetahui berapa besar arus, daya aktif, daya reaktif dan faktor daya. Setelah itu, tegangan sistem akan masuk ke rangkaian sensor tegangan untuk menghasilkan sinyal *zero crossing*. Dengan menggunakan komparator analog arduino, kita dapat mengetahui posisi *zero crossing*. Selanjutnya agar *trigger* TRIAC dapat aktif secara berkelanjutan, digunakan rangkaian *latching* dengan tombol *push button* sebagai kontrolnya. Langkah selanjutnya yaitu ditambahkan rangkaian *capacitor bank* yang terpasang secara paralel dengan beban dengan TRIAC sebagai saklar penyalanya.

4. Pengujian

Pada tahap ini dilakukan pengujian terhadap setiap bagian. Dimulai dari rangkaian sensor tegangan. Dengan menggunakan osiloskop kita dapat mengamati sinyal digital yang terbentuk dari tegangan sistem. Kemudian pengujian komparator analog dengan arduino. Dengan osiloskop dapat diamati sinyal keluaran komparator analog setelah di *interrupt* pada posisi *rising*. Dan dengan menggunakan osiloskop pula kita dapat mengamati bentuk *trigger* bagi TRIAC yang merupakan hasil dari keluaran rangkaian *latching*. Kita dapat melihat apakah sudah tepat dengan titik *zero crossingnya* atau belum. Selanjutnya mengamati arus *inrush* yang timbul saat menggunakan *soft switching* dan tanpa *soft switching* dengan menggunakan osiloskop dan *probe clamp* untuk melihat bentuk gelombang arus yang timbul.

5. Analisis Data
Menganalisa hasil pengujian mulai dari nilai *capacitor bank* yang dibutuhkan, tegangan keluaran komparator dan bentuk tegangan *trigger* untuk mengaktifkan TRIAC. Menganalisa hasil *soft switching capacitor bank*. Membandingkan bagaimana nilai arus *inrush capacitor bank* yang timbul antara menggunakan metode *soft switching* dan tanpa metode *soft switching*.
6. Kesimpulan
Pada akhir perancangan akan ditarik kesimpulan berdasarkan analisa yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

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

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka

Merupakan dasar teori mengenai hal-hal yang berkaitan dengan pengurangan arus *inrush* pada *capacitor bank* menggunakan metode *soft switching*. Pertama memahami terlebih dahulu konsep sistem kelistrikan industri dengan beban induktif, kemudian peralatan yang digunakan saat ini untuk memperbaiki faktor daya hingga metode yang tepat untuk mengurangi arus *inrush*. Beberapa hal yang akan dibahas untuk menunjang metode *soft switching* yaitu *capacitor bank*, arus *inrush*, karakteristik TRIAC, rangkaian zero crossing detector, rangkaian SR Flip Flop, arduino, komparator analog arduino dan rangkaian *soft switching* dengan TRIAC.

Bab 3 : Perancangan dan Pemodelan

Pada bab ini akan dibahas mengenai perancangan *soft switching capacitor bank* agar dapat mengurangi timbulnya arus *inrush*. Dimulai dari simulasi untuk mengetahui konsep dari *soft switching* yang diinginkan, perancangan rangkaian sensor tegangan dan komparator analog arduino, rangkaian *latching*, penentuan nilai *capacitor bank* yang akan

digunakan, rangkaian *soft switching* dengan TRIAC dan hasil implemenstasi.

Bab 4 : Pengujian dan Analisis

Bab 4 berisikan pengujian dan analisis data terhadap hasil pengujian pengurangan arus *inrush* pada *capacitor bank* menggunakan metode *soft switching*. Mulai dari pegujian rangkaian sensor tegangan, kemudian pengujian program komparator analog dengan arduino dan yang terakhir pengujian arus *inrush* dengan *soft switching* dan tanpa *soft switching*.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1. 7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari pelaksanaan penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat, antara lain:

1. Menjadi referensi penunjang bagi kelistrikan industri dalam memperbaiki faktor daya pada beban induktif
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan mengerjakan penelitian yang berkaitan dengan metode *soft switching*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

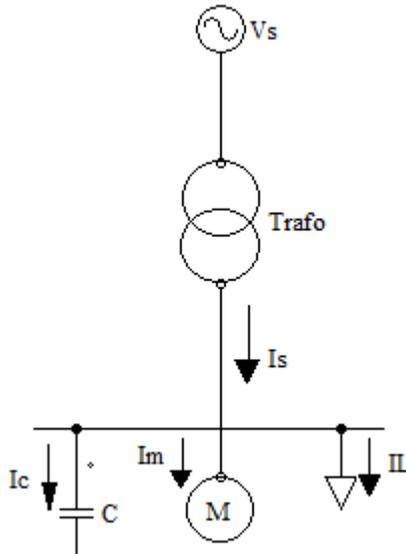
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kualitas Daya

Dalam daya listrik, terdapat 3 jenis daya yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya total. Daya aktif adalah daya yang biasa digunakan untuk menggerakkan sebuah beban atau daya yang secara nyata dapat dilihat bentuknya. Daya reaktif adalah daya yang digunakan untuk proses magnetisasi pada beban mesin listrik. Sedangkan daya total adalah daya keseluruhan antara daya aktif dan daya reaktif. Pada rumah tangga, tagihan listrik yang dibayar hanyalah daya aktif (kWh). Namun pada industri, tagihan listrik yang dibayar adalah daya aktif (kWh) dan daya reaktif (kVARh).

Pada sistem kelistrikan industri banyak yang menggunakan beban motor untuk mendukung proses produksi pabrik. Kapasitas beban motor yang digunakan mencapai kapasitas yang sangat besar sehingga industri seringkali menggunakan sistem kelistrikan khusus. Beban motor membutuhkan daya reaktif untuk membangkitkan medan listrik sehingga bersifat induktif. Hal ini menyebabkan menjadi rendahnya faktor daya (kurang dari 0,85). Merupakan sebuah kerugian bagi industri apabila faktor daya berada di bawah 0,85 karena dapat dikenakan denda oleh regulator. Oleh karena itu biasanya untuk mengatasi rendahnya faktor daya, dipasanglah *capacitor bank* untuk menaikkan faktor daya sehingga industri akan aman dari denda.

Sistem jaringan kelistrikan dengan beban induktif akan mengakibatkan arus beban tertinggal (*lagging*) dengan tegangan sumber. Arus beban terdiri dari komponen induktif dan komponen resistif yang sefasa dengan sumber tegangan. Dengan ditambahkannya *capacitor bank* akan membuat arus beban menjadi mendahului (*leading*) sehingga akan saling menghilangkan dengan arus beban induktif. Dengan begitu arus beban akan menjadi sefasa dengan sumber tegangan dan faktor daya akan sama dengan atau mendekati 1. *Capacitor bank* akan terpasang paralel dengan beban induktif dan sumber tegangan. Peralatan yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya sering disebut dengan *Power Factor Controlled* (PFC) [4]. Pada gambar 2.1 memperlihatkan letak terpasangnya *capacitor bank* pada sistem kelistrikan beban induktif.



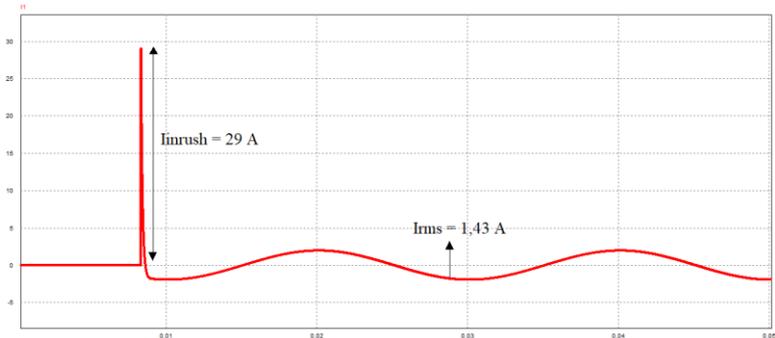
Gambar 2.1 Letak Pemasangan Capacitor Bank

2.2 Power Factor Controlled (PFC)

Capacitor bank secara umum bekerja dengan dikontrol oleh *Power Factor Controlled* (PFC). Prinsip kerja dari *Power Factor Controlled* adalah dengan mengaktifkan *capacitor bank* secara *step by step*. Banyak *step capacitor bank* umumnya sebanyak 6 sampai 12 *step*. Semakin banyak *step* yang dilakukan maka akan semakin banyak pula proses *switching* yang dilakukan. Frekuensi *switching* akan menyebabkan terjadinya *oscillatory transient* akibat arus *switching capacitor bank* yang sering disebut sebagai arus *inrush*.

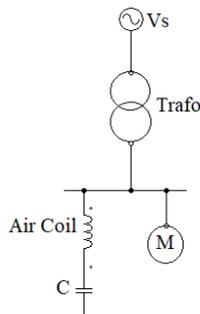
Arus *inrush* yang timbul apabila *capacitor bank single* bisa mencapai 20 hingga 40 kali nilai arus nominal kapasitor. Sedangkan apabila *capacitor bank* yang terpasang paralel (terhubung bintang atau delta) dapat menghasilkan arus *inrush* sebesar 200 hingga 250 kali dari nilai arus nominal kapasitor [4]. Padahal sesuai dengan IEC 70, arus *inrush* yang diijinkan maksimal adalah 100 kali nilai arus nominal kapasitor [3]. Terjadinya arus *inrush* ini akan berpengaruh terhadap tegangan sistem. Tegangan akan mengalami gangguan yang berakibat

pada terjadinya *drop* tegangan atau adanya *noise* pada gelombang tegangan. Tegangan yang mengalami gangguan ini akan menyebabkan kerusakan pada peralatan yang dapat berakibat pada terjadinya *production stop*. Gambar 2.2 menggambarkan bentuk arus *inrush*.



Gambar 2.2 Bentuk Arus *Inrush*

Ada beberapa teknik untuk mengurangi timbulnya arus *inrush*. Teknik yang umum digunakan adalah memasang *air coil* pada kontaktor seperti pada gambar 2.3. *Air coil* ini bisa berupa *damping* resistor atau sebuah reaktor. *Air coil* biasanya berupa lilitan kabel yang terpasang seri. Banyak lilitan biasanya sebanyak 8 lilitan. Dengan ditambahkan lilitan ini diharapkan dapat memperbesar nilai induktansi sehingga akan mengakibatkan semakin kecilnya arus *inrush* yang terjadi [4].



Gambar 2.3 Pemasangan *Air Coil* Pada *Capacitor Bank*

Selain menggunakan *air coil* untuk mengurangi timbulnya arus *inrush*, terdapat sebuah metode yang lebih efektif dan efisien yaitu metode *soft switching*. Metode ini lebih baik dikarenakan tidak adanya hubungan kapasitif dan induktif yang dapat menyebabkan terjadinya resonansi. Dengan metode *soft switching*, *capacitor bank* akan diaktifkan tepat saat tegangan *capacitor bank* sama dengan nilai tegangan sistem. Untuk menggunakan metode *soft switching*, hal pertama yang dibutuhkan adalah sensor tegangan untuk mendeteksi tegangan sistem dan tegangan *capacitor bank* agar dapat diketahui titik dimana nilai tegangan sistem sama dengan nilai tegangan *capacitor bank*. Sensor tegangan ini menggunakan prinsip kerja dari *Zero Crossing Detector*. Sebagai saklar penyalanya digunakan TRIAC agar dapat dikontrol sudut penyalanya.

2.3 Capacitor Bank

Capacitor bank adalah kapasitor yang terhubung sedemikian rupa dan dikendalikan oleh saklar untuk dihubungkan dalam sebuah sistem atau rangkaian listrik untuk menyuplai daya reaktif. Umumnya, *capacitor bank* digunakan untuk memperbaiki faktor daya pada sebuah beban industri seperti motor, untuk mengurangi rugi-rugi, serta untuk memperbaiki kualitas tegangan pada sebuah sistem kelistrikan.

Capacitor bank layaknya kapasitor biasa, namun dapat beroperasi pada *rating* tegangan yang lebih besar. Kapasitor terdiri dari 2 plat yang memiliki gap antara 2 plat tersebut. Plat kapasitor terbuat dari aluminium foil, sedangkan gap terbuat dari udara, keramik atau kertas [5].

Saat dalam kondisi *charge*, *capacitor bank* akan terhubung dengan sumber tegangan. Dalam kondisi ini, kapasitor akan menyimpan tegangan sehingga apabila di *discharge* dan tidak terhubung dengan beban, kapasitor akan dalam keadaan bertegangan. Apabila ingin di *discharge* maka perlu dihubungkan dengan beban. Saat dalam kondisi kosong dan kemudian kapasitor dihubungkan dengan sumber tegangan maka akan mengalir arus yang besarnya dapat ditulis pada rumus di bawah ini:

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

Dimana:

I = Arus pada kapasitor (A)

C = Kapasitansi kapasitor (F)

dV = perbedaan tegangan antara 2 plat (V)
 dt = perubahan waktu

Sumber daya aktif dan reaktif adalah generator. Namun generator memiliki keterbatasan dalam menyuplai daya reaktif, sehingga dibutuhkan *capacitor bank* sebagai penyuplai daya reaktif. Besarnya daya reaktif yang dihasilkan oleh capacitor bank dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = V^2 \times 2\pi \times f \times C \quad (2.2)$$

Dimana:

Q = besar daya reaktif yang dihasilkan (VAR)
 V = tegangan antar fasa sistem (Volt)
 f = frekuensi sistem (Hz)
 C = nilai kapasitor (Farad)

Kapasitas *capacitor bank* sebagai penyuplai daya reaktif untuk perbaikan faktor daya dapat dihitung dengan rumus :

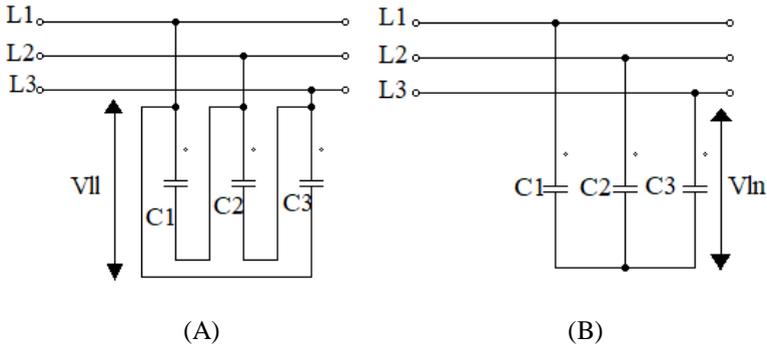
$$Q = P (\tan \Theta_1 - \tan \Theta_2) \quad (2.3)$$

Dimana:

Q = besar daya reaktif yang dibutuhkan (VAR)
 P = besar daya aktif yang dibutuhkan beban (Watt)
 Θ_1 = besar sudut pada faktor daya lama
 Θ_2 = besar sudut pada faktor daya yang diinginkan

Dalam pemasangannya, *capacitor bank* dapat terhubung delta (Δ) dan bintang (Y) pada sistem 3 fasa. Namun umumnya hubungan delta (Δ) lebih banyak digunakan dibandingkan hubungan bintang (Y). Hal ini dikarenakan pada hubungan delta (Δ) jika dilihat dari bentuk rangkaian pada gambar 2.4 yang dilihat adalah tegangan *line to line* (Vll), sedangkan pada hubungan bintang (Y) yang dilihat adalah tegangan *line to netral* (Vln). Berdasarkan rumus persamaan 2.2 dimana besarnya daya reaktif yang dihasilkan oleh *capacitor bank* akan lebih besar bila *capacitor bank* terhubung delta (Δ) dikarenakan pada konstanta tegangan yang digunakan pada hubungan delta (Δ) adalah tegangan *line to line* (Vll), sedangkan pada hubungan bintang yang digunakan adalah tegangan *line to netral* (Vln). Perbandingan tegangan *line to line* dengan *line to netral* pada hubungan bintang (Y) dan delta (Δ) dapat dilihat ditabel 2.1. Sehingga hal ini akan berpengaruh pada nilai *capacitor bank* yang digunakan. Dengan menggunakan hubungan delta (Δ), daya reaktif yang dihasilkan dengan

nilai *capacitor bank* yang sama dengan hubungan bintang (Y) akan lebih besar.



Gambar 2.4 *Capacitor Bank* Terhubung Delta (A) dan Bintang (B)

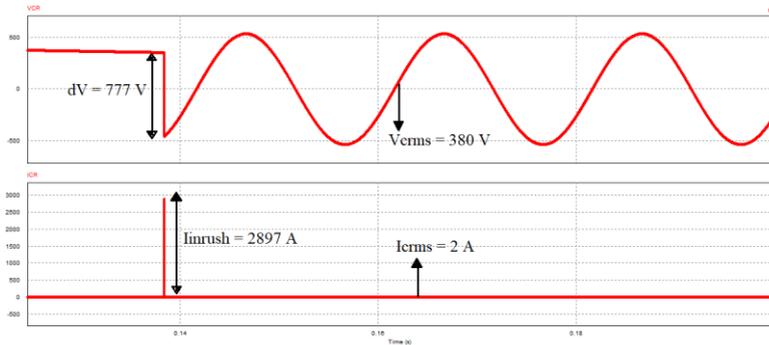
Tabel 2.1 Perbandingan Tegangan *Line – Line* dan *Line – Netral*

Delta (Δ)	Bintang (Y)
$V_{ll} = V_{ln}$	$V_{ll} = \sqrt{3} V_{ln}$

2.4 Arus *Inrush*

Arus *inrush* adalah arus lonjakan yang pertama kali muncul saat rangkaian terhubung ke beban. Biasanya arus *inrush* terjadi pada operasi pemasangan dan pelepasan sebuah sistem saklar. Arus *inrush* sering diartikan pula sebagai kondisi arus *transient* dimana kondisi ini biasa terjadi saat operasi penyaklaran beban pada rangkaian listrik. Beban listrik yang dapat menimbulkan arus *inrush* adalah beban – beban berkapasitas besar atau beban yang mengkonsumsi daya listrik yang besar seperti motor. Arus *inrush* terjadi saat saklar ditutup dan lama waktu terjadinya hanya dalam waktu yang sangat singkat yaitu skala mikrodetik sampai milidetik [3]. Pada *capacitor bank* tunggal, arus *inrush* yang terjadi dapat mencapai 20 hingga 40 kali nilai arus nominalnya. Sedangkan saat terpasang delta (Δ) atau bintang (Y), arus *inrush* yang terjadi dapat mencapai 200 hingga 250 kali nilai arus nominalnya [4]. Hal ini dikarenakan pada saat penyaklaran, terjadi perbedaan tegangan antar 2 plat *capacitor bank* sehingga sesuai dengan persamaan 2.1 semakin besar perbedaan tegangan antar plat (dV) maka arus *capacitor bank* akan

semakin besar pula. Gambar 2.5 merupakan arus *inrush* yang terjadi pada penyaklaran *capacitor bank* yang terhubung delta (Δ). Terlihat bahwa arus *inrush* yang terjadi sangat besar akibat perbedaan tegangan antar 2 plat *capacitor bank* yang sangat besar juga.

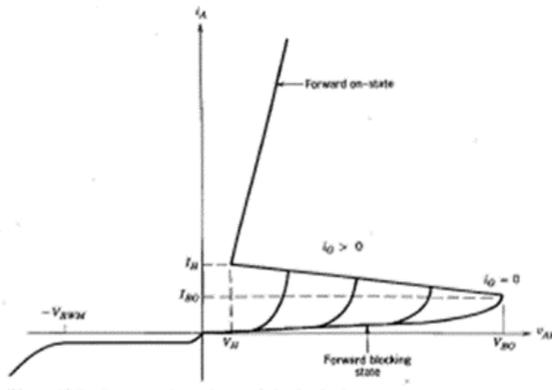


Gambar 2.5 Arus *Inrush* Yang Terjadi Pada Penyaklaran *Capacitor Bank*

2.5 TRIAC

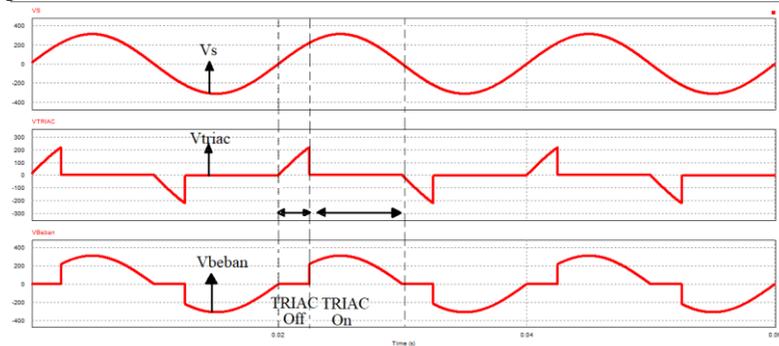
TRIAC atau biasa disebut juga *Triode for Alternating Current* adalah sebuah saklar semikonduktor yang ekuivalen dengan dua thyristor. TRIAC disambungkan secara antiparalel dan kaki *gatenya* dijadikan satu. TRIAC memiliki nama resmi yaitu *Bidirectional Triode Thyristor*. TRIAC memiliki cara mematikan yang sama dengan thyristor. Yaitu apabila tegangan katoda lebih besar dari anoda maka TRIAC akan mati. Jika ingin diaktifkan, syaratnya adalah tegangan anoda harus lebih besar dari katoda. *Low-current* TRIAC dapat menahan sampai arus 1 ampere dengan tegangan maksimal mencapai ratusan volt. Sedangkan *medium-current* TRIAC dapat menahan hingga 40 ampere dengan tegangan mencapai 1000 volt.

Prinsip kerja dari TRIAC mirip dengan thyristor. TRIAC akan aktif apabila tegangan anoda lebih besar daripada tegangan katoda dan thyristor akan padam apabila tegangan katoda lebih besar daripada tegangan anoda. Melalui terminal *gate*, arus *trigger* (I_G) akan diberikan ke TRIAC. Dengan memberikan arus *trigger* yang semakin besar akan membuat tegangan *breakover* (V_{BO}) TRIAC menjadi semakin menurun. Tegangan ini adalah tegangan minimum untuk membuat TRIAC menjadi aktif. Sampai pada nilai arus *trigger* tertentu, akan membuat TRIAC menjadi aktif.



Gambar 2.6 Kurva Karakteristik Arus – Tegangan Pada TRIAC [6]

Cara untuk memadamkan TRIAC adalah membuat agar tegangan katoda lebih besar dari tegangan anoda. Arus yang melewati anoda – katoda harus turun sampai dibawah *holding current* (I_H). Setelah arus *forward* telah berada di bawah *holding current*, maka TRIAC akan padam.



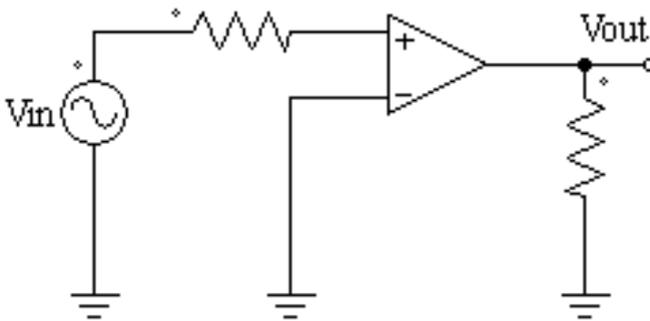
Gambar 2.7 Cara Kerja TRIAC Sebagai Saklar

Cara kerja TRIAC sebagai saklar adalah ketika TRIAC diberi trigger untuk aktif, maka TRIAC akan short sehingga akan ada arus yang mengalir dan tidak ada tegangan pada TRIAC. Dengan mengalirnya arus pada TRIAC akan menimbulkan tegangan pada sisi beban. Pada gambar 2.7 adalah bentuk gelombang tegangan pada TRIAC yang aktif dan

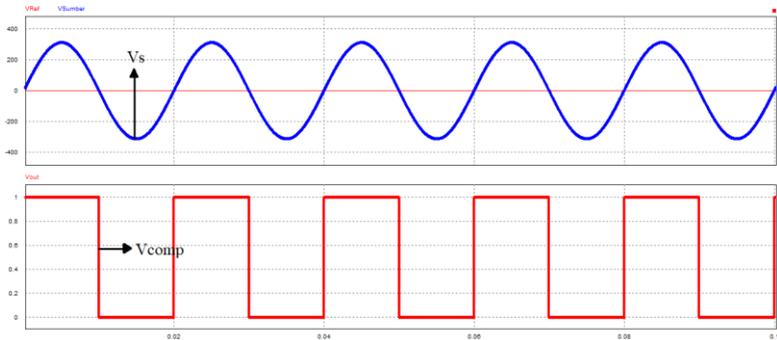
gelombang tegangan yang terbentuk pada sisi beban. Terlihat bahwa bentuk gelombang tegangan pada TRIAC dan gelombang tegangan pada beban akan saling berlawanan.

2.6 Zero Crossing Detector

Rangkaian *zero crossing detector* bertujuan untuk mengetahui titik dimana TRIAC akan diaktifkan. Pada sinyal hasil output komparator, digunakan prinsip pembangkitan sinyal seperti *pulse width modulation* (PWM) namun menggunakan sinyal sinusoidal sebagai pengganti sinyal segitiga. Karena ingin mendeteksi sinyal saat bernilai 0 volt, maka sinyal referensi yang digunakan adalah *ground*. Sinyal yang akan dihasilkan adalah sinyal digital yang merepresentasikan nilai tegangan masukan sama dengan 0 volt maka tegangan persegi akan naik atau turun. Rangkaian komparator ini menggunakan prinsip kerja dari *Non Inverting Zero Crossing Detector* (NIZCD), sehingga apabila tegangan masukan lebih tinggi dari tegangan referensi maka sinyal yang keluar akan *high*, begitu juga sebaliknya jika tegangan masukan lebih rendah dari tegangan referensi maka sinyal yang keluar adalah *low*. Rangkaian dasar komparator ditunjukkan pada gambar 2.8 dan bentuk gelombang hasil komparator ditunjukkan pada gambar 2.9.



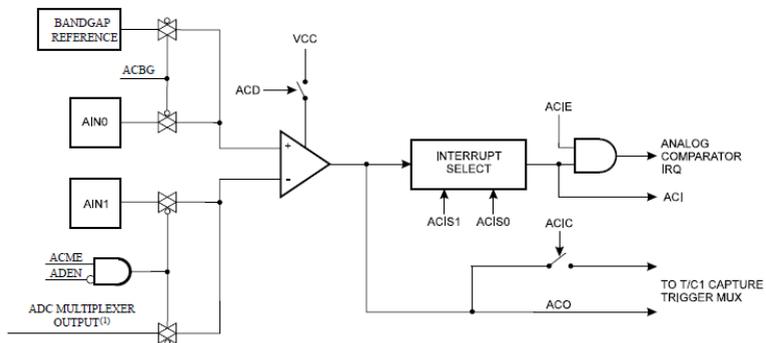
Gambar 2.8 Rangkaian *Zero Crossing Detector*



Gambar 2.9 Gelombang Keluaran *Zero Crossing Detector*

2.7 Komparator Analog Arduino

Komparator analog adalah salah satu aplikasi pada arduino untuk mendeteksi kondisi sebuah gelombang. Komparator analog membandingkan tegangan masukan dari pin positif AIN0 dengan pin negatif AIN1. Apabila tegangan AIN0 lebih besar dari tegangan AIN1, maka keluaran komparator analog (ACO) akan aktif. Keluaran komparator analog ini dapat diaktifkan dengan menggunakan *timer* atau *interrupt*. Keluaran komparator analog dapat diatur akan aktif saat kondisi tegangan masukan *rising*, *falling* atau keduanya [7]. Blok diagram komparator analog Arduino dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Blok Diagram Komparator Analog Arduino [7]

Dalam mengaktifkan komparator analog arduino, ada beberapa *register* yang harus diaktifkan. Umumnya untuk mengaktifkan *register* pada komparator analog harus diberi nilai 0. Macam – macam *register* pada komparator analog arduino:

1. ACD (*Analog Comparator Disable*) adalah *register* untuk mengaktifkan komparator analog. Jika ACD diberi logika 1 maka komparator analog tidak akan aktif
2. ACO (*Analog Comparator Output*) adalah *register* untuk mengaktifkan keluaran komparator analog. Secara otomatis keluaran komparator analog akan langsung terhubung dengan ACO. Namun untuk mengamati hasil keluarannya perlu diumpankan ke salah satu pin.
3. ACIE (*Analog Comparator Interrupt Enable*) adalah *register* untuk mengaktifkan mode *interrupt*. Dengan diaktifkannya mode *interrupt* ini akan membuat semua program berhenti, hanya mode *interrupt* yang berjalan. Untuk mengaktifkan mode *interrupt* perlu diberi logika 1. Mode *interrupt* dapat diatur pengaktifannya yaitu pada saat *rising*, *falling* atau keduanya.
4. ACIS (*Analog Comparator Interrupt Select*) adalah *register* untuk mengatur kapan waktu *interrupt* aktif. Terdapat dua mode ACIS yaitu ACIS1 dan ACIS0. Untuk mengontrol pengaktifan *interrupt*, ACIS1 dan ACIS0 perlu diberi logika seperti pada tabel 2.1 di bawah ini:

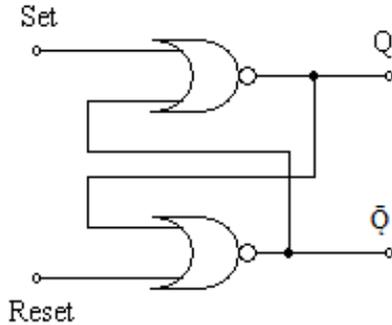
Tabel 2.2 Tabel Mode *Interrupt*

ACIS1	ACIS0	Mode <i>Interrupt</i>
0	0	Kedua Tepi
0	1	Reserved
1	0	Tepi <i>Falling</i>
1	1	Tepi <i>Rising</i>

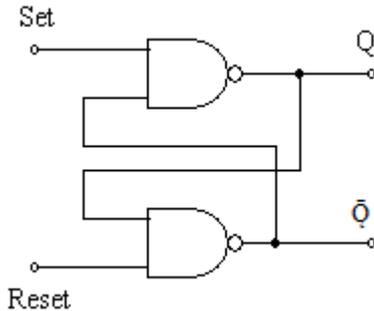
2.8 Rangkaian SR Flip Flop

Flip Flop adalah rangkaian elektronika digital yang digunakan untuk menyimpan sebuah nilai atau informasi dan memiliki dua kondisi stabil. SR Flip Flop menggunakan aplikasi dari gerbang logika. Informasi yang keluar akan berubah sesuai dengan *trigger* yang diberikan. SR Flip Flop memiliki dua masukan dan dua keluaran. Dua masukan ini berupa *Set* dan *Reset*. Sedangkan 2 keluaran yaitu Q dan \bar{Q} (Q-bar) yang memiliki

nilai keluaran yang saling berlawanan. SR Flip Flop dapat menggunakan gerbang logika NOR dan NAND. Namun yang umum digunakan adalah menggunakan gerbang logika NAND. Rangkaian SR Flip Flop dapat dilihat pada gambar 2.11 dan 2.12. Sedangkan *truth tabel* dari SR Flip Flop dapat dilihat pada tabel 2.3



Gambar 2.11 SR Flip Flop Dengan Gerbang Logika NOR



Gambar 2.12 SR Flip Flop Dengan Gerbang Logika NAND

Tabel 2.3 *Truth Tabel* SR Flip Flop

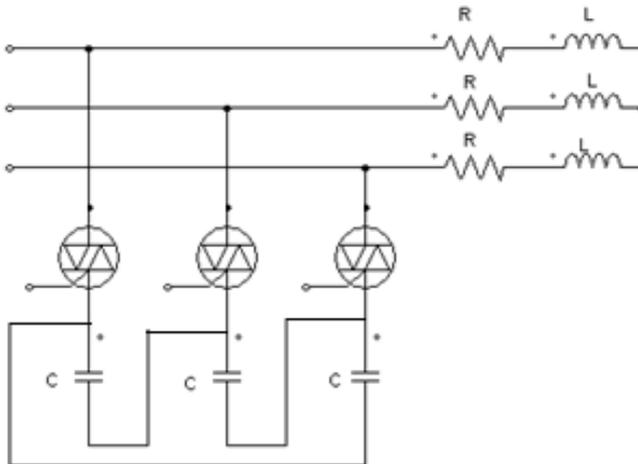
Set	Reset	Q
0	0	Tidak Berubah
1	0	1

Tabel 2.3 Truth Tabel SR Flip Flop (Lanjutan)

Set	Reset	Q
0	1	0
1	1	Tidak Berubah

2.9 Soft Switching Dengan TRIAC

Metode *soft switching* menggunakan TRIAC sebagai saklar penyalanya. Sebagai sinyal *triggernya*, digunakan tombol *push button* untuk mengatur waktu penyalanya. Tombol *push button* ini sebagai *reset* di rangkaian SR Flip Flop yang akan menyebabkan berubahnya nilai informasi pada keluaran SR Flip Flop (Q). Cara yang digunakan untuk mengurangi timbulnya arus *inrush* adalah dengan menyalakan TRIAC saat tegangan sistem bernilai 0 volt. Hal ini dikarenakan *capacitor bank* saat *discharge* akan terhubung dengan resistor sehingga tegangan *capacitor bank* yang semula *discharge* pada nilai puncak akan turun hingga 0 volt. Sinyal *zero crossing* keluaran komparator akan menjadi referensi penyalan TRIAC. Rangkaian *soft switching* dengan TRIAC digambarkan pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Rangkaian *Soft Switching* Menggunakan TRIAC

Halaman ini sengaja dikosongkan

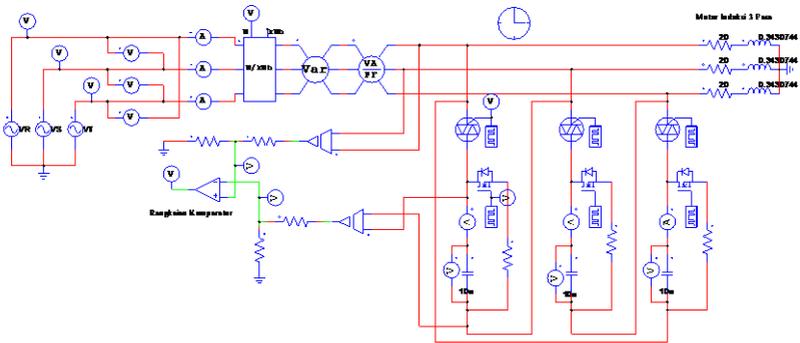
BAB 3

PERANCANGAN DAN PEMODELAN

Pada bab 3 akan dibahas mengenai desain rangkaian dan implementasi pengurangan arus *inrush* pada *capacitor bank* menggunakan metode *soft switching*. Terdapat dua bagian yang akan dibahas yaitu simulasi dan perencanaan implementasi. Pada simulasi digunakan *software Power Simulator* untuk memahami konsep *soft switching* yang diinginkan. Langkah – langkah yang harus dilakukan juga dapat diketahui lewat simulasi ini. Pada perencanaan implementasi, terdapat beberapa bagian yang akan dibahas yaitu meliputi perencanaan sensor tegangan, perencanaan komparator analog dengan arduino, perencanaan rangkaian *latching* dan perencanaan rangkaian *soft switching* menggunakan TRIAC.

3.1 Simulasi

Dalam merencanakan sebuah implementasi, langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan simulasi. Simulasi ini bertujuan untuk memahami konsep pengurangan arus *inrush* pada *capacitor bank* menggunakan metode *soft switching*. Pertama akan digunakan metode tanpa *soft switching* untuk mengetahui besar arus *inrush* yang terjadi, akan dibandingkan pula dengan perbedaan tegangan (dV) antara tegangan *capacitor bank* dan tegangan sistem. Lalu dengan menggunakan metode *soft switching* perbedaan tegangan antara tegangan *capacitor bank* dengan tegangan sistem akan diminimalisasi ($dV = 0$) untuk membuktikan bahwa arus *inrush* yang timbul tidak ada. Langkah – langkah dalam menentukan waktu yang tepat dalam mengaktifkan TRIAC dengan metode *soft switching* juga akan dibahas pada simulasi ini. Rangkaian *soft switching capacitor bank* menggunakan TRIAC dapat dilihat di gambar 3.2.

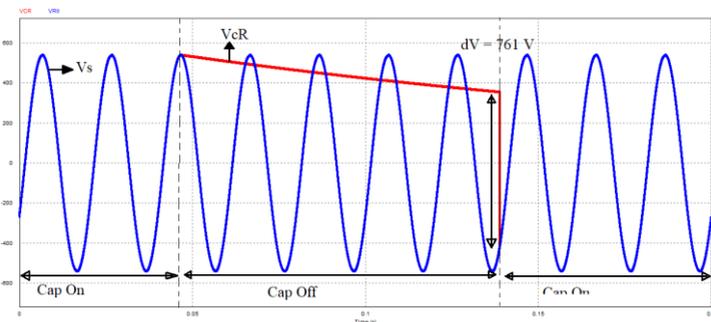


Gambar 3.1 Rangkaian *Soft Switching Capacitor Bank*

3.1.1 Simulasi Tanpa *Soft Switching*

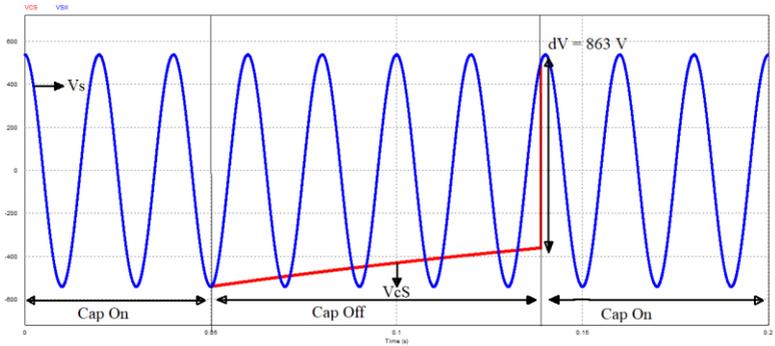
Pada gambar 3.1 dapat dilihat rangkaian *capacitor bank* terhubung delta (Δ) dan terpasang paralel dengan beban. Akan disimulasikan *capacitor bank* akan aktif secara bersama – sama tanpa menggunakan *soft switching*. Awalnya *capacitor bank* akan aktif kemudian *discharge* saat nilai tegangan *capacitor bank* maksimum. Saat *discharge capacitor bank* akan terhubung oleh resistor sehingga akan mengalami penurunan tegangan. Kemudian *capacitor bank* akan aktif secara bersama - sama tanpa melihat nilai yang sama dengan nilai tegangan sistem.

Fasa R:

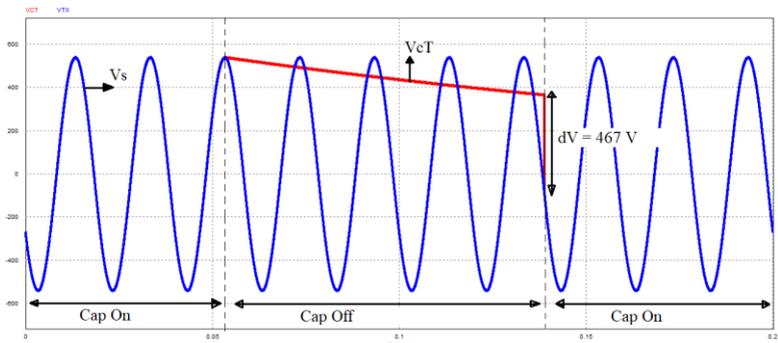


Gambar 3.2 Tegangan *Capacitor Bank* Tanpa *Soft Switching*

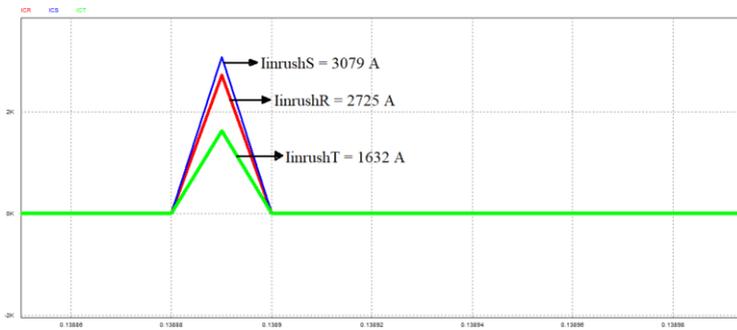
Fasa S:



Fasa T:



Gambar 3.2 Tegangan *Capacitor Bank* Tanpa *Soft Switching* (Lanjutan)



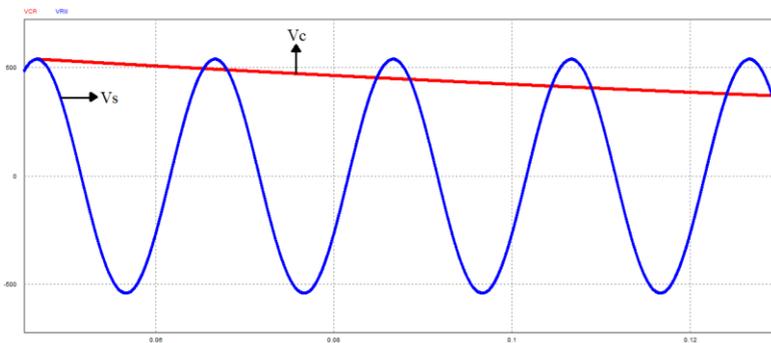
Gambar 3.3 Arus *Inrush Capacitor Bank* Tanpa *Soft Switching*

Pada gambar 3.2 dapat dilihat bentuk tegangan pada setiap fasa saat *capacitor bank* diaktifkan. Terlihat bahwa fasa S memiliki perbedaan tegangan (dV) yang paling besar dan fasa T memiliki perbedaan tegangan (dV) paling rendah. Terbukti pada arus *inrush* yang timbul pada gambar 3.3. Arus *inrush* fasa S paling besar, sedangkan fasa T paling rendah. Hal ini membuktikan bahwa pada persamaan 2.1 semakin besar perbedaan tegangan (dV) antara tegangan sistem dan tegangan *capacitor bank* maka arus *inrush* yang muncul juga akan semakin besar pula.

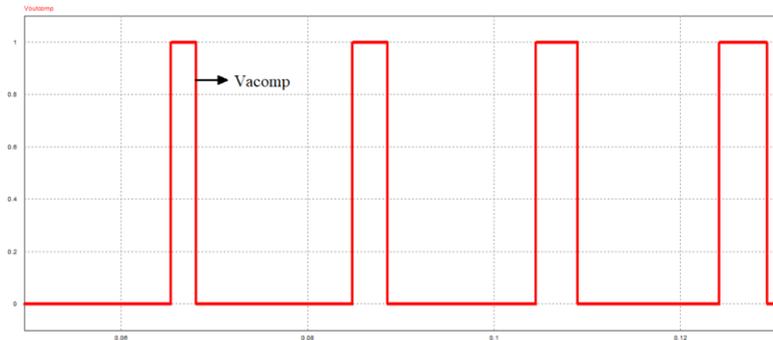
Untuk mengurangi timbulnya arus *inrush*, maka digunakan metode *soft switching*. Dengan metode *soft switching*, *capacitor bank* akan diaktifkan tepat saat nilai tegangan sama dengan nilai tegangan sistem. Dengan begitu perbedaan tegangan (dV) akan sama dengan 0 volt, sehingga arus *inrush* yang timbul akan sama dengan 0 A.

3.1.2 Simulasi Dengan Soft Switching

Proses untuk menentukan waktu penyalaaan TRIAC dengan metode *soft switching* didahului oleh sensor tegangan yang mendeteksi tegangan sistem dan tegangan *capacitor bank* yang dalam kondisi *discharge*. Dalam kondisi *discharge*, *capacitor bank* akan terhubung dengan resistor sehingga *capacitor bank* akan mengalami penurunan tegangan. Tegangan sistem akan masuk ke komparator dan dibandingkan dengan tegangan *capacitor bank* untuk mendapatkan sinyal digital. Gambar 3.4 memperlihatkan bentuk gelombang tegangan sistem (biru) dan tegangan *capacitor bank* (merah) dalam kondisi *discharge*. Pada gambar 3.5 adalah sinyal digital hasil keluaran komparator.



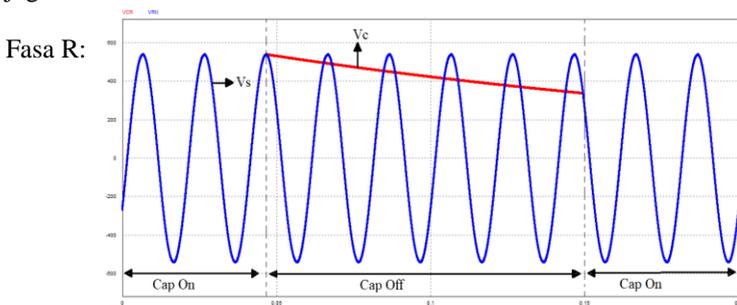
Gambar 3.4 Tegangan Sistem dan Tegangan *Capacitor Bank*



Gambar 3.5 Sinyal Keluaran Komparator

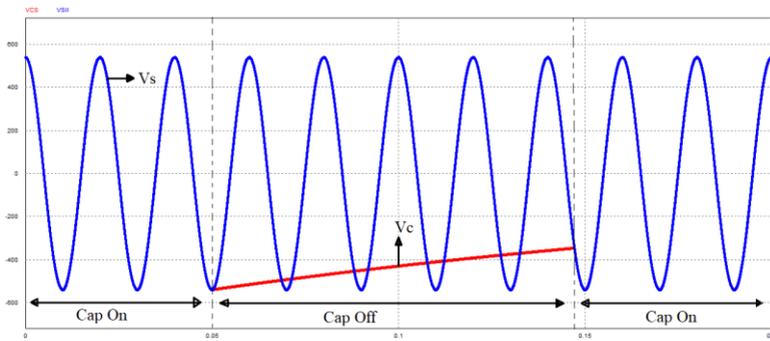
Sinyal keluaran komparator ini menandakan bahwa nilai tegangan sistem sama dengan nilai tegangan *capacitor bank*. Sinyal digital ini yang akan menjadi referensi untuk menyalakan TRIAC agar dapat mengurangi timbulnya arus *inrush* saat *capacitor bank* diaktifkan ke sistem.

Langkah selanjutnya setelah didapatkan sinyal digital dari komparator adalah mengaktifkan TRIAC. Waktu penyalakan TRIAC harus tepat saat sinyal digital naik atau turun. Pada gambar 3.6 terlihat tegangan *capacitor bank* saat di *switch* kembali. Tegangan *capacitor bank* tepat dengan tegangan sistem. Pada gambar 3.7 adalah arus yang timbul saat *capacitor bank* di *switch* kembali. Terlihat arus *capacitor bank* tidak menimbulkan *inrush* saat di *switch* kembali. Hal ini dikarenakan *capacitor bank* di *switch* tepat saat nilai tegangan *capacitor bank* sama dengan nilai tegangan sistem sehingga membuktikan bahwa saat perbedaan tegangan (dV) sama dengan 0 V maka arus *inrush* yang timbul juga 0 A.

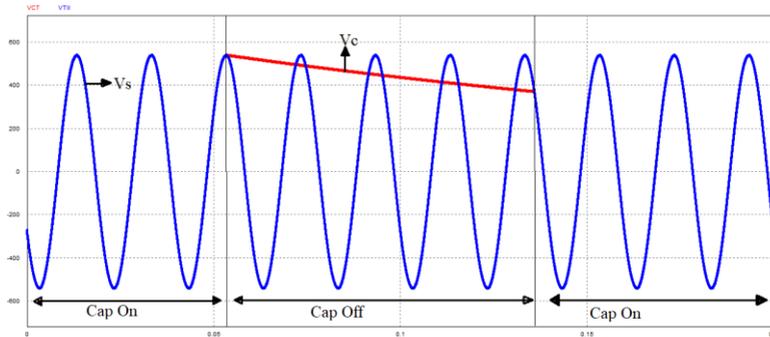


Gambar 3.6 Tegangan *Capacitor Bank* Dengan *Soft Switching*

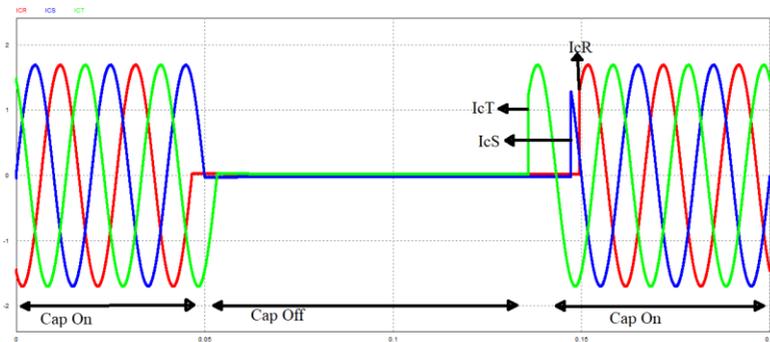
Fasa S:



Fasa T:



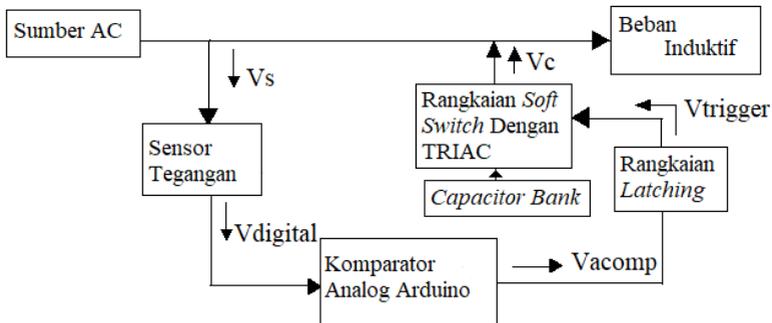
Gambar 3.6 Tegangan *Capacitor Bank* Dengan *Soft Switching* (Lanjutan)



Gambar 3.7 Arus *Capacitor Bank* Dengan *Soft Switching*

3.2 Implementasi

Sebelum merancang implementasi, terlebih dahulu harus merancang blok diagram dari rangkaian *soft switching capacitor bank*. Secara umum blok diagram rangkaian *soft switching capacitor bank* untuk mengurangi timbulnya arus *inrush* dapat digambarkan seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Blok Diagram Rangkaian Pengurangan Arus *Inrush* Pada *Capacitor Bank* Menggunakan Metode *Soft Switching*

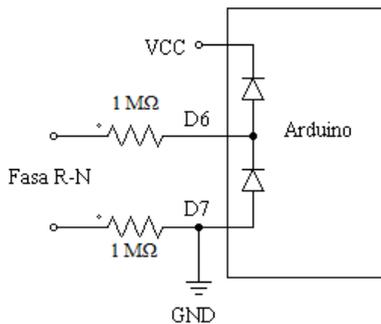
Dengan memisalkan *capacitor bank* awalnya dalam kondisi *charge* dengan sistem, kemudian *capacitor bank discharge* dengan rangkaian sistem hingga nilai *capacitor bank* menjadi 0 volt. Tegangan sistem akan masuk ke sensor tegangan untuk diubah menjadi sinyal digital. Setelah menjadi sinyal digital, dengan menggunakan komparator analog arduino dapat dideteksi tepat saat titik nol sinyal tegangan. Sinyal keluaran komparator analog ini akan bernilai *high* tepat saat sinyal digital dalam kondisi *rising*. Sinyal keluaran komparator analog ini selanjutnya akan masuk ke rangkaian *latching* pada kaki set. Dengan menggunakan tombol *push button* sebagai kontrol reset, keluaran rangkaian *latching* akan menjadi *trigger* untuk mengaktifkan TRIAC. Sinyal keluaran rangkaian *latching* akan bernilai *high* tepat saat sinyal *tegangan* bernilai 0 volt. *Capacitor bank* akan terpasang paralel dengan beban induktif. Dengan mengaktifkan *capacitor bank* tepat saat nilai 0 volt akan membuat arus *inrush* yang timbul berkurang bahkan sampai tidak timbul.

Dalam merancang implementasi, langkah pertama adalah merancang sensor tegangan. Sensor tegangan ini berfungsi untuk mendeteksi tegangan sistem. Kemudian merancang komparator analog untuk mendeteksi titik *zero crossing* dari tegangan sistem. Selanjutnya

merancang rangkaian *latching* untuk membangkitkan sinyal pengaktifan bagi TRIAC. Menentukan nilai *capacitor bank* yang akan digunakan juga diperlukan agar beban tidak mengalami *over compensation*. Dan yang terakhir merancang rangkaian *soft switching* dengan TRIAC sebagai saklar penyalannya.

3.2.1 Rangkaian Sensor Tegangan

Rangkaian sensor tegangan berfungsi untuk mendeteksi sinyal sinusoidal dari tegangan sistem. Sensor tegangan ini nantinya akan mengubah sinyal sinusoidal menjadi sinyal digital. Prinsip kerja dari sensor tegangan ini hingga dapat mengubah bentuk sinyal sinusoidal menjadi sinyal digital adalah dengan adanya dioda yang terpasang antara VCC - pin AIN0 (D6) dan pin AIN0 (D6) – AIN1 (D7) membuat sinyal sinusoidal akan di *clamp* sebesar tegangan VCC. Semakin besar tegangan masukan maka sinyal digital yang terbentuk akan semakin bagus. Bentuk rangkaian sensor tegangan dapat dilihat pada gambar 3.9. Sinyal digital hasil keluaran sensor tegangan akan menjadi sinyal referensi bagi komparator analog arduino untuk dapat mengeluarkan sinyal tepat saat nilai tegangan sistem bernilai 0 volt.



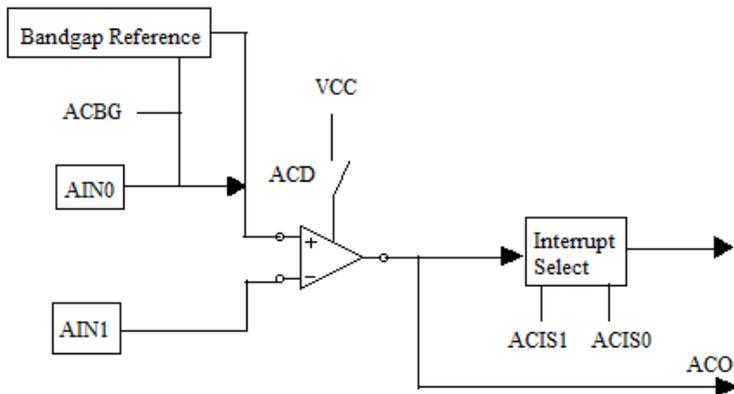
Gambar 3.9 Rangkaian Sensor Tegangan

Prinsip kerja dari rangkaian sensor tegangan ini sama dengan prinsip kerja *Non Inverting Zero Crossing Detector (NIZD)*. Ketika tegangan sinusoidal lebih besar dari 0 volt, maka sinyal digital akan bernilai *high*. Sebaliknya saat tegangan sinusoidal lebih rendah dari 0 volt maka sinyal digital akan bernilai *low*. Tegangan yang dideteksi adalah

tegangan *line to netral*. Positif sumber akan masuk ke pin AIN0 (D6) melalui resistor 1 M Ω agar arus yang mengalir sangat kecil sehingga tidak merusak arduino. Begitu juga pada negatif sumber yang terhubung dengan pin AIN1 (D7). Pin AIN1 (D7) akan terhubung dengan ground agar saat sinyal digital bernilai low bernilai 0 volt.

3.2.2 Rangkaian Komparator Analog Arduino

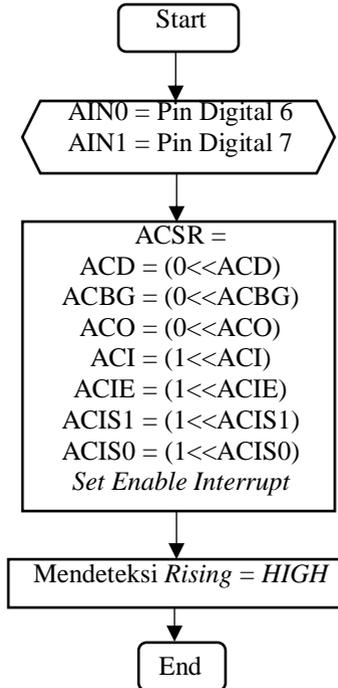
Rangkaian komparator analog arduino berfungsi untuk mendeteksi titik dimana nilai tegangan sistem sama dengan 0 volt. Dengan menggunakan sinyal digital hasil sensor tegangan sebagai sinyal referensi, didapatkan bahwa sinyal keluaran komparator analog akan bernilai *high* saat sinyal digital dalam kondisi *rising*. Sinyal hasil komparator analog ini nantinya akan masuk ke rangkaian *latching* untuk dikontrol sebagai sinyal penyalan bagi TRIAC. Blok diagram rangkaian komparator analog dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Blok Diagram Komparator Analog Arduino

Dari blok diagram gambar 3.10 dapat dilihat bahwa dengan menggunakan program, *register – register* pada rangkaian komparator analog harus diaktifkan terlebih dahulu agar dapat berfungsi. Pada *interrupt select*, dengan mengaktifkan ACIS1 dan ACIS0 maka akan membuat komparator analog mendeteksi tepat saat sinyal digital dalam

kondisi *rising*. Alur diagram program pengaktifan komparator analog dapat dilihat pada gambar 3.11.

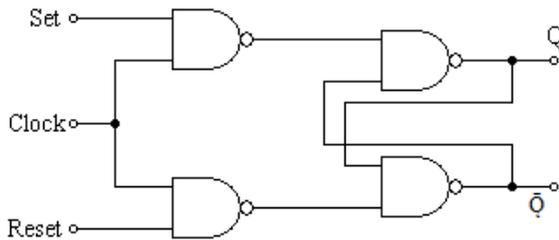


Gambar 3.11 Flowchart Pengaktifan Komparator Analog

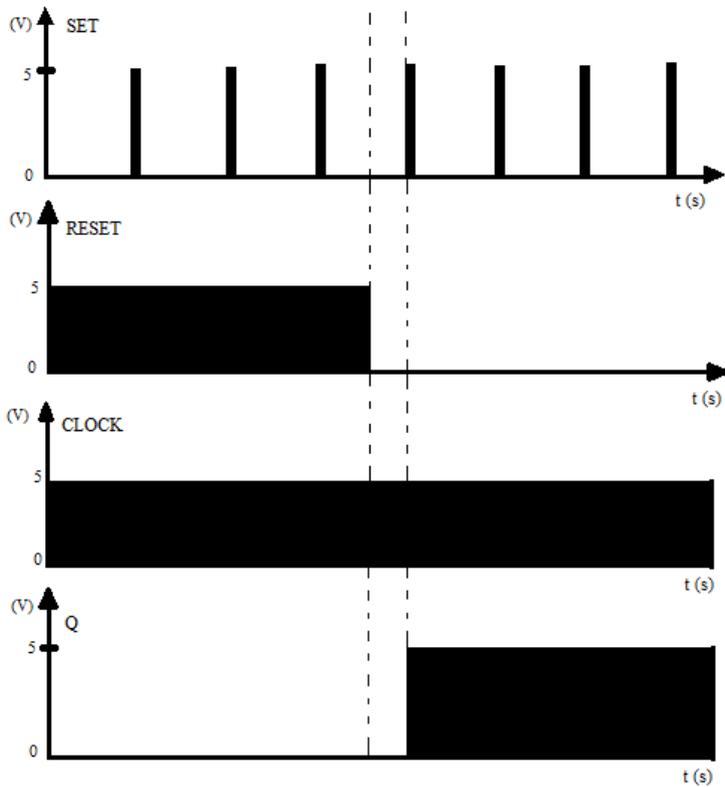
3.2.3 Rangkaian *Latching*

Rangkaian *latching* berfungsi untuk menahan tegangan keluaran agar saat diaktifkan dapat mengeluarkan sinyal *high* secara berkelanjutan. Pada perencanaan kali ini, digunakan rangkaian SR Flip Flop dengan memanfaatkan gerbang logika NAND. Adapun IC yang digunakan adalah jenis IC MM74HCT100. Dengan menggunakan *clock*, gerbang logika NAND yang digunakan dalam satu rangkaian SR Flip Flop sebanyak 4 gerbang logika. Adapun rangkaian SR Flip Flop dengan gerbang logika NAND dapat dilihat pada gambar 3.12. Tegangan keluaran komparator analog arduino akan masuk ke kaki *set*, sedangkan tombol *push button* sebagai kontrol penyalaaan akan masuk ke kaki *reset*. Diagram waktu

penyalan SR Flip Flop yang direncanakan dapat dilihat pada gambar 3.13.



Gambar 3.12 Rangkaian *Latching* Dengan IC NAND



Gambar 3.13 Diagram Waktu SR Flip Flop

Pada gambar 3.13 dapat dilihat bahwa sinyal keluaran komparator analog akan masuk ke *set*. Sinyal keluaran komparator analog akan bernilai *high* tepat saat *rising*, sehingga hanya bernilai *high* sesaat. Tombol *push button* akan masuk ke *reset*. Saat tombol *push button* tidak aktif maka akan bernilai *high*, dan saat aktif akan bernilai *low* karena tombol *push button* akan terhubung dengan *ground*. *Clock* akan selalu bernilai *high* karena selalu terhubung dengan *VCC*. Keluaran *Q* akan bernilai *high* saat *set* bernilai *high* dan *reset* bernilai *low*. Saat *set* kembali *low*, keluaran *Q* akan tetap bernilai *high*. Sinyal inilah yang selanjutnya akan menjadi sinyal penyalaaan TRIAC.

3.2.4 Penentuan Nilai *Capacitor Bank*

Dalam menentukan nilai *capacitor bank* yang akan digunakan, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah mengetahui nilai faktor daya pada beban induktif. Dengan menghubungkan sumber AC dengan beban induktif, digunakan *Power Quality Analyzer* agar dapat mengetahui besar faktor daya pada beban induktif. Beban induktif ini adalah beban resistor dan induktor yang terpasang seri. Nilai beban yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$R = 100 \Omega$$

$$L = 3.45 \text{ H}$$

Sedangkan nilai faktor daya dapat dilihat pada gambar 3.14.

Power & Energy			
FULL		0:05:41	
L1		Total	
W	2.8		2.8
VA	9.4		9.4
VAR	9.0		9.0
PF	0.29		0.29
Cosφ	0.32		
Arms	0.043		
L1			
Urms	217.9		
03/08/18 10:56:20		400V 50Hz 1Ø	EN50160
PREV	BACK	NEXT	PRINT

Gambar 3.14 Nilai Pengukuran Faktor Daya, Daya Aktif dan Daya Reaktif Beban Induktif

Pada gambar 3.14 terlihat bahwa beban induktif memiliki faktor daya $\cos \Theta = 0,29$ (lagging) dan daya aktif $P = 2,8$ Watt. Dengan menambahkan *capacitor bank*, diinginkan nilai faktor daya menjadi $\cos \Theta = 1$. Sehingga nilai *capacitor bank* yang diinginkan adalah:

$$\begin{aligned} \text{Faktor daya lama : } \cos^{-1} \Theta_1 &= 0,29 \text{ (lagging)} \\ \Theta_1 &= 73,14^\circ \text{ (lagging)} \\ \text{Faktor daya baru : } \cos^{-1} \Theta_2 &= 1 \\ \Theta_2 &= 0^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{capacitorbank}} &= P (\tan \Theta_1 - \tan \Theta_2) \\ &= 2,8 (\tan (73,14^\circ) - \tan (0^\circ)) \\ &= 9,24 \text{ VAR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q_{\text{capacitorbank}}}{V^2 \times 2\pi \times f} \\ &= \frac{9,24}{220^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} \\ &= 0,61 \mu\text{F} \end{aligned}$$

Nilai *capacitor bank* yang didapat tidak ada di pasaran. Sehingga digunakan nilai yang mendekati yaitu $3 \mu\text{F}$ yang dipasang seri sebanyak 3 buah sehingga bernilai $1 \mu\text{F}$.

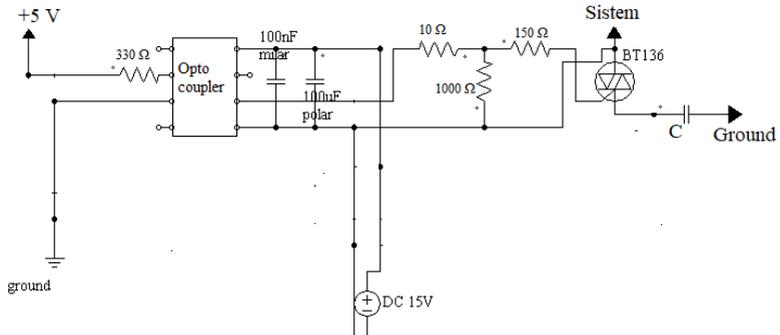


Gambar 3.15 *Capacitor Bank*

3.2.5 Rangkaian *Soft Switching* Dengan TRIAC

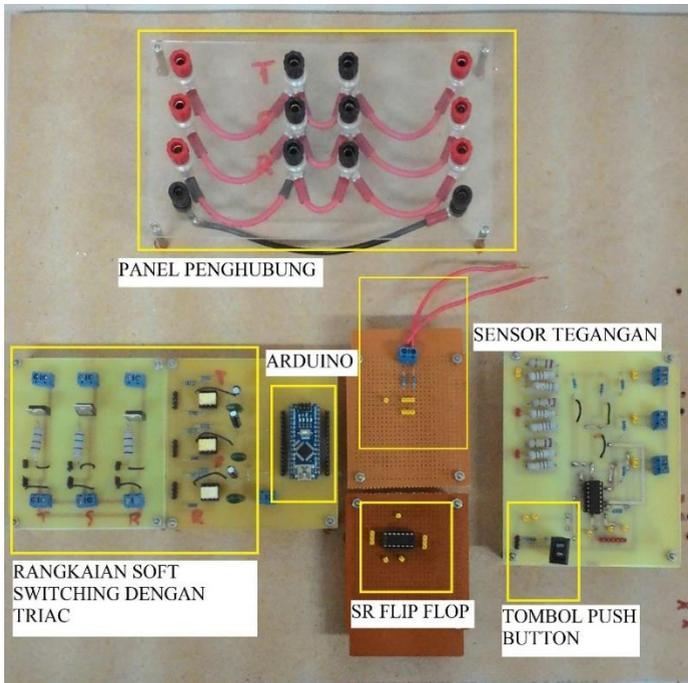
Dalam perencanaan dan pengimplementasian rangkaian *soft switching capacitor bank* harus merencanakan rangkaian *soft switching* dengan TRIAC sebagai saklar penyalanya. Gambar 3.16 adalah rangkaian *soft switching capacitor bank* dengan TRIAC sebagai saklar penyalanya. Pada kondisi *charge*, *capacitor bank* akan terhubung

dengan sistem melalui TRIAC sebagai saklar penyalanya. Dalam mengaktifkan TRIAC dibutuhkan sinyal penyalan. Sinyal penyalan ini adalah sinyal hasil rangkaian *latching*. Antara rangkaian *latching* dengan TRIAC akan dipisahkan oleh optocoupler agar lebih aman dari gangguan pada sisi output. Jenis TRIAC yang digunakan adalah BT136 yang memiliki rating arus sebesar 4 A.



Gambar 3.16 Rangkaian *Soft Switching* Dengan TRIAC

Setelah melakukan simulasi dan merancang rangkaian yang akan digunakan, selanjutnya adalah mengimplementasikan rangkaian tersebut agar dapat dilakukan pengujian untuk mendapatkan data yang diinginkan. Pada gambar 3.17 dapat dilihat rangkaian *soft switching capacitor bank* yang telah diimplementasikan. Komponen – komponen yang digunakan disesuaikan dengan yang tersedia di pasaran.



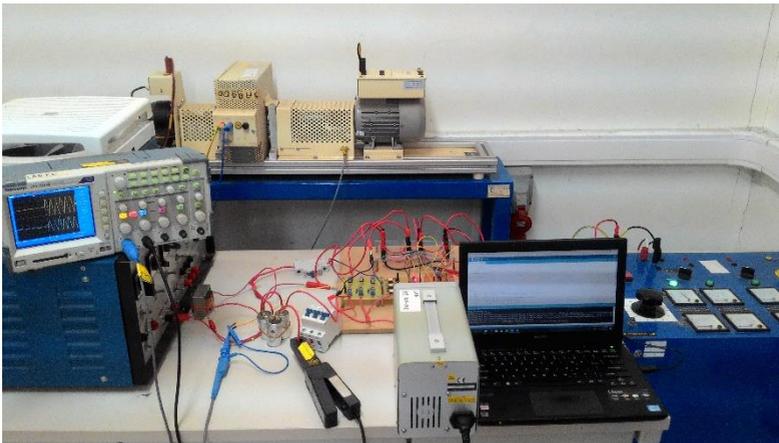
Gambar 3.17 Rangkaian Implementasi *Soft Switching Capacitor Bank*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS

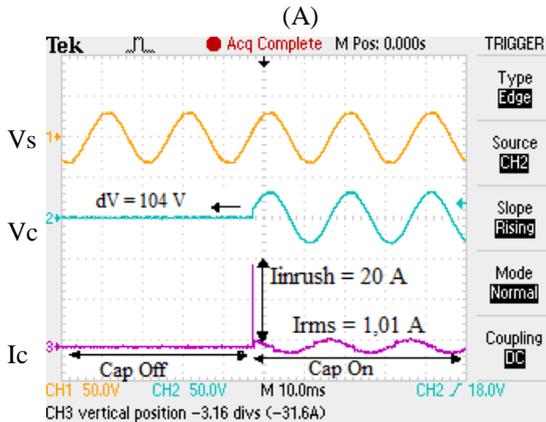
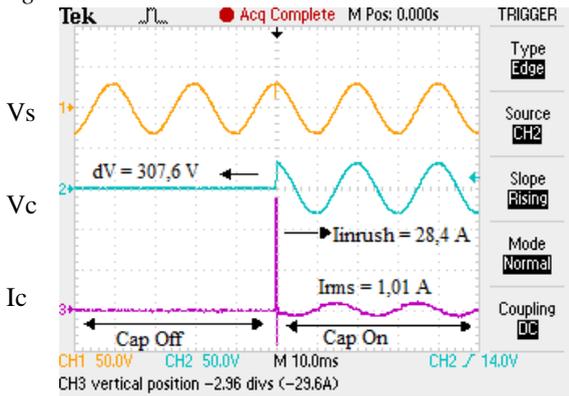
Pada bab 4 akan dibahas mengenai pengujian dan analisis data hasil implementasi pengurangan arus *inrush* pada *capacitor bank* menggunakan metode *soft switching*. Pertama akan dilakukan pengujian *capacitor bank* ketika diaktifkan tanpa menggunakan *soft switching*. Akan diamati besar arus *inrush* yang terjadi dan akan dibandingkan dengan perbedaan tegangan (dV) antara *capacitor bank* dan tegangan sistem. Pada pengujian dengan *soft switching*, terdapat beberapa pengujian yaitu pengujian rangkaian sensor tegangan, pengujian komparator analog arduino, pengujian rangkaian latching dan pengujian arus *inrush* yang timbul saat *capacitor bank* diaktifkan ke sistem. Pengujian dilakukan dengan menggunakan peralatan yang tersedia di Laboratorium Konversi Energi Listrik. Peralatan yang digunakan adalah sumber AC variabel, dan beban induktif yang terdiri dari beban resistor variabel dan induktor. Sumber AC yang digunakan adalah sumber AC variabel 3 fasa. Untuk mengamati bentuk gelombang tegangan digunakan osiloskop Tektronix beserta *probe* tegangan Tektroknik standar CAT II yang ada di laboratorium. Dan untuk mengamati arus *inrush* digunakan osiloskop Tektronix juga beserta *probe* arus Tektronik A622. Gambar 4.1 menunjukkan alat tugas akhir saat sedang melakukan pengujian.



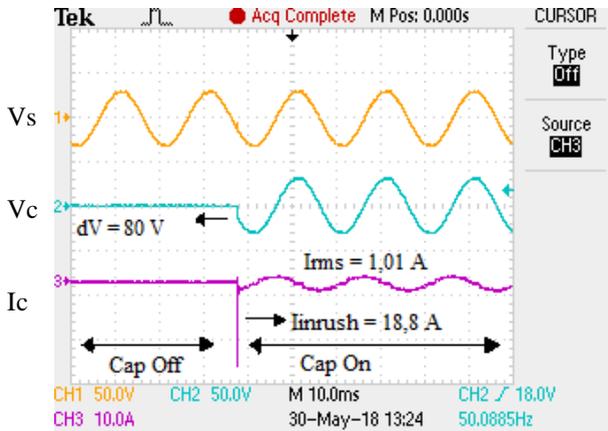
Gambar 4.1 Pengujian Alat Tugas Akhir

4.1 Pengujian Tanpa *Soft Switching*

Pada pengujian *capacitor bank* tanpa menggunakan *soft switching* ini, *capacitor bank* akan diaktifkan secara langsung dengan menggunakan kontaktor atau MCB. Terdapat 3 data hasil pengujian yang diamati dimana setiap data memiliki perbedaan nilai tegangan (dV) antara tegangan *capacitor bank* dengan tegangan sistem yang berbeda – beda. Hal ini diperlukan untuk membuktikan besarnya arus *inrush* yang timbul. Pada gambar 4.2 adalah hasil pengujian tanpa menggunakan *soft switching*.



Gambar 4.2 Hasil Pengujian Tanpa *Soft Switching*



(C)

Gambar 4.2 Hasil Pengujian Tanpa *Soft Switching* (Lanjutan)

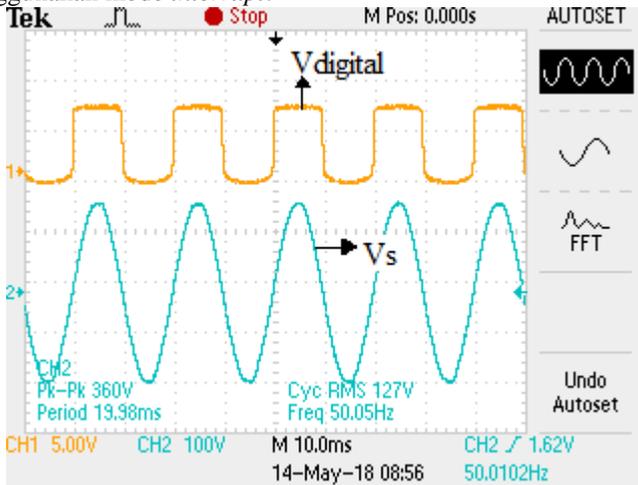
Pada gambar 4.2 terdapat 3 jenis data berdasarkan perbedaan nilai tegangan (dV). Dari tiga data di atas dapat dianalisa bahwa pada data A memiliki nilai perbedaan tegangan yang paling besar yaitu $dV = 307,6 \text{ V}$ dan data C memiliki nilai perbedaan tegangan paling rendah yaitu $dV = 80 \text{ V}$. Nilai arus *inrush* yang timbul pada data A paling besar yaitu sebesar $28,4 \text{ A}$ dan data C menimbulkan arus *inrush* yang paling rendah yaitu $18,8 \text{ A}$. Dari data ini dapat dibuktikan bahwa berdasarkan persamaan 2.1, semakin besar nilai perbedaan tegangan (dV) maka arus *inrush* yang timbul juga akan semakin besar.

4.2 Pengujian Dengan *Soft Switching*

Pada pengujian *capacitor bank* menggunakan metode *soft switching* ini, akan dibuktikan bahwa ketika tegangan *capacitor bank* sama dengan nilai tegangan sistem ($dV = 0$) maka tidak akan timbul arus *inrush*. Sebelum masuk pada pengujian arus, terlebih dahulu akan diuji langkah – langkah dalam mengaktifkan *capacitor bank* menggunakan metode *soft switching*. Diantaranya adalah pengujian sensor tegangan, pengujian komparator analog dan pengujian rangkaian *latching*.

4.2.1 Pengujian Sensor Tegangan

Pada pengujian rangkaian sensor tegangan ini digunakan arduino dan resistor 1 M Ω . Dengan menghubungkan AIN0 (D6) ke positif sumber dan AIN1 (D7) ke negatif sumber yang terhubung pula dengan *ground*, maka akan didapat sinyal hasil sensor tegangan seperti pada gambar 4.2. Terlihat bahwa saat nilai tegangan (biru) sistem lebih besar dari 0 volt maka akan bernilai *high*, sebaliknya saat nilai tegangan sistem lebih rendah dari 0 volt maka akan bernilai *low*. Hal ini sesuai dengan prinsip kerja dari *Non Inverting Zero Crossing Detector* (NIZCD). Tinggi sinyal digital saat bernilai high akan sama dengan nilai VCC arduino, sedangkan nilai sinyal saat dalam kondisi low adalah 0 volt karena pin AIN1 (D7) terhubung dengan *ground*. Sinyal ini selanjutnya akan diolah oleh komparator analog arduino untuk diketahui titik *zero crossing*nya dengan menggunakan mode *interrupt*.

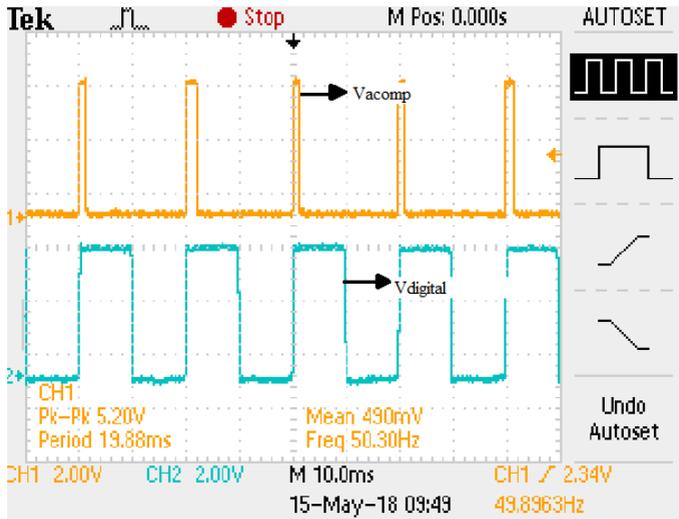


Gambar 4.3 Sinyal Hasil Sensor Tegangan

4.2.2 Pengujian Komparator Analog Arduino

Pada pengujian komparator analog ini, diamati tegangan keluaran pada osiloskop. Dengan menggunakan sinyal digital sebagai referensi, akan dideteksi tepat saat sinyal digital pada kondisi rising. Tepat saat sinyal digital ini *rising*, maka akan keluar sinyal *high*. Jika pada osiloskop, tegangan yang keluar hanya sekilas, maka perlu diberi *delay* agar cukup

jelas sinyal keluarannya. Keunggulan menggunakan komparator analog pada arduino ini adalah tidak terjadinya *delay* saat akan mendeteksi titik *rising*. Bentuk sinyal hasil komparator analog ini dapat dilihat pada gambar 4.4. Sinyal hasil komparator analog (kuning) terbukti akan bernilai *high* tepat saat sinyal digital sensor tegangan (biru) pada kondisi *rising* tanpa mengalami *delay*. Sinyal keluaran komparator analog ini selanjutnya akan masuk ke rangkaian *latching* untuk dikontrol sebagai sinyal penyalan bagi TRIAC.

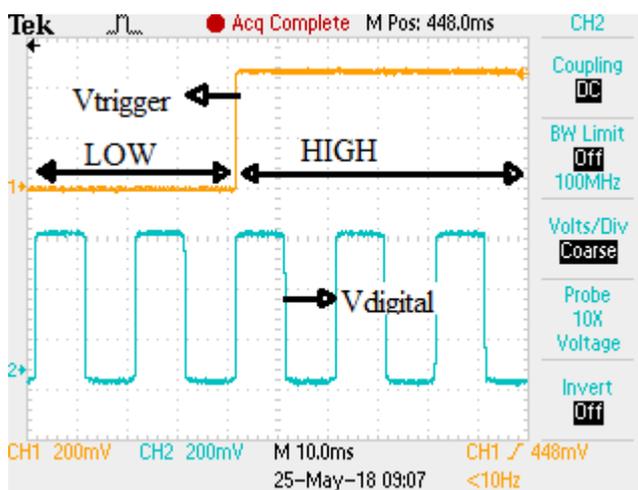


Gambar 4.4 Sinyal Komparator Analog Dengan Mode *Interrupt*

4.2.3 Pengujian Rangkaian *Latching*

Rangkaian *latching* berfungsi untuk menahan tegangan keluaran agar dapat menyimpan nilai *high* secara berkelanjutan walaupun tegangan referensi (*set*) telah berubah nilai. Pada pengujian rangkaian *latching* ini tegangan masukan pada kaki *set* adalah tegangan hasil keluaran komparator analog arduino. Tombol *push button* akan masuk pada kaki *reset*. Tegangan *set* akan menjadi referensi keluaran saat tombol *push button* diaktifkan. Tegangan keluaran akan bernilai *high* saat tegangan referensi bernilai *high* pula. Hal ini sesuai dengan rumus tabel kebenaran SR Flip Flop. Ketika tombol dinonaktifkan, tegangan keluaran akan kembali bernilai *low*. Hal ini karena tegangan di *reset* sehingga akan

membuat tegangan keluaran bernilai *low* kembali. Tegangan keluaran rangkaian *latching* inilah yang menjadi sinyal penyalan dalam mengaktifkan TRIAC. Tegangan keluaran rangkaian *latching* akan bernilai *high* tepat saat tegangan referensi (*set*) bernilai *high*, dan akan terus bernilai *high* walaupun tegangan referensi telah berubah menjadi *low*. Tegangan keluaran rangkaian *latching* akan berubah kondisi apabila tegangan *reset* juga berubah kondisi. Bentuk tegangan keluaran rangkaian *latching* dapat dilihat pada gambar 4.5.

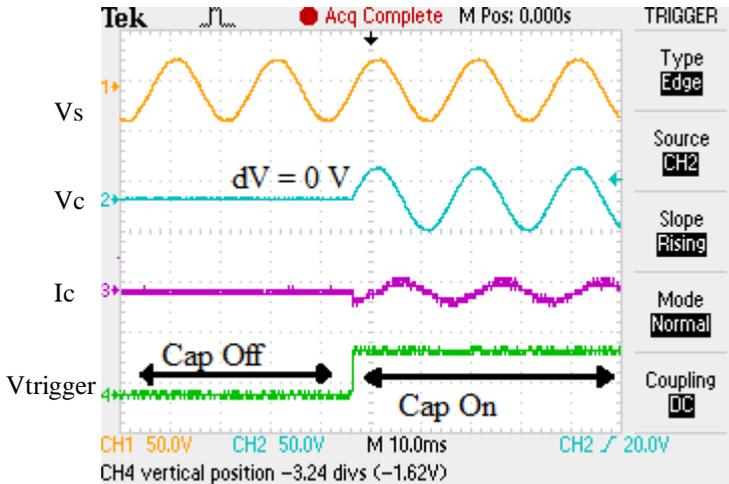


Gambar 4.5 Sinyal Keluaran Rangkaian *Latching*

Agar dapat menjadi sinyal penyalan bagi TRIAC, sinyal hasil rangkaian *latching* akan terhubung dengan optocoupler agar terisolasi antara sisi *input* dan *output*. Selain itu, sinyal ini setelah keluar dari optocoupler akan dinaikkan tegangannya menjadi 13,8 Volt agar dapat mengaktifkan TRIAC.

4.2.4 Pengujian Arus *Inrush*

Pada pengujian arus *inrush* ini, capacitor bank akan diaktifkan tepat saat nilai tegangan sama dengan 0 volt. TRIAC akan diaktifkan melalui sinyal trigger ($V_{trigger}$) yang dikontrol menggunakan tombol push button pada rangkaian *latching*. Hasil pengujian capacitor bank dengan metode soft switching dapat dilihat pada gambar 4.6



Gambar 4.6 Hasil Pengujian Dengan *Soft Switching*

Pada gambar 4.6 dapat dilihat bahwa saat *capacitor bank* diaktifkan ke sistem dengan metode *soft switching*, tegangan *capacitor bank* (V_c) akan tepat saat tegangan sistem bernilai 0 volt. Hasilnya arus *capacitor bank* (I_c) tidak menimbulkan *inrush* saat diaktifkan. Jika dianalisa mengapa dengan *soft switching* arus yang timbul pada *capacitor bank* tidak menimbulkan *inrush*, hal ini berkaitan dengan rumus arus pada kapasitor pada persamaan 2.1 bahwa ketika dengan *soft switching*, perbedaan tegangan antar keping kapasitor akan sama dengan 0 sehingga arus yang timbul pada kapasitor sama dengan 0 A. Berbeda apabila tidak menggunakan *soft switching*, *capacitor bank* yang memiliki nilai tegangan 0 volt lalu dihubungkan dengan sistem yang bertegangan akan mengakibatkan perbedaan tegangan antar keping kapasitor (dV) menjadi besar, sehingga membuat arus yang mengalir pada *capacitor bank* juga akan semakin besar. Semakin besar perbedaan tegangan antar keping kapasitor, maka arus yang mengalir akan semakin besar pula. Dengan begitu dapat disimpulkan bahwa dengan metode *soft switching* dapat mengurangi timbulnya arus *inrush* saat akan diaktifkan dengan sistem.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan menggunakan arduino sebagai komparator analog akan membuat sinyal penyalan TRIAC tidak mengalami *delay*
2. Dengan menggunakan metode *soft switching*, dapat mengurangi timbulnya arus *inrush* saat *capacitor bank* diaktifkan
3. Semakin besar perbedaan tegangan antar plat kapasitor (dV) maka akan semakin besar pula arus *inrush* yang terjadi

5.2 Saran

Dalam mengembangkan penelitian ini, ada beberapa saran yang diperlukan :

1. Dibutuhkan sebuah mikrokontroler yang memiliki 3 komparator agar dapat mengaktifkan *capacitor bank* ke sistem 3 fasa
2. Apabila tidak menggunakan mikrokontroler sebagai komparator, dibutuhkan sebuah IC komparator yang memiliki kecepatan *clock* sangat besar sehingga tidak mengalami *delay* saat dimasukkan ke arduino

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Jintakosonwit, "Implementation and Performance of an Anti-Resonance Hybrid Delta-Connected Capacitor Bank for Power Factor Correction," *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 22, pp. 2543–2551, Nov. 2007.
- [2] R. Bose, "Transient Analysis of Mechanically Switched Capacitors with and without Damping Network Connected to A.C Grid," presented at the 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC), Kolkata, India, 2016, pp. 274–278.
- [3] M. Adif, "Analisis Arus Inrush Saat Switching Kapasitor Bank Di Gardu Induk (GI) Manisrejo Madiun."
- [4] I. Sudiharto, "Teknik Pengurangan Arus Inrush dan Pengurangan Harmonisa Pada Kapasitor Bank Untuk Beban Non Linier," pp. 39–50.
- [5] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamental of Electric Circuits*, Fifth Edition. United States of America.
- [6] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics*, Third Edition. United States of America, 2003.
- [7] "ATMEL 8-Bit AVR Microcontrollers ATmega 328/P." ATMEL.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Berikut program yang digunakan dalam komparator analog arduino :

```
int out_comp = 5;
const int AIN0 = 6;
const int AIN1 = 7;

//mbt=====

ISR(ANALOG_COMP_vect)
{
  PORTD |= (1 << PORTD5);
}

void setup()
{
  ACSR =
  (0 << ACD) |
  (0 << ACBG) |
  (0 << ACO) |
  (1 << ACI) |
  (1 << ACIE) |
  (0 << ACIC) |
  (1 << ACIS1) | (1 << ACIS0);
  sei();
  Serial.begin(57600);
  pinMode (out_comp, OUTPUT);
  pinMode (AIN0, INPUT);
  pinMode (AIN1, INPUT);
}

void loop()
{
  PORTD &= ~(1 << PORTD5);
}
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Yudhatama Dwi Putra adalah mahasiswa S1 Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Lahir di Jakarta, 28 Juli 1996, penulis memiliki panggilan akrab Yudha. Penulis berasal dari Kota Semarang. Penulis pernah menempuh pendidikan di SD Islam Hidayatullah Semarang, SMPN 21 Semarang, SMAN 3 Semarang dan sekarang sedang menempuh pendidikan di S1 Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya menuju tahun ke empat. Penulis adalah anak kedua dari dua bersaudara.

Di bidang organisasi, penulis pernah menjabat sebagai Ketua OSIS saat di bangku SMP. Saat di bangku SMP pula, penulis pernah aktif di Pramuka sebagai Pemimpin Regu sekaligus Pratama. Saat di SMA, penulis juga bergabung di Ganesha *Badminton Club* sebagai Ketua Subsie. Kecintaan penulis di bidang organisasi berlanjut saat di bangku kuliah dengan menjabat sebagai Staf Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Elektro tahun 2015-2016 dan Koordinator Hubungan Masyarakat Electra 2017 pada tahun 2016-2017. Selain organisasi, penulis pernah menjuarai berbagai lomba yaitu Juara 1 Lomba Pramuka Galang Manunggal tingkat Kota Semarang dan mendapat gelar sebagai *Completers Kumon Mathematic and English Course*.

Penulis memiliki ketertarikan didunia penerbangan sejak kecil. Hal ini yang mendorong penulis bercita-cita untuk bisa bekerja di perusahaan MRO terbesar di Indonesia yaitu Garuda Maintenance Facility AeroAsia. Sebagai langkah awal, penulis memilih untuk kerja praktik di Garuda Maintenance Facility AeroAsia agar lebih mengetahui bagaimana kondisi perusahaan yang ingin dituju.