PERKIRAAN STABILITAS TEGANGAN DI JARINGAN TEGANGAN RENDAH MENGGUNAKAN METODE EKSPONEN LYAPUNOV MAKSIMUM

(Skripsi)

Oleh

DEDY IRAWAN

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2016

ABSTRAK

PERKIRAAN STABILITAS TEGANGAN DI JARINGAN TEGANGAN RENDAH MENGGUNAKAN METODE EKSPONEN LYAPUNOV MAKSIMUM

Oleh

DEDY IRAWAN

Kestabilan tegangan merupakan salah satu hal yang penting dalam operasi sistem tenaga listrik termasuk di jaringan tegangan rendah. Gangguan-gangguan yang terjadi selama operasi dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan. Dampak ketidakstabilan tegangan dapat membuat kerusakan pada peralatan–peralatan penyalur energi listrik dan peralatan-peralatan yang menggunakan energi listrik. Oleh sebab itu, penting untuk mengetahui kestabilan tegangan secara dinamis pada jaringan tegangan rendah untuk menghindarkan kerusakan pada peralatan-peralatan listrik dan menjaga keandalan operasi sistem tenaga listrik.

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk memperkirakan stabilitas tegangan pada jaringan tegangan rendah secara dinamis. Eksponen Lyapunov maksimum (ELM) dari data tegangan urutan waktu digunakan sebagai indikator stabilitas tegangan secara dinamis. Semua perhitungan dilakukan dengan pemrograman menggunakan perangkat lunak MATLAB.

Hasil simulasi menggunakan data nyata yang direkam menunjukkan bahwa ELM dapat memperkirakan stabilitas tegangan di jaringan tegangan rendah secara dinamis. Nilai ELM menunjukkan bahwa fluktuasi tegangan yang terjadi menyebabkan ketidakstabilan tegangan, meskipun seluruh data tegangan masih berada di batas kestabilan tegangan menurut standar PLN. Jumlah sampel data yang digunakan juga mempengaruhi perhitungan nilai ELM secara dinamis.

Kata-katakunci: kestabilan tegangan, eksponen Lyapunov maksimum, perkiraan dinamis, jaringan tegangan rendah.

ABSTRACT

VOLTAGE STABILITY ESTIMATION IN LOW VOLTAGE NETWORK USING MAXIMUM LYAPUNOV EXPONENT

By

DEDY IRAWAN

Voltage stability is one important thing in the operation of the power system included in the low voltage network. Disturbances occurring during operation can lead to voltage instability. The impact of voltage instability can create damage to equipment distributors of electrical energy and equipment that uses electrical energy. Therefore, it is important to know the dynamic voltage stability at low voltage network to prevent damage to the electrical equipment and maintain reliable operation of the power system.

This thesis research aims to estimate the voltage stability on the low voltage network dynamically. The maximum Lyapunov exponent (ELM) of the time sequence of voltage data is used as an indicator of dynamic voltage stability. All calculations are done by programming using MATLAB software.

The simulation results using recorded real data indicate that the ELM can estimate the voltage stability in the low voltage network dynamically. ELM value indicates that the voltage fluctuations which occur cause voltage instability although all the voltage data still in voltage stability limit by PLN standards. The number of sample data used also affects the calculation of the value of ELM dynamically.

Keywords: voltage stability, maximum Lyapunov exponent, dynamic estimation, low voltage network.

PERKIRAAN STABILITAS TEGANGAN DI JARINGAN TEGANGAN RENDAH MENGGUNAKAN METODE EKSPONEN LYAPUNOV MAKSIMUM

Oleh:

DEDY IRAWAN

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2016

Judul Skripsi : **PERKIRAAN STABILITAS TEGANGAN DI JARINGAN TEGANGAN RENDAH MENGGUNAKAN METODE EKSPONEN LYAPUNOV MAKSIMUM**

Nama Mahasiswa : Dedy Irawan

Nomor Pokok Mahasiswa : 0645031014

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Osea Zebua, S.T.,M.T.
NIP 19700609 199903 1 002

Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.
NIP 19631114 199903 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro

Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc.
NIP 19731128 199903 1 005

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Osea Zebua, S.T.,M.T.** .....

Sekretaris : **Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.** .....

Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. Lukmanul Hakim, S.T.,M.Sc.** .....

2. Dekan Fakultas Teknik

Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **12 Agustus 2016**

LEMBAR PERNYATAAN

Sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Dedy Irawan

NPM : 0645031014

Menyatakan bahwa karya ilmiah saya yang berjudul :

PERKIRAAN STABILITAS TEGANGAN DI JARINGAN TEGANGAN RENDAH MENGGUNAKAN METODE EKSPONEN LYAPUNOV MAKSIMUM

Merupakan karya ilmiah asli saya dan belum pernah dipublikasikan dimana pun. Apabila dikemudian hari, karya saya disinyalir bukan merupakan karya asli saya, maka saya bersedia menerima konsekuensi apa pun yang diberikan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung kepada saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandar Lampung

Pada Tanggal : 12 Agustus 2016

Yang menyatakan

METERAI TEMPEL

BDAEF139506167

6000

ENAM RIBU RUPIAH

Dedy Irawan

0645031014

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Sukoharjo II, Kab. Primgsewu pada tanggal 14 July 1984, sebagai anak bungsu dari tiga bersaudara, dari pasangan bapak Ponimin dan ibu Mitun.

Penulis menyelesaikan pendidikan Taman Kanak-kanak (TK) Darmawanita Sukoharjo II pada tahun 1991, Sekolah Dasar di SDN 2 Sukoharjo II pada tahun 1997, Sekolah Menengah Pertama di SMPN 2 Sukoharjo pada tahun 2000, dan Sekolah Menengah Atas di SMAN 1 Pringsewu pada tahun 2003.

Tahun 2006 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur penerimaan mahasiswa baru Non-Reguler. Penulis pernah melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT. PUSRI Palembang dari 1 Juli 2010 sampai 1 Agustus 2010. Penulis menyelesaikan kerja parakteknya dengan menulis laporan yang membahas tentang “Pembangkit Listrik Tenaga Gas”.

PERSEMBAHAN

Puji syukur ku panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga saya selalu sehat, semangat dan diberikan kemudahan untuk menyelesaikan skripsi ini. Sholawat serta salam tak lupa saya haturkan kepada Rasulullah SAW.

Bapak dan Ibu saya, yang telah memberikan dukungan moril maupun materi serta do'a yang tiada henti untuk kesuksesan saya, karena tiada kata seindah lantunan do'a dan tiada do'a yang paling khusuk selain do'a yang terucap dari orang tua. Ucapan terimakasih saja takkan pernah cukup untuk membalas kebaikan orang tua, karena itu terimalah persembaha bakti dan cinta ku untuk kalian bapak ibuku.

Bapak dan Ibu Dosen pembimbing, penguji dan pengajar, yang selama ini telah tulus dan ikhlas meluangkan waktunya untuk menuntun dan mengarahkan saya, memberikan bimbingan dan pelajaran yang tiada ternilai harganya, agar saya menjadi lebih baik. Terimakasih banyak Bapak dan Ibu dosen, jasa kalian akan selalu terpatri di hati.

Keluarga kecil saya (Istri dan Anak), yang senantiasa memberikan dukungan, semangat, senyum dan do'anya untuk keberhasilan ini, cinta kalian adalah memberikan kobaran semangat yang menggebu, terimakasih dan sayang ku untuk kalian.

Sahabat dan Teman, tanpa semangat, dukungan dan bantuan kalian semua tak kan mungkin aku sampai disini, terimakasih untuk canda tawa, tangis, dan perjuangan yang kita lewati bersama dan terimakasih untuk kenangan manis yang telah mengukir selama ini. Dengan perjuangan dan kebersamaan kita pasti bisa! Semangat!!

Terimakasih yang sebesar-besarnya untuk kalian semua, akhir kata saya persembahkan skripsi ini untuk kalian semua, orang-orang yang saya sayangi. Dan semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna untuk kemajuan ilmu pengetahuan di masa yang akan datang, Aamiinnn.

MOTTO

"Kegagalan hanya terjadi bila kita menyerah"

SANWACANA

Segala puji syukur kehadirat Allah SWT. Atas nikmat kesehatan dan kesempatan yang diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir ini. Sholawat serta salam selalu penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW sebagai suri teladan bagi umat manusia. Sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul "**Perkiraan Stabilitas Tegangan Di Jaringan Tegangan Rendah Menggunakan Metode Eksponen Lyapunov Maksimum**" merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr, Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P, Selaku Selaku Rektor Universitas Lampung;
2. Bapak Prof. Suharno, M.Sc. Ph.D. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung;
3. Bapak Dr. Ing Ardian Ulvan, S.T., M.Sc, Selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung;
4. Bapak Dr. Herman H Sinaga. Selaku sekretaris jurusan teknik elektro Universitas Lampung;

5. Bapak Osea Zebua, S.T.,M.T. selaku pembimbing utama, yang selalu memberikan bimbingan, arahan dan pandangan hidup kepada penulis disetiap kesempatan dengan baik dan ramah;
6. Bapak Ir. Noer Soerdjawanto, M.T. selaku Pembimbing Pendamping, terimakasih atas kesediaannya meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, saran dan dukungan yang tiada henti dalam proses penyelesaian tugas akhir ini;
7. Bapak Dr. Lukmanul Hakim, S.T.,M.Sc. selaku Penguji Utama tugas akhir. Terima kasih atas saran, kritik dan nasehat kepada penulis dalam tugas akhir ini;
8. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung atas ilmu yang telah diajarkan selama ini;
9. Mbak Ning dan jajaran staf administrasi Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
10. Bapak, Ibu, Istri dan Anak ku, serta Kakak-kakak ku dan segenap keluarga besarku tercinta yang telah melimpahkan banyak kasih sayang, kesabaran, semangat, serta doa yang telah diberikan.
11. Seluruh Teknisi dan penghuni Laboratorium Terpadu Teknik Elektro Universitas Lampung.
12. Teman – teman Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung: Jemi Anggara, Insan Hakim, Angga Hidson, Didit Very Kuswoyo, Afandi, Singgih Andriawan, Krnia Harapan, Adi Kurniawan, Djarot, Herliansyah, Frengky Sinaga, Dayat, Irawan Beny, Muhlisin, Novan, Rizky DS, Dedi EK, Rahman, Indra, Gery dan lain-lain atas segala dukungan, motivasi dan selalu

menemani penulis dalam suka maupun duka. Semoga kebersamaan ini tetap terjaga selamanya

13. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu atas bantuan dan dukungannya.

Semoga kebaikan, kemurahan hati dan bantuan yang telah diberikan semua pihak mendapat balasan yang setimpal dari Allah SWT dan semoga hari-hari kita selalu indah dan menjadi lebih baik lagi.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak lepas dari kesalahan dan jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu saran dan kritik yang membangun penulis harapkan demi perbaikan dimasa yang akan datang. Akhirnya, semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 12 Agustus 2016
Penulis,

DEDY IRAWAN

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI..... i

DAFTAR TABEL…. ..... …. iii

DAFTAR GAMBAR…… iv

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang..... 1

B. Tujuan Penelitian..... 2

C. Manfaat Penelitian..... 3

D. Rumusan Masalah..... 3

E. Batasan Masalah 3

F. Hipotesis 4

G. Sistematika Penulisan 4

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Stabilitas Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik..... 6

B. Eksponensial Lyapunov..... 8

C. Eksponen Lyapunov untuk Data Urutan Waktu..... 11

D. Arduino Uno 12

D.1. Pin Masukan dan Keluaran Arduino Uno..... 14

D.2. Sumber Daya dan Pin Tegangan Arduino Uno..... 15

D.3. Arduino *Development Environment* 17

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat 19

B. Alat dan Bahan..... 19

C. Metode Penelitian 20

D. Diagram Alir Penelitian 28

E. Diagram Alir Program 30

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Hasil Sensor Tegangan..... 31

B. Hasil Perhitungan Tegangan Puncak Sesaat Untuk Dua Siklus 35

C. Hasil Perhitungan Tegangan RMS 35

D. Hasil Perhitungan Nilai Eksponen Lyapunov Maksimum..... 39

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN 52

B. SARAN 52

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel Halaman

4.1 Data Tegangan Puncak Sesaat Tiga Siklus 36
4.2 Data Tegangan rms 39

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
2.1	Grafik Kestabilan Lyapunov	10
2.2	Arduino Uno	14
2.3	Arduino *Development Environment*	18
3.1	Skema pengambilan data	21
3.2	Rangkaian sensor tegangan tanpa menaikan titik nol	22
3.3	Rangkaian sensor tegangan dengan menaikan titik nol	25
3.4	Rangkaian alat	26
3.5	Diagram alir penelitian	29
3.6	Diagram alir program	30
4.1	Rangkaian sensor tegangan	31
4.2	Skema rangkaian pengujian	32
4.3	Foto rangkain pengujian	33
4.4	Hasil pengambilan data menggunakan arduino dan *software* plx daq	33
4.5	Grafik tegangan dua siklus	35
4.6	Grafik tegangan rms terhadap waktu	38
4.7	Grafik ELM terhadap waktu dengan N=10	41
4.8	Grafik ELM terhadap waktu dengan N=12	42
4.9	Grafik ELM terhadap waktu dengan N=14	43
4.10	Grafik ELM terhadap waktu dengan N=16	44
4.11	Grafik ELM terhadap waktu dengan N=18	45
4.12	Grafik ELM terhadap waktu dengan N=20	46
4.13	Grafik ELM terhadap waktu dengan N=11	47
4.14	Grafik ELM terhadap waktu dengan N=13	48
4.15	Grafik ELM terhadap waktu dengan N=15	49

4.16 Grafik ELM terhadap waktu dengan N=17 50
4.17 Grafik ELM terhadap waktu dengan N=19 51

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kebutuhan listrik di masyarakat semakin meningkat seiring dengan meningkatnya pemanfaatan tenaga listrik pada peralatan-peralatan rumah tangga, kantor dan sebagainya, sehingga pasokan listrik harus ditambah yakni dengan pembangunan pembangkit listrik baru. Selain tersedianya pembangkitan yang cukup, hal lain yang juga harus ditentukan adalah apakah kondisi peralihan jika terjadi gangguan pada pembangkit akan mengganggu operasi normal sistem atau tidak. Hal ini akan berhubungan dengan kualitas listrik yang sampai ke konsumen berupa kestabilan frekuensi dan tegangan.

Suatu sistem tenaga listrik dapat dinyatakan bekerja dengan baik jika sistem tersebut mampu melayani beban secara kontinu pada tegangan dan frekuensi konstan. Agar dapat bekerja dengan baik, maka sistem tenaga listrik harus memiliki kemampuan untuk menjaga kestabilannya. Kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga kestabilannya dapat dinyatakan sebagai stabilitas sistem tenaga. Stabilitas sistem tenaga merupakan sifat dari suatu sistem tenaga yang memungkinkannya tetap berada pada keseimbangan pada kondisi operasi normal dan mampu untuk kembali seimbang setelah mengalami suatu gangguan. Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat disebabkan oleh berbagai hal dengan

tingkat pengaruh yang beragam pula. Diantara gangguan yang dapat terjadi diantaraya perubahan kondisi sistem yang seketika, yang biasanya terjadi akibat adanya gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik dan pelepasan atau penambahan beban yang besar secara tiba-tiba dapat mengganggu kestabilan yang dimiliki sistem tenaga listrik.

Kestabilan tegangan merupakan salah satu hal yang penting dalam operasi sistem tenaga listrik. Gangguan-gangguan yang terjadi pada operasi sistem tenaga dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan listrik. Selain itu, dampak ketidakstabilan tegangan juga dapat membuat kerusakan pada peralatan–peralatan penyaluran energi listrik dan peralatan-peralatan yang menggunakan energi listrik. Oleh sebab itu, penting untuk mengetahui kestabilan tegangan secara dinamis pada sistem tenaga listrik sehingga keandalan operasi sistem tenaga listrik dapat terjaga. Perkiraan kestabilan tegangan sistem tenaga listrik secara dinamis dapat dilakukan bila data tegangan terhadap waktu tersedia, namun hal ini kadang-kadang tidak dapat dipenuhi.

B. **Tujuan Penelitian**

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui kesetabilan pada jaringan tegangan rendah.
2. Melakukan perkiraan prediksi stabilitas tegangan dinamis dengan menggunakan Eksponen Lyapunov maksimum.

C. Manfaat Penelitian

1. Dapat mengetahui kesetabilan tegangan rendah.

2. Sebagai acuan untuk membangun sistem yang yang lebih stabil.

D. Perumusan Masalah

Kestabilan tegangan merupakan salah satu hal yang penting dalam operasi sistem tenaga listrik. Gangguan-gangguan yang terjadi pada operasi sistem tenaga listrik dapat mempengaruhi kesetabian tegangan. Selain itu, dampak ketidakstabilan tegangan juga dapat membuat kerusakan pada peralatan–peralatan penyaluran energi listrik dan peralatan-peralatan yang menggunakan energi listrik.

Prediksi stabilitas tegangan perlu untuk dilakukan untuk mengetahui perilaku dinamis tegangan terhadap peristiwa gangguan yang terjadi di sistem. Eksponen Lyapunov maksimum adalah metode yang digunakan untuk mengetahui stabilitas tegangan di sistem tenaga listrik. Tegangan akan stabil bila nilai Eksponen Lyapunov maksimum lebih kecil dari nol ($\lambda<0$).

E. Batasan Masalah

1. Analisis ini membahas pada jaringan tegangan rendah.
2. Indikator kestabilan tegangan hanya menggunakan metode Eksponen Lyapunov maksimum.
3. Tidak membahas gangguan sistem.
4. Tidak membahan harmonisa tegangan.

F. Hipotesis Awal

Sering terjadinya ketidakstabilan tegangan pada jaringan tegangan rendah yang sering mengakibatkan peralatan listrik pada rumah tangga rusak.

Eksponen Lyapunov maksimum dapat digunakan untuk menentukan konvergensi atau divergensi antara dua buah lintasan vektor dalam sebuah bidang atau menyatakan stabilitas perubahan dinamis dari suatu sistem terhadap waktu . Oleh karena itu, Eksponen Lyapunov maksimum juga dapat digunakan untuk menentukan stabilitas tegangan sistem tenaga listrik dalam skala waktu.

G. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan penelitian ini terdiri dari beberapa bab, yaitu:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan tentang latar belakang, tujuan, manfaat, rumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang studi literature kesetabilitasan tegangan, Ekpone lyapunov.

BAB III : METODE PENELITIAN

Memuat langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian, diantaranya waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan, komponen dan perangkat penelitian, prosedur kerja, perancangan, dan pengujian sistem.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini berisi mengenai hasil pengujian dan membahas terhadap data-data hasil pengujian yang diperoleh.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini akan menyimpulkan semua kegiatan dan hasil-hasil yang diperoleh selama proses pembuatan dan pengujian sistem serta saran-saran yang sekiranya diperlukan untuk menyempurnakan peneltian berikutnya.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Stabilitas Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik

Salah satu faktor pada kestabilan sistem tenaga adalah stabilitas tegangan. Stabilitas tegangan ialah kemampuan dari sistem untuk menjaga nilai teganggan pada batas yang ditentukan baik sebelum, selama dan setelah terjadi gangguan. Sistem mengalami kondisi tidak stabil ketika terjadi gangguan, perubahan beban. Stabilitas tegangan terbagi menjadi dua, yaitu stabilitas tegangan akibat gangguan yang kecil dan akibat gangguan yang luas. Stabilitas tegangan akibat gangguan kecil ini terjadi akibat gangguan yang kecil atau bersifat lokal, seperti perubahan kenaikan beban di sistem. Sedangakan, stabilitas akibat gangguan besar adalah kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan pada batas operasi yang ditentukan akibat terjadi gangguan yang besifat luas, seperti kesalahan sistem, pelepasan generator, atau kontingensi pada jaringan. Keadaan tersebut membuat sistem harus mendapatkan kembali kestabilannya. Berdasarkan waktu kestabilan tegangan sistem akan kembali dalam waktu cepat atau lama tergantung dari jenis gangguannya. Klasifikasi stabilitas tegangan berdasarkan periode kestabilan dapat dibagi menjadi tiga macam, yaitu stabilitas tegangan jangka pendek, jangka menengah dan jangka panjang. Rentang waktu stabilitas tegangan jangka pendek

adalah 0 sampai 10 detik, jangka menengah adalah antara 10 detik sampai 10 menit, sedangkan jangka panjang lebih dari 10 menit. [1].

Adapun pengaruh ketidakstabilan tegangan dapat menyebabkan beberapa hal pada peralatan listrik antara lain :

- Mengurangi intensitas cahaya keluaran dari lampu listrik yang seterusnya dapat mengakibatkan umur lampu yang lebih pendek.
- Mengurangi efesiensi pada peralatan-peralatan pemanas yang menggunakan listrik.
- Menaikan rugi-rugi daya, memperpendek umur rotor akibat perubahan daya dan torsi pada generator dan motor sinkron.
- Merubah torsi dan slip pada motor induksi yang dapat mengakibatkan getaran yang berlebihan, mengurangi kekuatan mekanis dan memperpendek umur pelayanan motor induksi.
- Mengurangi waktu pelayanan dan efesiensi operasiaonal dari peralatan elektroliser sehingga menaikan operasi dan perawatan.
- Menyebabkan kegagalan komutasi dan merusak komponen sisitem pada peralatan listrik yang menggunakan penyearah.
- Menyebabkan kegagalan fungsi dari peralatan sistem keamanan.
- Menyebabkan operasi tripping yang salah pada relay dan kontaktor.
- Menghasilkan data yang tidak akurat pada peralatan pengujian.
- Menghasilkan kecepatan yang tidak konsisten pada motor-motor listrik.[3].

B. Eksponensial Lyapunov

Suatu peristiwa yang terjadi dalam sebuah sistem akan membuat sistem tersebut mengalami perubahan kondisi. Pada studi kestabilan system perubahan kondisi ini dapat mengakibatkan sistem mengalami ketidakstabilan ataupun sistem mempertahankan kestabilan. Sistem kendali dalam suatu peralatan bertujuan untuk mempertahankan kestabilan sistem di saat terjadi perubahan kondisi. Hal ini sangat penting karena sistem kendali yang tidak stabil dapat mengakibatkan peralatan menjadi rusak. Stabilitas sistem dapat diamati dengan menggunakan suatu teori yang diperkenalkan oleh Alexandr Mikhailovich Lyapunov. Alexandr Mikhailovich Lyapunov mengembangkan sebuah teori yang disebut dengan teori Eksponensial Lyapunov. Eksponen Lyapunov dapat diartikan sebagai perbedaan konvergensi atau divergensi eksponen antara dua buah lintasan vektor di sebuah bidang. Eksonen Lyapunov berfungsi untuk menentukan ketergantungan sebuah sistem terhadap kondisi awalnya. Selain itu, dapat pula untuk memperlihatkan perilaku dinamis sebuah sistem . Oleh sebab itu, maka Eksponensial Lyapunov dapat digunakan untuk menentukan kestabilan suatu system. Dalam studi kestabilan dengan Eksponensial Lyapunov terdapat dua buah lintasan di sebuah bidang.

Kedua lintasan itu digambarkan dengan persamaan

$$x(t) = f^{t}(x_0)$$

dan

$$x(t)+\delta x(t)=f^{t}(x_0+\delta x_0).$$

Sensitivitas terhadap keadaan awal antara kedua lintasan tersebut memenuhi persamaan:

$$\left\| ¢_{i}(t) \right\| \approx e^{a_t} \left\| ¢_{i}(0) \right\| \text{.....}(2.1)$$

di mana λ merupakan jarak antar lintasan dalam sistem atau dikenal dengan Eksponensial Lyapunov.

Persamaan 2.1 di atas dapat ditulis menjadi:

$$a \cong \frac{1}{t} \ln \frac{\left\| ¢(t) \right\|}{\left\| ¢(0) \right\|}$$

dimana:

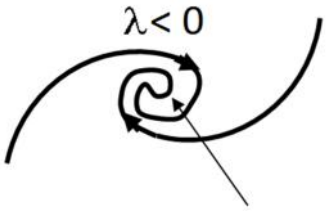
λ = Eksponensial Lyapunov

t = waktu uji

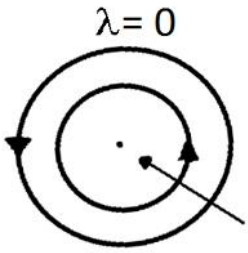
δx(t) = perubahan jarak dalam waktu t

δx(0) = jarak awal

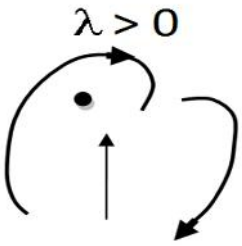
Pengamatan kestabilan dengan eksponensial Lyapunov menghasilkan gambaran apakah sistem stabil asimtotik, stabil marjinal, atau tidak stabil.



a



b



c

Gambar 2.1.

Grafik Kestabilan Lyapunov (a) Stabil (b) Keadaan Tetap dan (c) Tidak Stabil

Stabil adalah sistem yang menuju titik keseimbangan ($\lambda<0$). Sedangkan, keadaan tetap adalah sitem yang stabil netral, yaitu sistem yang konservatif atau tidak mengalami perubahan ($\lambda=0$). Tidak stabil menurut Eksponensial Lyapunov terjadi saat $\lambda>0$, yaitu ketika salah satu lintasan mendekati titik kestabilan dan lintasan yang lainnya menjauhi titik kestabilan atau kedua lintasan sama – sama menjauhi titik kestabilan.[2].

C. Eksponen Lyapunov untuk Data Urutan Waktu

Perubahan stabilitas sistem dapat dianalisis dengan menggunakan Eksponensial Lyapunov maksimum. Pada sistem dinamis yang selalu berubah – ubah dari waktu ke waktu digunakan metode Eksponen Lyapunov untuk data urutan waktu. Eksponen Lyapunov maksimum untuk data urutan waktu didefinisikan sebagai berikut:

$$\lambda(k\Delta t) = \frac{1}{Nk\Delta t}\sum_{m=1}^{N}\ln\frac{\left|V_{(k+m+1)\Delta t} - V_{(k+m)\Delta t}\right|}{\left|V_{(m+1)\Delta t} - V_{m\Delta t}\right|} \quad \text{.....(2.2)}$$

Dimana

$\lambda(k\Delta t)$: nilai eksponen Lyapunov maksimum untuk data ke - $k\Delta t$

N : jumlah panjang sampel data dalam rentang waktu Δt

V : tegangan

Eksponen Lyapunov urutan waktu digunakan untuk analisis stabilitas tegangan dengan membandingkan antara tegangan pada waktu ke t terhadap tegangan sebelumnya. Hal ini sesuai fungsi Eksponen Lyapunov untuk menentukan ketergantungan sistem terhadap kondisi awal. Dalam sistem tenaga listrik stabilitas tegangan dianalisis pada konteks perbandingan tegangan setelah gangguan dalam waktu tertentu terhadap tegangan sebelum ganguan. Setelah terjadi gangguan akan menyebabkan tegangan pada sistem tenaga listrik mengalami ketidakstabilan. Suatu sistem yang memiliki stabilitas tegangan yang

baik harus dapat kembali ke nilai tegangan nominalnya. Dengan demikian, maka Eksponen Lyapunov urutan waktu dapat digunakan untuk menentukan stabilitas sistem tenaga.[2].

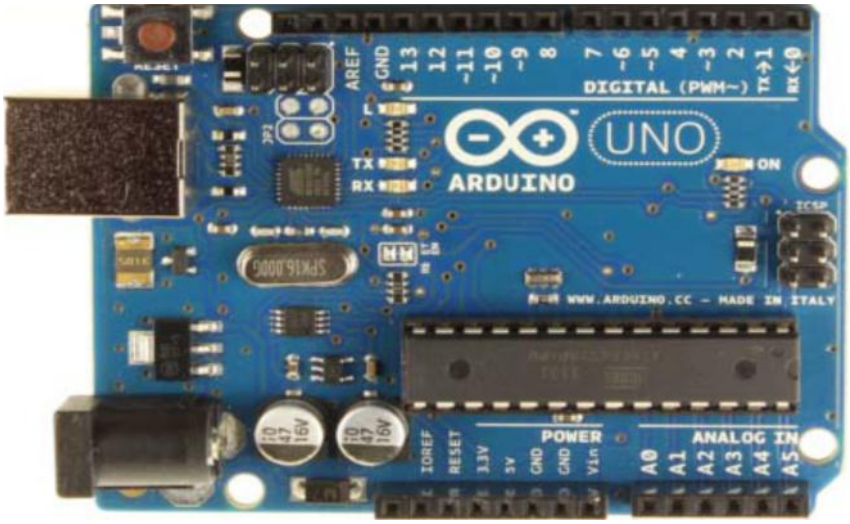
Berdasarkan SPLN No.72 1987 batas toleransi tegangan stabil maksimum 5% diatas tegangan normal dan 10% dibawah tegangan normal yang dalam hal ini merupakan tegangan rendah 220 V.[5].

D. Arduino Uno

Arduino Uno adalah arduino board yang menggunakan mikrokontroler ATmega328. Arduino Uno memiliki 14 pin digital (6 pin dapat digunakan sebagai output PWM), 6 input analog, sebuah 16 MHz osilator kristal, sebuah koneksi USB, sebuah konektor sumber tegangan, sebuah header ICSP dan sebuah tombol reset. Arduino Uno memuat segala hal yang dibutuhkan untuk mendukung sebuah mikrokontroler. Hanya dengan menhubungkannya ke sebuah komputer melalui USB atau memberikan tegangan DC dari baterai atau adaptor AC ke DC sudah dapat membuatnya bekerja. Arduino Uno menggunakan ATmega16U2 yang diprogram sebagai *USB-to-serial converter* untuk komunikasi serial ke computer melalui port USB. Tampak atas dari arduino uno dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Adapun data teknis board Arduino UNO R3 adalah sebagai berikut:

- ✓ Mikrokontroler : ATmega328
- ✓ Tegangan Operasi : 5V
- ✓ Tegangan Input (recommended) : 7 - 12 V
- ✓ Tegangan Input (limit) : 6-20 V
- ✓ Pin digital I/O : 14 (6 diantaranya pin PWM)
- ✓ Pin Analog input : 6
- ✓ Arus DC per pin I/O : 40 mA
- ✓ Arus DC untuk pin 3.3 V : 150 mA
- ✓ Flash Memory : 32 KB dengan 0.5 KB digunakan untuk bootloader
- ✓ SRAM : 2 KB
- ✓ EEPROM : 1 KB
- ✓ Kecepatan Pewaktuan : 16 Mhz



Gambar 2.2 Arduino Uno.[9]

D.1 Pin Masukan dan Keluaran Arduino Uno

Masing-masing dari 14 pin digital arduino uno dapat digunakan sebagai masukan atau keluaran menggunakan fungsi pinMode(), digitalWrite() dan digitalRead(). Setiap pin beroperasi pada tegangan 5 volt. Setiap pin mampu menerima atau menghasilkan arus maksimum sebasar 40 mA dan memiliki resistor *pull-up* internal (diputus secara default) sebesar 20-30 KOhm. Sebagai tambahan, beberapa pin masukan digital memiliki kegunaan khusus yaitu:

- ✓ Komunikasi serial: pin 0 (RX) dan pin 1 (TX), digunakan untuk menerima(RX) dan mengirim(TX) data secara serial.
- ✓ External Interrupt: pin 2 dan pin 3, pin ini dapat dikonfigurasi untuk memicu sebuah interrupt pada nilai rendah, sisi naik atau turun, atau pada saat terjadi perubahan nilai.

- ✓ Pulse-width modulation (PWM): pin 3,5,6,9,10 dan 11, menyediakan keluaran PWM 8-bit dangan menggunakan fungsi analogWrite().
- ✓ Serial Peripheral Interface (SPI): pin 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) dan 13 (SCK), pin ini mendukung komunikasi SPI dengan menggunakan SPI library.
- ✓ LED: pin 13, terdapat built-in LED yang terhubung ke pin digital 13. Ketika pin bernilai HIGH maka LED menyala, sebaliknya ketika pin bernilai LOW maka LED akan padam.

Arduino Uno memiliki 6 masukan analog yang diberi label A0 sampai A5, setiap pin menyediakan resolusi sebanyak 10 bit (1024 nilai yang berbeda). Secara default pin mengukur nilai tegangan dari ground (0V) hingga 5V, walaupun begitu dimungkinkan untuk mengganti nilai batas atas dengan menggunakan pin AREF dan fungsi analogReference(). Sebagai tambahan beberapa pin masukan analog memiliki fungsi khusus yaitu pin A4 (SDA) dan pin A5 (SCL) yang digunakan untuk komunikasi *Two Wire Interface* (TWI) atau *Inter Integrated Circuit* (I2C) dengan menggunakan Wire library.[9]

D.2 Sumber Daya dan Pin Tegangan Arduino Uno

Arduino uno dapat diberi daya melalui koneksi USB (Universal Serial Bus) atau melalui power supply eksternal. Jika arduino uno dihubungkan ke kedua sumber daya tersebut secara bersamaan maka arduino uno akan memilih salah satu sumber daya secara otomatis untuk digunakan. Power supplay external (yang

bukan melalui USB) dapat berasal dari adaptor AC ke DC atau baterai.Adaptor dapat dihubungkan ke soket power pada arduino uno. Jika menggunakan baterai, ujung kabel yang dibubungkan ke baterai dimasukkan kedalam pin GND dan Vin yang berada pada konektor POWER.

Arduino uno dapat beroperasi pada tegangan 6 sampai 20 volt. Jika arduino uno diberi tegangan di bawah 7 volt, maka pin 5V akan menyediakan tegangan di bawah 5 volt dan arduino uno munkin bekerja tidak stabil. Jika diberikan tegangan melebihi 12 volt, penstabil tegangan kemungkinan akan menjadi terlalu panas dan merusak arduino uno. Tegangan rekomendasi yang diberikan ke arduino uno berkisar antara 7 sampai 12 volt.

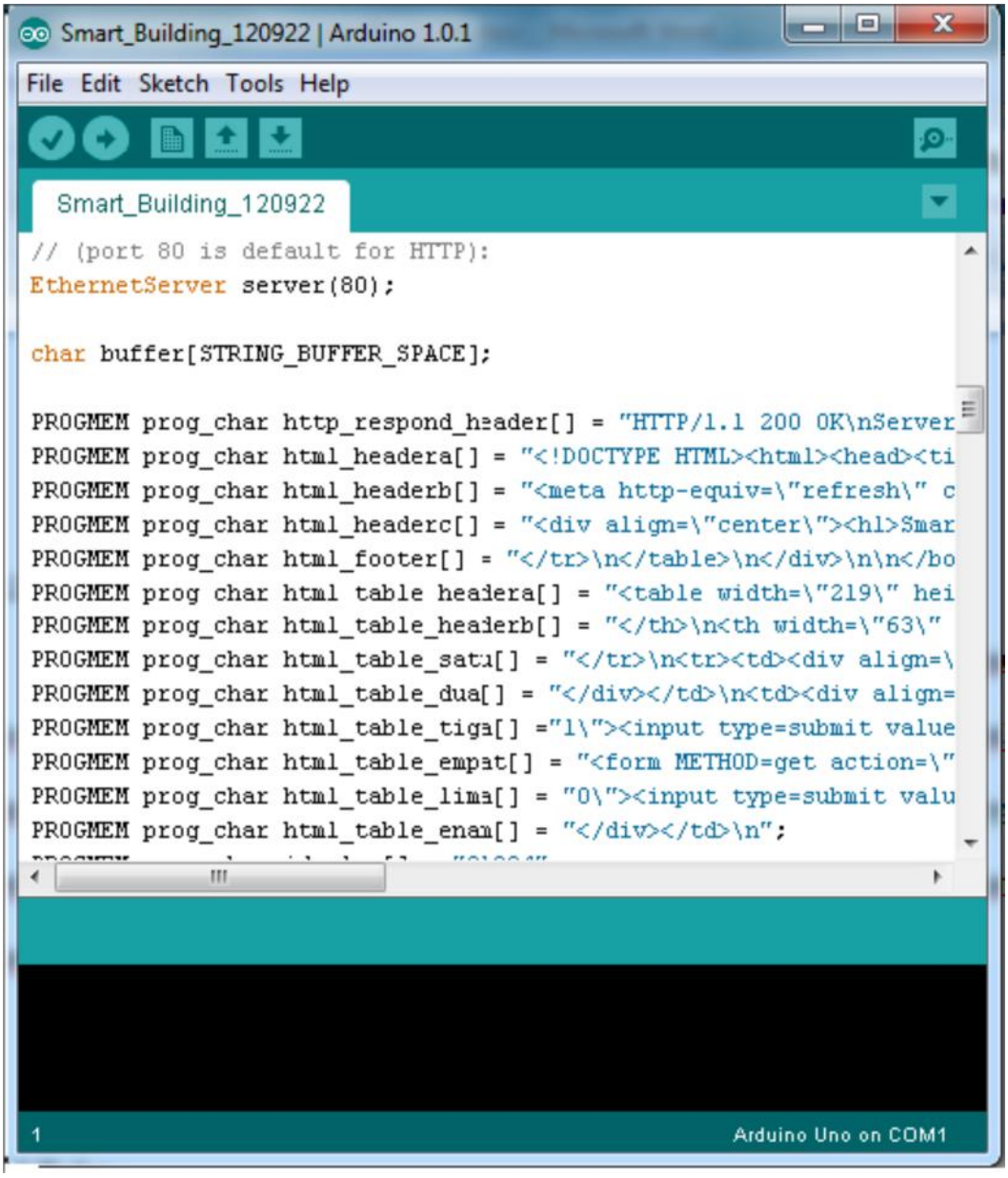
Pin-pin tegangan pada arduino uno adalah sebagai berikut:

- ✓ Vin adalah pin untuk mengalirkan sumber tegangan ke arduino uno ketika menggunakan sumber daya eksternal (selain dari koneksi USB atau sumber daya yang teregulasi lainnya). Sumber tegangan juga dapat disediakan melalui pin ini jika sumber daya yang digunakan untuk arduino uno dialirkan melalui soket power.
- ✓ 5V adalah pin yang menyediakan tegangan teregulasi sebesar 5 volt berasal dari regulator tegangan pada arduino uno.
- ✓ 3V3 adalah pin yang meyediakan tegangan teregulasi sebesar 3,3 volt berasal dari regulator tegangan pada arduino uno.
- ✓ GND adalah pin ground.[9]

D.3 . Arduino *Development Environment*

Arduino *Development Environment* terdiri dari editor teks untuk menulis kode, sebuah area pesan, sebuah konsol, sebuah *toolbar* dengan tomol-tombol untuk fungsi yang umum dan beberapa menu.Arduino *Development Environment* terhubung ke arduino board untuk meng-*upload* program dan juga untuk berkomunikasi dengan arduino board.

Perangkat lunak yang ditulis menggunakan Arduino *Development Environment* disebut *sketch.Sketch* ditulis pada editor teks. *Sketch* disimpan dengan file berekstensi .ino. Area pesan memberikan memberikan informasi dan pesan error ketika kita menyimpan atau membuka *sketch.* Konsol menampilkan output teks dari Arduino *Development Environment* dan juga menampilkan pesanerror ketika kita mengkompile *sketch.* Pada sudut kanan bawah dari jendela Arduino *Development Environment* menunjukkan jenis board dan port seriak yang sedang digunakan. Tombol *toolbar* digunakan utuk mengecek dan mengupload *sketch*, membuat, membuka atau menyimpan *sketch* dan menampilkan *serial monitor*.



Gambar 2.3Arduino *Development Environment*.[9]

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat

1. Waktu Penelitian

   Penulis melakukan kegiatan penelitian tugas akhir ini dilakukan dari bulan April 2016 – Juni 2016.

2. Tempat Penelitian

   Penelitian ini akan dilakukan pada:

   - Laboratorium Sistem Tenaga, Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

B. Alat dan Bahan

1. Bahan Penelitian

   Pada penelitian ini bahan-bahan yang digunakan antara lain:

   - Data tegangan dari hasil pengukuran Mikrokontroler.

2. Alat Penelitian

   Pada penelitian ini peralatan yang digunakan antara lain:

   - Seperangkat komputer
   - Mikrokontroler Arduino

- *Software*Matlab.

C. Metode Penelitian

Dalam penyelesaian penelitian tugas akhir ini ada beberapa langkah kegiatan yang dilakukan sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi Masalah

   Di tahap ini penulis mengidentifikasi permasalahan yaitu belum adanya analisis untuk mengestimasi tegangan jangka pendek.

2. Studi Literatur

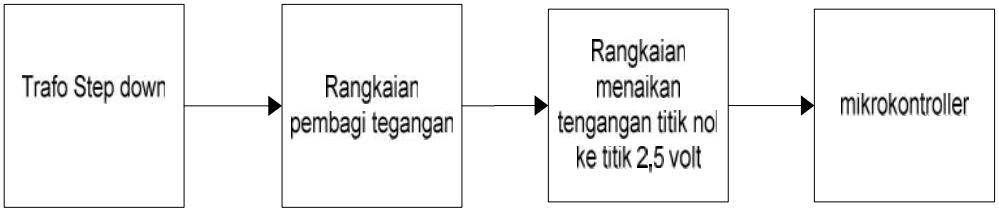
   Ini merupakan tahapan di mana penulis mengumpulkan dan mempelajari tentang estimasi tegangan. Studi literatur dimaksudkan untuk mempelajari berbagai sumber referensi atau teori (buku dan internet) yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir sebagai dasar dalam mengerjakan tugas akhir ini.

3. Studi Bimbingan

   Berbentuk tanya jawab dan bimbingan dengan dosen pembimbing mengenai masalah-masalah yang timbul selama pengerjaan serta penulisan penelitian tugas akhir berlangsung.

4. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dilakukan untuk keperluan mengambil data tegangan urutan waktu.Pada tahap ini sensor tegangan yang dibuat terdiri trafo *step-down* dan rangkaian pembagi tegangan hal ini bertujuan agar tegangan yang masuk ke mikrokontroler arduino tidak melebihi 5 volt dc.



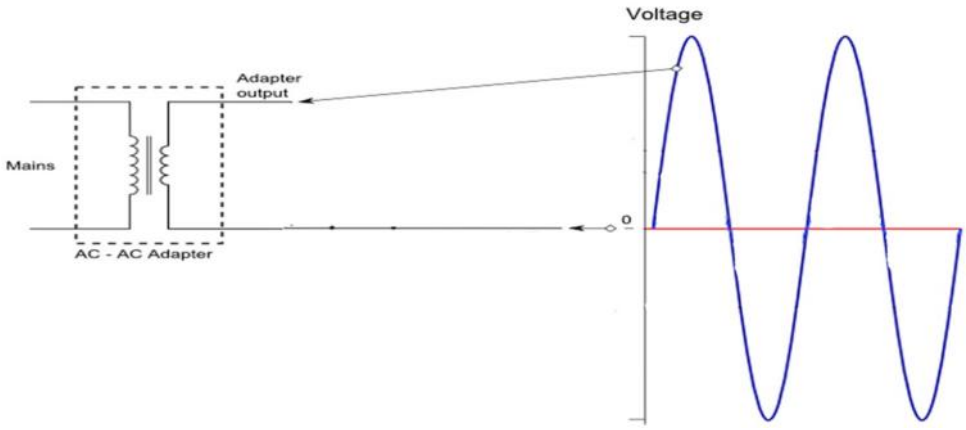
Gambar 3.1 Skema pengambilan data

Pada gambar 3.1 trafo *step-down* berfungsi menurunkan tegangan sebesar 220 VAC menjadi tegangan 12 vott AC dan kemudian output dari sisi sekunder trafo dihubungkan pada rangkaian pembagi tegangan yang berfungsi sebagai penurun tegangan hingga mencapai 1 VAC selanjutnya dihubungkan ke rangkaian penaik titik nol hal ini bertujuaan agar sinyal tegangan yang masuk sebagai ADC mikrokontroler tetap terdeteksi sebagai sinyal tegangan sinusoidal dan tetap masih bisa terbaca oleh mikrokontroler dikarenakan nilai yang dihasillkan adalah nilai tegangan positif. Sinyal yang diproses oleh mikrokontroler akan dibaca oleh serial port komputer dan memasukan sinyal-sinyal tersebut ke *software* plx.

5. Rancangan Sensor Tegangan

Sensor tegangan yang digunakan pada tugas akhir ini adalah trafo stepdown dengan input tegangan 220 VAC dan output tegangan 12 VAC. Tahap dan langkah yang dilakukan agar sensor tegangan dapat di baca oleh mikrokontroller arduino adalah dengan mengubah tegangan VAC menjadi tegangan VDC namun untuk dapat membaca sinyal tegangan dengan bentuk gelombang sinusoidal maka dilakukan dengan menaikan titiknol pada rangkaian sensor tegangan.

Rangkaian sensor tegangan tanpa menaikan titik nol dapat dilihat pada gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2 Rangkaian sensor tegangan tanpa menaikan titik nol

Setelah di didapat sinyal tegangan maka tahap selanjut nya adalah dengan menurunkan sinyal tegangan yang dihasilkan trafo agar tidak merusak mikrokontroller yaitu tegangan di bawah 5V.

Untuk dapat menurunkan tegangan dari trafo maka di tambahkan rangkaian pembagi tegangan dan rangkaian penaik titik nol. Hal ini bertujuan agar tegangan yang masuk ke mikrokontroller tidak lebih dari 5V dan juga tidak menghasilkan tegangan negative.

Rangkaian penaik titik nol digunkan resistor R3=R4 yaitu 1 K Ohm dengan input tegangan 5 VDC yang di hubungkan langsung pada kaki mikrokontroller dan tegangan output pada masing-masing resistor adalah sebagai berikut :

VR3 = R3 / (R3 + R4) x V Input

VR3 = 1k / (1k + 1k) x 5 V

VR3 = 2.5 VDC

VR4 = R4 / (R4 + R3) x V Input

VR4 = 1k / (1k + 1k) x 5 V

VR4 = 2.5 VDC

Dari hasil perhitungan terlihat bahwa tegangan yang dihasilkan pada masing-masing resistor adalah sama yaitu 2.5 Vdc.

Rangkaian pembagi tegangan di pasang dua buah resistor dengan besar hambatan R1 1 Kohm dan R2 10 KOhm dengan perhitungan pada masing-masing titik resistor adalah sebagai berikut :

Diket

V input= 12 V

R1 = 1 K

R2 = 10 K

V R2 = ?

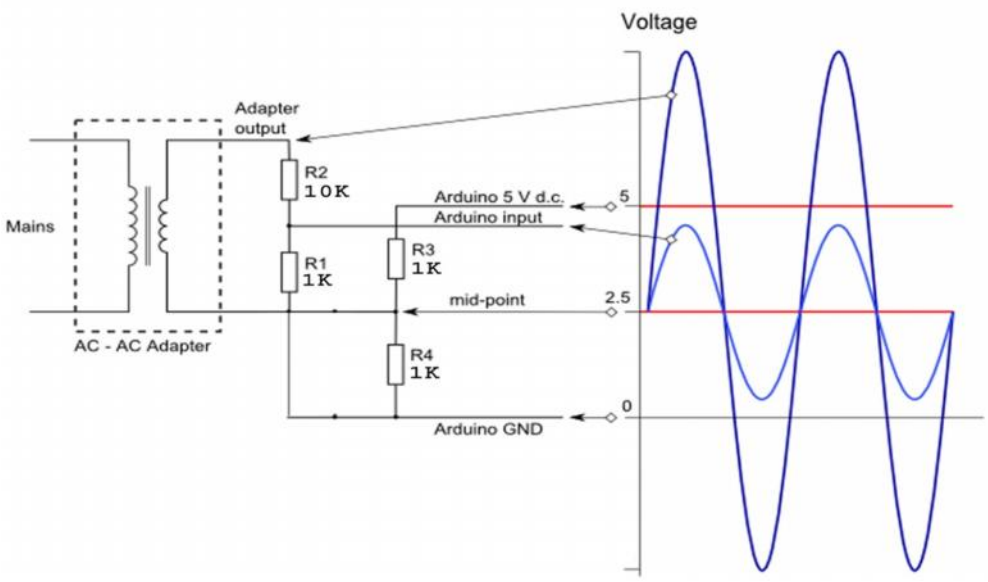
VR1 = R1 / (R1 + R2) x V input

VR1 = 1k / (1k + 10k) x 12V

VR1= 1.09V

Dari perhitungan di dapat bahwa tegangan yg di hasilkan pada titik R1.

Jika kedua keseluruhan rangkaian di gabungkan maka sinyal yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.3 Rangkaian sensor tegangan dengan menaikan titik nol

Pada gambar 3.3 terlihat bahwa sinyal yang masuk ke mikrokontroller.

Tegangan pembagi tegangan mikrokontroller yaitu 2.5 + tegangan yang dihasilkan pembagi tegangan trafo 1.09

Sehingga didapat tegangan keseluruhan sebesar

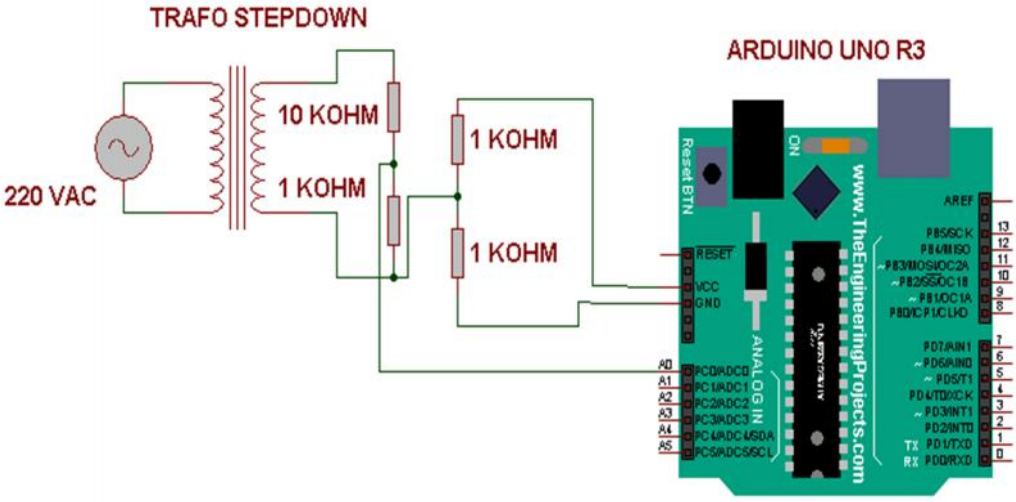
2.5+1.09 = 3.59 V

Dan pada saat tegangan trafo menjadi negative maka tengangan yang dihasilkan adalah

2.5+(-1.09) = 1.41 V.

Sehingga tegangan yang dihasilkan dapat dibaca mikrokontrroller.

Gambar rangkaian keseluruhan pada tugas akhir ini dapat dilihat pada gambar 3.4



Gambar 3.4 Rangkaian alat

6. Pengumpulan Data

Langkah selanjutnya yang dilakukan penulis adalah mengumpulkan data – data yang diperlukan dalam penulisan tugas akhir ini. Data – data yang dikumpulkan berasal dari hasil pengukuran jaringan tegangan rendah menggunakan mikrokontroler Arduino.

Data-data yang dihasilkan oleh mikrokontroler Arduino biasanya merupakan data ADC. Tegangan sesaat biasanya merupakan nilai tegangan puncak sesaat dan besar tegangan sesaat dari konversi nilai ADC dinyatakan dengan:

$$V_p = FP \times Nilai\ ADC \quad \text{.....(3.1)}$$

Dimana FP adalah faktor pengali yang besarnya merupakan perbandingan nilai ADC dengan tegangan puncak sesaat arus bolak-balik pada sisi primer transformator step-down.

Tegangan puncak sesaat biasanya dirubah ke tegangan rms dengan perhitungan :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^{N} V_p^2}{N}} \quad \text{.....(3.2)}$$

Dimana:

$V_{rms} =$ tegangan efektif (rms).

$V_p =$ tegangan puncak sesaat.

$N =$ jumlah sampel data.

Skala waktu satu data tegangan rms yang diperoleh sama dengan skala waktu total dari N sampel data.

7. Pembuatan Program dan Simulasi Data

Program komputer dibuat dengan menggunakan bahasa pemrograman (*software*) MATLAB. Beberapa perhitungan yang diprogram antara lain:

- Perhitungan tegangan rms dari data tegangan sesaat hasil konversi nilai ADC.
- Perhitungan nilai Eksponen Lyapunov maksimum.

Penelitian tahap berikutnya berlanjut ke prosessimulasi. Simulasi dilakukan untuk memperoleh:

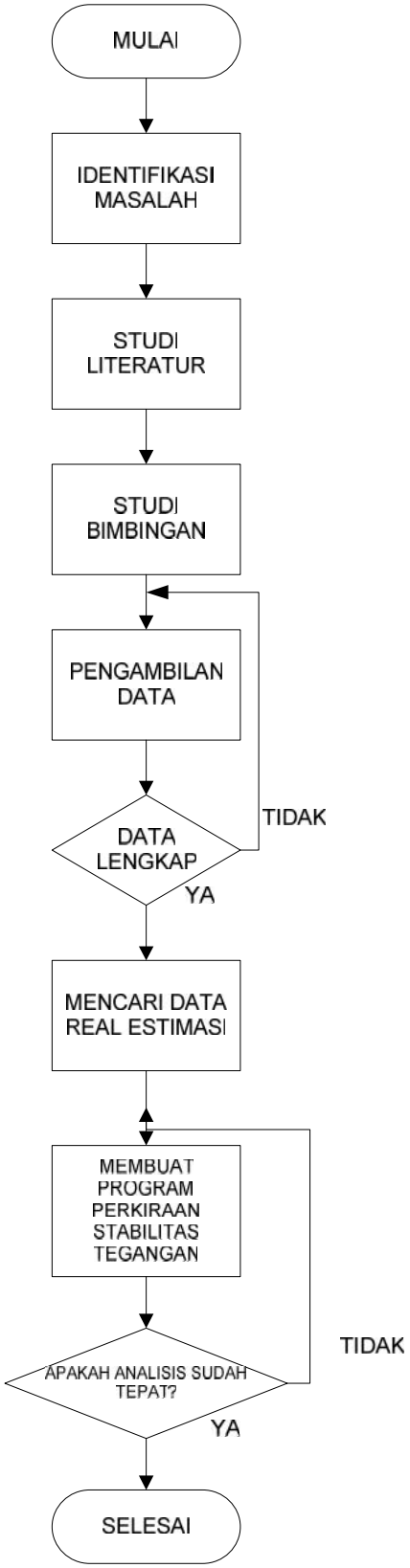
- Hubungan tegangan puncak terhadap waktu dari keseluruhan data yang diperoleh.
- Hubungan tegangan rms terhadap waktu untuk keseluruhan data.
- Nilai Eksponen Lyapunov maksimum terhadap waktu.

8. Analisa

Langkah berikut adalah tahapan terakhir dalam tugas akhir ini. Dari hasil simulasi akan didapatkan hasil perkiraan stabilitas tegangan menggunakan Eksponen Lyapunov maksimum lalu menganalisa hasil simulasi yang telah dilakukan.

D. Diagram Alir Penelitian

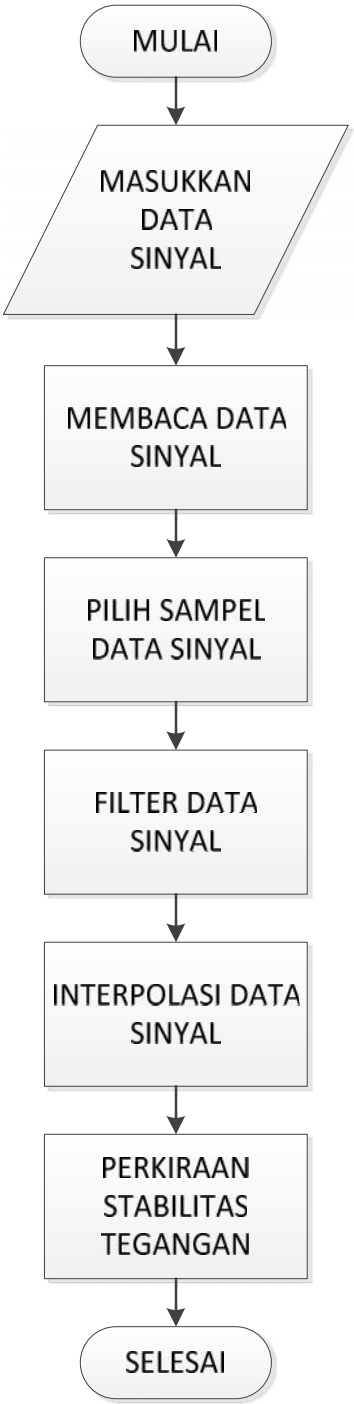
Berikut merupakan diagram alir dari penelitian tugas akhir yang penulis lakukan:



Gambar 3.5. Diagram alir penelitian

E. Diagram Alir Program

Berikut merupakan diagram alir dari penelitian tugas akhir yang penulis lakukan:



Gambar 3.6. Diagram Alir Program

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari tugas akhir ini antara lain:

1. Eksponen Lyapunov maksimum dapat memperkirakan ketidakstabilan tegangan pada jaringan tegangan rendah secara dinamis.
2. Eksponen Lyapunov maksimum dapat memperkirakan ketidakstabilan fluktuasi tegangan meskipun nilai tegangan berada pada batas operasi yang diizinkan.
3. Ukuran atau jumlah sampel data mempengaruhi nilai indikator Eksponen Lyapunov maksimum dalam memperkirakan kestabilan tegangan terdapat pada tabel lampiran hasil perhitungan ELM .

B. Saran

1. Perlunya memperhatikan perhitungan nilai tegangan rms dengan jumlah data per satu siklus yang berbeda-beda.
2. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan secara *online* dan *real-time* dengan memasukkan perhitungan nilai eksponen Lyapunov maksimum pada program di mikrokontroler.

3. Dalam pengambilan datanya, supaya menggunakan alat berbasis mikrokontroler yang pembacaan datanya lebih presisi.

DAFTAR PUSTAKA

[1]. C. W. Taylor, "*Power System Voltage Stability*", McGraw-Hill, 1994.

[2]. P. Kundur, "*Power System Stability and Control*", McGraw-Hill, 1994.

[3]. Anderson, L.M., and Bowes, K.B., "*The Effects of Power Line Disturbances onConsumer Electronic Equipment*", IEEE Transaction on Power Delivery, vol.5, no.2,pp.1062-1065,1990.

[4] IEEE Commitee, 2002, *Effects of Nonsinusoidal Supply on Voltage Tolerance ofEquipment*, IEEE Power Engineering Review, vol.22, no.7, pp.46-47.

[5]. PT. PLN Persero, "*Standar PLN No.72 tahun 1987 tentang Spesifikasi Desain Untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR)*", 4 Juli 1987.

[6]. E.P. Suomalainen and J. Hallstrom, "*An Accurate Asynchronous Calculation Method for Evaluating Peak and RMS Values for Sampled Data*", Conference on Precision Electromagnetic Measurement Digest, pp.372-373, 8-13 June 2008.

[7]. S. Dasgupta, M. Paramasivam, U. Vaidya and V. Ajjarapu, "*PMU-based Model-Free Approach for Short Term Voltage Stability*", IEEE Power Energy Society General Meeting pp.1-8, 22-26 July 2012.

[8]. S. Dasgupta, M. Paramasivam, U. Vaidya and V. Ajjarapu, "*Real-Time Monitoring of Short-Term Voltage Stability Using PMU-Data*", IEEE Transaction on Power System vol. 28 no.4, pp. 3702-3711, November 2013.

[9]. http://www.arduino.cc