

TUGAS AKHIR - EE 184801

**IDENTIFIKASI DAN ANALISA PENURUNAN KUALITAS DAYA
PADA SISTEM KELISTRIKAN KERETA REL LISTRIK (KRL) DI
STASIUN UI MENGGUNAKAN METODOLOGI ALIRAN DAYA
*NEWTON RAPHSON***

Fauzan Andi Fadhlullah
NRP 07111240007002

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.
Dr. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc.

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**IDENTIFIKASI DAN ANALISA PENURUNAN KUALITAS DAYA PADA
SISTEM KELISTRIKAN KERETA REL LISTRIK (KRL) DI STASIUN UI
MENGUNAKAN METODOLOGI ALIRAN DAYA *NEWTON
RAPHSON***

Fauzan Andi Fadhlullah
NRP 07111240007002

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.
Dr. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc.

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



FINAL PROJECT - EE 184801

**IDENTIFICATION AND DECREASE OF POWER QUALITY
ANALYSIS ON ELECTRIC RAILWAY NETWORK IN UI STATION
BASED ON NEWTON RAPHSON METHODE NEWTON RAPHSON**

Fauzan Andi Fadhlullah
NRP 07111240007002

Advisor
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.
Dr. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “IDENTIFIKASI DAN ANALISA PENURUNAN KUALITAS DAYA PADA SISTEM KELISTRIKAN KERETA REL LISTRIK (KRL) DI STASIUN UI MENGGUNAKAN METODOLOGI ALIRAN DAYA *NEWTON RAPHSON*” adalah benar-benar hasil karya intelektual sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya orang 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 dengan peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2019



Fauzan Andi Fadhlullah
NRP. 07111240007002

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

**IDENTIFIKASI DAN ANALISA PENURUNAN
KUALITAS DAYA PADA SISTEM KELISTRIKAN
KERETA REL LISTRIK (KRL) DI STASIUN UI
MENGUNAKAN METODOLOGI ALIRAN DAYA**

NEWTON RAPHSON

TUGAS AKHIR

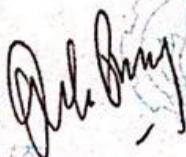
**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

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

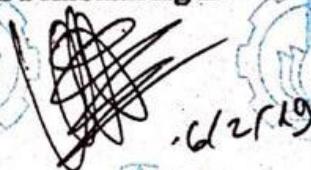
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



**Prof. Ir. Ontoseno
Penangasang, M.Sc. Ph.D.
NIP. 194907151974121001**

Dosen Pembimbing II



**Dr. Vita Lystianingrum
Budiharto Putri, ST., M.Sc.
NIP. 198208292006042001**



.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

IDENTIFIKASI DAN ANALISA PENURUNAN KUALITAS DAYA PADA SISTEM KELISTRIKAN KERETA REL LISTRIK (KRL) DI STASIUN UI MENGGUNAKAN METODOLOGI ALIRAN DAYA NEWTON RAPHSON

Fauzan Andi Fadhlullah
07111240007002

Dosen Pembimbing I : Prof.Ir.Ontoseno Penangsang,M.Sc.,PhD
Dosen Pembimbing II : Dr. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST.,
M.Sc.

Abstrak :

Penggunaan Kereta Rel Listrik (KRL) di wilayah JABODETABEK memiliki banyak sekali kelebihan diantaranya efisiensi waktu, bebas macet, bebas polusi, harga yang murah dan daya tampung penumpang yang tinggi. Namun, KRL yang di supply dari PLN melalui gardu-gardu traksi nya, akan mempengaruhi kualitas daya listrik pada sistem kelistrikan *utility* . Masalah yang akan timbul diantaranya harmonisa, pf yang rendah, dan rendahnya kualitas tegangan, yang mana hal ini merupakan ancaman bagi keamanan peralatan dan peningkatan biaya tagihan listrik PLN. Penggunaan *rectifier* pada gardu traksi dan intensitas pengoperasian KRL merupakan penyebab utama terjadinya masalah kualitas daya. Sebagai contoh dalam kasus kebakaran pada gardu traksi Universitas Indonesia pada tahun 2009 yang diprediksi akibat dari harmonisa ke tiga. Dalam tugas akhir ini, analisa kualitas daya berupa harmonisa, pf, serta kualitas tegangan dan usulan perbaikannya akan di simulasikan pada *software* ETAP. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa pemasangan filter penala tunggal pada orde 5 dan ode 7 menurunkan nilai harmonisa rata-rata yaitu dari 16.76% menjadi 3.97 %, serta pemasangan kapasitor bank menaikkan pf yang kurang dari 85% menjadi diatasnya. Sedangkan *undervoltage* dapat diatasi dengan mengubah setting TAP transformer.

Kata kunci : Kereta Rel Listrik (KRL), Kualitas Daya (PQ), Harmonisa, Filter pasif harmonis

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

IDENTIFICATION AND DECREASE OF POWER QUALITY ANALYSIS ON ELECTRIC RAILWAY NETWORK IN UI STATION BASED ON NEWTON RAPHSON METHODE

Fauzan Andi Fadhlullah
07111240007002

Promotor I : Prof.Ir.Ontoseno Penangsang,M.Sc.,PhD
Promotor II : Dr. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc.

Abstract :

The use of the Electric Railway (KRL) in the JABODETABEK region has many advantages, free of traffic jams, pollution-free, low prices and high capacity. However, KRL which is supplied from PLN through its traction substations, will affect the quality of electric power in the utility electricity system. Problems that will arise are harmonics, low, and low voltage quality, which is a necessity for PLN electricity and electricity equipment. The use of rectifiers on the traction substation and KRL operation is a major cause of power quality problems. The example in the case of fire at the University of Indonesia traction substation in 2009 was predicted as a result of the third harmonic. In this final project, the analysis of power quality in the form of harmonics, pf, and the quality of stresses and casualties will be simulated in the ETAP software. The results of simulations that are installed on a single tuner filter on order 5 and ode 7 reduce the average harmonic value, which is from 16.76% to 3.97%, and also bank capacitors increase pf which is less than 85% to above. While undervoltage can be overcome by changing the TAP transformer settings.

Keywords: *Electric Railway (KRL), Power Quality (PQ), Harmonics, Passive Harmonics Filter.*

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, syukur yang tiada henti penulis panjatkan kehadirat Allah SWT serta tidak lupa sholawat serta salam semoga tetap tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW sehingga penelitian dalam tugas akhir ini bisa berjalan lancar dan selesai tepat pada waktunya.

Selama pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak, dan penulis sampaikan rasa terima kasih. Terima kasih yang sebesar-besarnya juga penulis sampaikan kepada berbagai pihak yang mendukung dan membantu dalam tugas akhir ini, diantaranya:

1. Kedua orang tua yang senantiasa memberikan do'a, nasihat, motivasi, dukungan dan karena keberadaan merekalah penulis tetap semangat untuk menyelesaikan penelitian ini.
2. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D. dan Dr. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., selaku dosen pembimbing, atas dukungan moril serta bimbingan, inspirasi, pengarahan, dan motivasi yang diberikan selama pengerjaan penelitian tugas akhir ini.
3. Seluruh dosen-dosen Departemen Teknik Elektro, khususnya dosen-dosen bidang studi Teknik Sistem Tenaga.
4. Pak Suryadi, Ibu Vio, selaku serta seluruh karyawan bidang Listrik Aliran Atas PT. Kereta Commuter Indonesia yang telah menerima dan membantu kelancaran penelitian tugas akhir ini.
5. Teman-teman kontrakan dan keluarga besar CSSMoRA ITS, dan teman-teman e53, e54, dan e52 atas dukungan moriil maupun materil.
6. Rekan-rekan yang banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis sadar bahwa Tugas Akhir ini masih belum sempurna dan masih banyak hal yang perlu diperbaiki. Saran, kritik dan masukan baik dari semua pihak sangat membantu penulis terutama untuk berbagai kemungkinan pengembangan lebih lanjut.

Terakhir, penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak dan dapat membantu pengembangan tentang Studi kualitas daya pada KRL kedepannya.

Surabaya, 01 Desember 2018
Fauzan Andi Fadhlullah

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TUGAS AKHIR	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
KATA PENGANTAR.....	IX
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR.....	XIV
DAFTAR TABEL	XV
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 TUJUAN.....	2
1.3 BATASAN MASALAH.....	2
1.4 METODOLOGI.....	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN.....	3
1.6 RELEVANSI.....	4
BAB II.....	5
ALIRAN DAYA NEWTON RAPHSON & KUALITAS DAYA	5
2.1 ANALISA ALIRAN DAYA.....	5
2.1.2 ANALISA ALIRAN DAYA NEWTON RAPHSON.....	6
2.1.3 FUNGSI NONLINEAR DENGAN N VARIABEL.....	8
2.1.4 PENYELESAIAN ALIRAN DAYA DENGAN METODE NEWTON-RAPHSON	10
2.2 KUALITAS DAYA	17
2.1 ANALISA ALIRAN DAYA NEWTON RHAPSON	18
2.2 FAKTOR DAYA	18
2.3.1 PENGERTIAN.....	18
2.3 KOMPENSASI DAYA REAKTIF	19
2.4 HARMONISA	21
2.5.1 PENGERTIAN HARMONISA DAN PERHITUNGAN	21
2.6 BESARAN HARMONISA	25
2.6.1 FAKTOR DISTORSI ARUS DAN TEGANGAN.....	25
2.6.2 TOTAL HARMONIC DISTORTION (THD)	26
2.7 SUMBER HARMONIK.....	27
2.7.1 KONVERTER.....	27

2.8	TANUR BUSUR LISTRIK	28
2.8.1	TRANSFORMATOR.....	28
2.8.1	MESIN-MESIN BERPUTAR	29
2.8.2	PENGARUH HARMONISA	29
2.9	RESONANSI	29
2.9.1	PENGARUH PADA MESIN-MESIN BERPUTAR	31
2.9.2	PENGARUH PADA SALURAN TRANSMISI	32
2.9.3	PENGARUH PADA TRANSFORMATOR	33
2.9.4	PENGARUH PADA KAPASITOR BANK.....	33
2.9.5	PENGARUH PADA RELE PENGAMAN	34
2.10	FILTER HARMONISA.....	34
2.10.1	FILTER PASIF	35
2.10.1.1	SINGLE TURNED FILTER.....	35
2.8.1.1	FILTER DENGAN PENALAAAN GANDA	36
2.11	KOMPONEN FILTER	37
2.11.1	KAPASITOR.....	37
2.12	INDUKTOR.....	38
2.13	PENGARUH IMPEDANSI JARINGAN TERHADAP EFEKTIFITAS FILTER.....	38
BAB III	41
SISTEM KELISTRIKAN PENCATU KERETA REL LISTRIK		
STASIUN UI		41
3.1	KERETA REL LISTRIK DAN SISTEM PENCATU NYA.	41
3.2	MODEL SISTEM KELISTRIKAN GARDU TRAKSI STASIUN UI	42
3.3	ALIRAN DAYA SISTEM KELISTRIKAN DAN IDENTIFIKASI FAKTOR DAYA PADA STASIUN UI	43
3.4	SUMBER-SUMBER HARMONISA PADA SISTEM KELISTRIKAN GARDU TRAKSI STASIUN UI	44
3.5	LANGKAH MEREDAM ARUS HARMONISA DAN KOREKSI PF, UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS DAYA PADA STASIUN UI	45
BAB IV	49
SIMULASI DAN ANALISIS.....		49
4.1	SIMULASI ETAP POWER STATION 12.6.0	49
4.1.2	ANALISA LOAD FLOW DAN EVALUASI.....	49

4.1.3 HARMONISA PADA SISTIM KELISTRIKAN GARDU LISTRIK UI	55
4.1.4 ANALISA IMPEDANSI UNTUK MITIGASI RESONANSI	59
4.2 DESAIN FILTER DAN KAPASITOR BANK	61
4.3 SIMULASI SAAT TAK BERBEBAN DAN TERHUBUNG FILTER	66
BAB V	69
PENUTUP	69
5.1 KESIMPULAN	69
5.2 SARAN	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	73
BIODATA PENULIS	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Hubungan Arus	18
Gambar 2. 2 Hubungan Daya.....	19
Gambar 2. 3 Ilustrasi Perbaikan PF.....	20
Gambar 2. 4 Diagram Fasor Kompensasi Daya Reaktif	21
Gambar 2. 5 Gelombang Terdistorsi karena Harmonisa	22
Gambar 2. 6 Ilustrasi Rangkaian Sistem Tenaga Listrik	23
Gambar 2. 7 Rangkaian STL Beban non Linear Sebagai Sumber	23
Gambar 2. 8 Ilustrasi Resonansi Paralel Pada Point of Common Coupling	30
Gambar 2. 9 Rangkaian resonansi seri	31
Gambar 2. 10 Rangkaian ekivalen motor induksi untuk harmonisa ke N	32
Gambar 2. 11 Rangkaian filter penalaan tunggal.....	35
Gambar 2. 12 Kurva Impedansi filter terhadap frekuensi	35
Gambar 2. 13 Rangkaian filter penalaan ganda	36
Gambar 3. 1 Sistem Pencatu DC Pada KRL.....	41
Gambar 3. 2 Komponen KRL	42
Gambar 3. 3 Diagram Langkah-Langkah mereduksi Harmonisa	46
Gambar 4. 1 Simulasi Berbeban dan Tidak Terhubung Filter	51
Gambar 4. 2 Simulasi Tak Berbeban Tidak Terhubung Filter	54
Gambar 4. 3 Spektrum Harmonisa Bus 2	57
Gambar 4. 4 Spektrum THD Bus 4	57
Gambar 4. 5 Spektrum TDH bus 6.....	58
Gambar 4. 6 Spektrum THD Seluruh Sistem	58
Gambar 4. 7 Sinus Tegangan Tiap Bus	58
Gambar 4. 8 Analisa Harmonisa Pada Sistem	59
Gambar 4. 9 Karakteristik Impedansi Bus 2.....	60
Gambar 4. 10 Karakteristik Impedansi Bus 6.....	60
Gambar 4. 11 Simulasi Setelah Pemasangan Filter	64
Gambar 4. 12 Simulasi Setelah Pemasangan Filter dan Kapasitor Bank	65
Gambar 4. 13 Simulasi Tak Berbeban & Terhubung Filter	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar Batas THD _v	26
Tabel 2. 2 standar Batas THD _i	26
Tabel 3. 1 Aliran Daya 1	43
Tabel 3. 2 Aliran Daya 2	44
Tabel 3. 3 Aliran Daya 3	44
Tabel 3. 4 Aliran Daya 4	44
Tabel 3. 5 Aliran Daya 5	44
Tabel 4. 1 Load Flow dari ETAP.....	50
Tabel 4. 2 Magnitude Tegangan & PF Dibawah Standar	50
Tabel 4. 3 Perbaikan Bus Undervoltage.....	52
Tabel 4. 4 Load Flow Kondisi Tak Berbeban	54
Tabel 4. 5 Profil Tegangan Harmonisa (IHD) yang melebihi standar ...	55
Tabel 4. 6 Distorsi total harmonisa THD	56
Tabel 4. 7 Spesifikasi Filter Orde 5	62
Tabel 4. 8 Spesifikasi Filter Orde 7	64
Tabel 4. 9 Harmonisa Sesudah Pemasangan Filter	65
Tabel 4. 10 Magnitude Tegangan dan PF Sesudah dan Sebelum Pemasangan Kapasitor	65

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kereta Rel Listrik (KRL) merupakan salah satu alat transportasi masal yang dapat diandalkan untuk mengatasi kemacetan lalu lintas ibu kota dan sekitarnya. Setiap harinya, KRL rata-rata mengangkut satu juta penumpang. KRL di suplai oleh tegangan 1500 V DC melalui sistem *catenary* atau Listrik Aliran Atas (LAA) [4]. Sedangkan LAA disuplai oleh gardu traksi yang mana gardu traksi yang digunakan ialah gardu traksi jenis DC.

Kereta Rel Listrik (KRL) di wilayah JABODETABEK memiliki banyak sekali kelebihan diantaranya efisiensi waktu, bebas macet, bebas polusi, harga yang murah dan daya tampung penumpang yang tinggi. Namun, KRL yang di supply dari PLN melalui gardu-gardu traksi nya, akan mempengaruhi kualitas daya listrik pada sistem kelistrikan *utility*[1].

Pemasangan gardu traksi untuk suplai KRL akan menyebabkan masalah pada kualitas daya listrik , pemasangan converter pada gardu traksi akan menimbulkan masalah diantaranya timbulnya harmonisa. Hal ini akan menyebabkan menurunnya kualitas daya listrik dan memanasnya peralatan gardu [1]. Jika dibiarkan, akan merusak peralatan listrik. Contoh telah terjadi kebakaran trafo pada gardu traksi di stasiun KRL-UI pada tahun 2009 , karena efek harmonisa [4].

Efek kualitas daya pertama yang akan dibahas ialah harmonisa. Harmonisa adalah gelombang –gelombang sinus dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi sumber, yang apabila digabungkan dengan gelombang sinus dengan frekuensi sumber, akan menghasilkan gelombang yang terdistorsi (non sinus) [3]. Harmonisa juga bisa diartikan sebagai gelombang yang terdistorsi. Harmonisa terjadi karena beban-beban yang non linear. Dalam tugas akhir ini akan dibahas harmonisa yang terjadi karena adanya sistem elektronika daya yaitu *silicon rectifier* yang bekerja sebagai *switching* . proses *switching* tersebut jarang berhimpit dengan *zero crossing* dari gelombang sumber, sehingga mengakibatkan timbulnya pulsa-pulsa arus. Sifat non-linear rangkaian tersebut mengakibatkan tegangan yang murni sinus , arus yang dihasilkan akan berbentuk non sinus dan mengandung harmonisa.

Efek yang kedua dan yang ketiga yaitu faktor daya. Faktor daya atau yang sering disebut dengan $\cos \phi$ adalah perbandingan daya aktif

(kW) P dengan daya total (kVA) S, atau cosinus sudut antara daya aktif dan daya total. Untuk mencari faktor daya dari suatu sistem, digunakan rumus aliran daya, yang dalam Tugas akhir kali ini menggunakan metode *Newthon Raphson* dan dibantu dengan ETAP. Dalam segitiga daya, daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut ini, dan hasil faktor daya akan semakin rendah. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu. Secara teoritis, jika beban daya yang dipasok PLN memiliki faktor daya satu, daya maksimum yang ditransfer akan sama dengan kapasitas pendistribusian. Dengan kata lain, yang dikirim, akan sama dengan yang diterima tanpa losses. Sesuai dengan standar PLN, faktor daya minimal ialah 85%, jika kurang maka akan dikenakan denda.

1.2 Tujuan

1. Mengidentifikasi dan menganalisa kualitas daya pada sistem kelistrikan traksi Stasiun Universitas Indonesia. Berupa harmonisa, faktor daya.
2. Menyimulasikan sistem kelistrikan pada Software ETAP, sehingga dapat diketahui gangguan harmonisa yang timbul, dan mencocokkan dengan standar yang ada.
3. Mengidentifikasi besaran frekuensi harmonisa, THDv, serta pada sistem traksi stasiun UI.
4. Merancang filter pasif harmonisa sesuai standar IEEE 519-1992.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah Kualitas daya yang akan dibahas tugas akhir ini ialah

1. Simulasi dan analisis harmonisa, faktor daya menggunakan *software* ETAP 12.6.0
2. Evaluasi penurunan kualitas daya berupa harmonisa, faktor daya, dan level tegangan pada sistem kelistrikan traksi stasiun UI
3. Perancangan filter pasif harmonisa berdasarkan standar IEEE 519-1992

1.4 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dasar teori yang menunjang dalam penulisan tugas akhir. Dasar teori ini dapat diambil dari buku-buku, jurnal, prosiding, dan artikel-artikel di internet.

2. Pengumpulan Data
Setelah mempelajari literatur yang ada maka dilakukan pengumpulan data-data seperti data Single Line Diagram , data spesifikasi dan rating peralatan, untuk penyelesaian tugas akhir.
3. Simulasi Sistem
Setelah mendapatkan data yang dibutuhkan, selanjutnya adalah mengolah data dalam bentuk simulasi untuk mengetahui kondisi gangguan harmonisa pada sistem kelistrikan tersebut menggunakan ETAP 12.6.0
4. Analisa
Dari hasil simulasi yang ada, berupa karakteristik gangguan harmonisa dari sistem kelistrikan, akan dilakukan analisa dan dicocokkan dengan teori yang ada
5. Penyusunan buku tugas akhir
Buku disusun berdasarkan aturan yang telah ditentukan dan telah melalui proses revisi sebelumnya.

1.5 Sistematika Penulisan

- Bab I : Pendahuluan yang membahas latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan dari tugas akhir ini.
- Bab 2 : Teori penunjang yang menjelaskan tentang kualitas daya , standar dari kualitas suatu daya, penjelasan tentang gangguan-gangguan yang menyebabkan turunnya kualitas daya
- Bab 3 : Perancangan dan pembuatan simulasi sistem kelistrikan traksi UI, guna mengidentifikasi gangguan harmonisa dan PF yang ada
- Bab 4 : Analisa hasil dari simulasi, serta mencocokkan dengan teori yang ada, serta perancangan filter harmonisa
- Bab 5 : Merupakan bab penutup yang berisi kesimpulan dan saran dari hasil analisis dan pembahasan pada bab-bab sebelumnya.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat berikut:

1. Memberikan evaluasi penurunan kualitas daya pada sistem kelistrikan traksi stasiun UI, berupa faktor daya dan gangguan harmonisa
2. Agar PT KAI-Commuter Line dapat menanggulangi permasalahan kualitas daya ini, agar dapat menekan kerugian,
3. Memberi masukan kepada konsultan perancang sistem kelistrikan untuk merencanakan filter yang telah di hitung dan di analisa disini
4. Sebagai media pembelajaran kepada mahasiswa atau umum, untuk mengamati penurunan kualitas daya serta penanganannya.

BAB II

ALIRAN DAYA NEWTON RAPHSON & KUALITAS DAYA

2.1 ANALISA ALIRAN DAYA

Analisis aliran daya sangat penting untuk perencanaan sistem yang baru maupun untuk pengembangan sistem di masa mendatang. Dengan menggunakan simulasi dan analisis, aliran daya dapat diperoleh informasi mengenai akibat interkoneksi dengan sistem tenaga listrik lainnya, akibat beban, *fault*, perubahan pembebanan pembangkit, serta perubahan konfigurasi sistem. Adapun metode perhitungan aliran daya adalah menggunakan metode iterasi *Gauss-Sidel*, *Newton Raphson* dan *Fast Decoupled*. Adapun data yang diperoleh dari studi aliran daya adalah untuk mengetahui:

1. Aliran Daya Aktif dan aliran daya reaktif pada setiap saluran.
2. Tegangan dan sudut pada setiap bus
3. Kerja dari pada sistem tenaga.

Sebelum masuk pada metode *Newton Raphson* terlebih dahulu akan dijelaskan mengenai bentuk umum persamaan aliran daya, yang mana sebagai acuan utama dalam menyelesaikan permasalahan aliran daya. dari persamaan aliran daya, akan dilakukan perhitungan dengan berbagai macam metode, pada tugas akhir ini, menggunakan metode *Newton Raphson*.

2.1.2 Bentuk Umum Persamaan Aliran Daya

Adapun bentuk umum dari persamaan aliran daya yang ditulis dalam bentuk daya ialah sbb:

$$P_i - jQ_i = (V_i^*) \sum_{j=1}^n (Y_{ij} V_j) \quad (2.1)$$

Persamaan diatas merupakan aliran daya statis dengan besaran dalam bentuk kompleks, oleh karena itu, terdapat $2n$ persamaan dimana n adalah jumlah bus. Adapun persamaan pada sisi kanan bisa menggunakan bentuk rectangular dan bentuk polar, rectangular berbentuk

$$V_i e_i + j f_i$$

Sedangkan untuk persamaan aliran daya bentuk Rectangular yaitu:

$$\begin{aligned} P_i &= e_i \left(\sum_{j=1}^n ((G_{ij} e_j - B_{ij} f_j)) \right) - f_i \left(\sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \right) \\ Q_i &= f_i \left(\sum_{j=1}^n ((G_{ij} e_j - B_{ij} f_j)) \right) - e_i \left(\sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Sedangkan dalam bentuk polar :

$$\begin{aligned} V_i &= |V_i| e^{j\theta_i} \\ &= |V_i| \angle \theta_i \end{aligned}$$

Sedangkan untuk persamaan Polar aliran daya berbentuk:

$$\begin{aligned} P_i &= |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \\ Q_i &= |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Persamaan aliran daya polar diatas, akan digunakan sebagai referensi persamaan utama untuk mencari nilai aliran daya, yang dalam pada tugas akhir ini menggunakan metoda aliran daya newton Raphson.

2.1.2 Analisa Aliran Daya Newton Raphson

Setelah mendapatkan persamaan umum aliran daya, maka perlu dilakukan perhitungan agar dapat mengetahui nilai variable yang akan di cari, seperti sudut, tegangan di bus lainnya dan daya di bus lainnya. Termasuk daya masuk dan daya keluarnya. Metode newton raphson, digunakan untuk menghitung persamaan yang diperoleh dengan proses iterasi. Metode ini banyak digunakan untuk menyelesaikan persamaan non linier. Dengan NR perasmaan non linear di ubah ke dalam bentuk linear dan digunakan untuk menentukan olui dari perasmaan nonlinear tersebut. Metode ini dapat diterapkan untuk menentukan satu besaran

yang tidak diketahui dalam satu persamaan, atau sistem dengan sejumlah persamaan dengan besaran yang tidak diketahui yang jumlahnya sama dengan jumlah persamaannya. Untuk mengetahui dasar dari neton raphson terlebih dahulu harus memahami newton raphson dalam mencari akar yang sederhana contoh pada fungsi non linear dengan satu variabel. Diberikan $F(x) = 0$ sebagai persamaan nonlinier. Setiap nilai x yang memenuhi $F(x) = 0$ adalah akar dari $F(x)$, untuk mendapatkan akar tertentu, diperlukan perkiraan awal untuk x pada sekitar nilai akar tersebut. Dengan perkiraan awal yaitu x_0 ,

$$F(x_0) = \Delta F_0 \quad (2.4)$$

Dimana ΔF_0 adalah kesalahan (*error*) bila x_0 bukan akar dari $F(x)$. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.3. Garis singgung ditarik pada titik di kurva yang sesuai dengan x_0 , dan diproyeksikan sampai memotong sumbu x untuk menentukan perkiraan kedua dari akar dan seterusnya sampai nilai ΔF_0 lebih kecil dari indeks presisi yang ditentukan (toleransi). Garis singgung pada proses ini diberikan oleh:

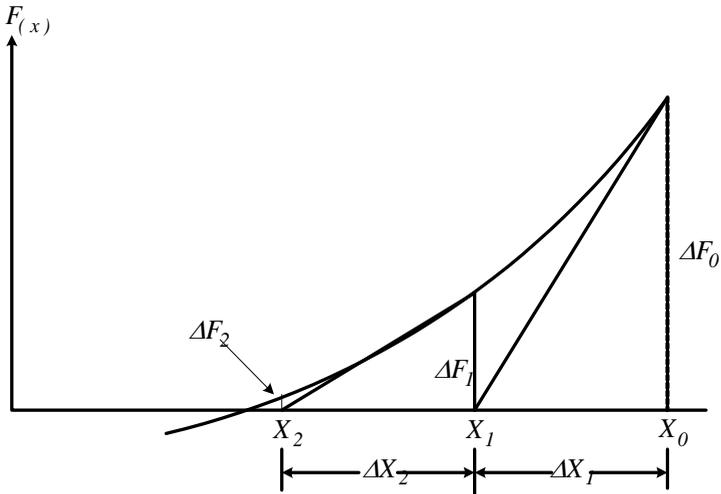
$$y(x) = F(x_n) + F'(x_n)(x - x_n) \quad (2.5)$$

Dimana bila $y(x) = 0$, diberikan rumus untuk perkiraan nilai akar pada setiap iterasi:

$$\begin{aligned} x_{n+1} \\ = x_n - \frac{F(x_n)}{F'(x_n)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Proses ini ditunjukkan pada contoh 4.4 berikut ini,

$$F(x) = x^3 - 64$$



Gambar 2.1. Ilustrasi metode Newton-Raphson.

2.1.3 Fungsi Nonlinear dengan N variabel

Konsep dimensi tunggal dari metode Newton-Raphson dapat diperluas sampai dimensi N . Dalam hal ini diperlukan analogi dimensi N dari turunan pertama dengan menggunakan matrik Jacobian. Setiap baris dari $N \times N$ matrik Jacobian terdiri dari turunan parsial salah satu persamaan nonlinear dari sistem.

Untuk memahami konsep ini, digunakan contoh khusus untuk $N = 2$. Asumsikan bahwa diketahui dua persamaan nonlinear F_1, F_2 . Maka

$$F_1(x_1, x_2) = 0 \quad F_2(x_1, x_2) = 0 \quad (2.7)$$

matrik Jacobian untuk sistem 2×2 adalah

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Bila matriks Jacobian secara numerik dievaluasi pada titik $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$, maka hubungan linier untuk perubahan kecil $(\Delta x_1, \Delta x_2)$ diberikan pada persamaan :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(1)} \\ \Delta x_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_1^{(0)} \\ \Delta F_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Algoritma rekursif dapat dikembangkan untuk perhitungan vektor $(\Delta x_1, \Delta x_2)$. Setiap perubahan kecil $(\Delta x_1, \Delta x_2)$ adalah penyelesaian untuk persamaan linier yang saling berhubungan. Dengan menggunakan perkiraan awal yang benar, algoritma ini akan konvergen dan diperoleh penyelesaian dari persamaan nonlinier tersebut. Bila $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$, adalah perkiraan awal. Kemudian kesalahannya adalah

$$\begin{aligned} \Delta F_1^{(0)} &= -F_1[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}], \\ \Delta F_2^{(0)} &= -F_2[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Matrik Jacobian di evaluasi pada penyelesaian percobaan di titik $[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}]$. Setiap elemen dari matriks Jacobian dihitung dari rumus aljabar untuk turunan parsial yang sesuai dengan menggunakan $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}$. Maka,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1^{(0)}}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1^{(0)}}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2^{(0)}}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2^{(0)}}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(1)} \\ \Delta x_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_1^{(0)} \\ \Delta F_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Pada sistem dengan persamaan linier kemudian diselesaikan secara langsung untuk koreksi pertama. Koreksi tersebut kemudian ditambahkan ke variable pada iterasi awal (no1) untuk memperoleh nilai variable pada iterasi pertama:

$$\begin{bmatrix} x_1^{(1)} \\ x_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} \\ x_2^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(1)} \\ \Delta x_2^{(1)} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Persamaan (2.11) dan (2.12) akan ditulis kembali menggunakan symbol matriks dan *superscript* umum h untuk menunjukkan proses iterasi:

$$[j^{h-1}][\Delta x^h] = [\Delta F^{h-1}] \quad (2.13)$$

$$x^h = x^{h-1} + \Delta x^h \quad (2.14)$$

Algoritma ini diulangi sampai ΔF^h memenuhi angka toleransi tertentu. Pada hampir semua masalah yang diselesaikan dengan algoritma ini dapat digunakan toleransi sangat mendekati nol.

2.1.4 Penyelesaian Aliran Daya dengan Metode *Newton-Raphson*

Terdapat beberapa cara yang berbeda dalam penerapan metode Newton-Raphson untuk menyelesaikan persamaan aliran daya (*load flow*). Dalam hal ini biasa digunakan persamaan aliran daya bentuk *rectangular*, *polar* atau *hybrid* seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.1. Sebagaimana telah dijelaskan untuk setiap bus generator (kecuali slack bus) memiliki persamaan daya aktif P_i dan sudut fasa yang tidak diketahui θ_i . Persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta P_i = P_i^{sch} - P_i = 0 \quad (2.15)$$

Untuk setiap bus beban yang memiliki persamaan daya aktif P_i dan reaktif Q_i dimana $|V_i|$ dan θ_i yang tidak diketahui. Kedua persamaan tersebut dituliskan dalam bentuk :

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_i^{sch} - P_i = 0 \\ Q_i &= Q_i^{sch} - Q_i = 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Pada persamaan di atas, *superscript* “sch” menunjukkan daya aktif atau reaktif yang telah dijadwalkan atau ditentukan pada bus i . Bila digunakan persamaan aliran daya dalam bentuk polar,

$$P_i = |V_i| \sum_{j=0}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij})$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j=0}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \quad (2.17)$$

Konsep-konsep diatas akan dijelaskan dengan menggunakan sistem pada contoh

Kembali ke contoh 4.1, dimana bus 2 adalah bus generator dan bus 3 adalah bus beban, berikut ini adalah tiga persamaan aliran daya bentuk *hybrid* dengan tiga variabel yang belum diketahui yaitu θ_2 , θ_3 , dan $|V_3|$.

$$\Delta P_2 = 17 - [5.061 - 4.5|V_3| \cos(\theta_3 - \theta_2) - 11.25|V_3| \sin(\theta_3 - \theta_2)] = 0$$

$$\Delta P_3 = -2[4.5 |V_3| \cos \theta_3 + 5|V_3| \sin \theta_3 - 4.5|V_3| \cos(\theta_2 - \theta_3) - 11.25|V_3| \sin(\theta_2 - \theta_3) + 8|V_3|^2] = 0$$

$$\Delta Q_3 = -1 - [5 |V_3| \cos \theta_3 + 4|V_3| \sin \theta_3 + 11.25|V_3| \sin(\theta_2 - \theta_3) - 4.5|V_3| \cos(\theta_2 - \theta_3) - 15|V_3|^2] = 0$$

Selanjutnya metode *Newton-Raphson* digunakan untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya. Variable yang belum diketahui diperoleh dari penyelesaian persamaan sistem linier berikut ini.

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} (\Delta \theta_2) + \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} (\Delta \theta_3) + \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} (\Delta |V_3|) = \Delta P_2$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} (\Delta \theta_2) + \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} (\Delta \theta_3) + \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} (\Delta |V_3|) = \Delta P_3$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} (\Delta \theta_2) + \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} (\Delta \theta_3) + \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} (\Delta |V_3|) = \Delta Q_3$$

Untuk menyederhanakan perhitungan, bagian ketiga pada setiap persamaan diubah untuk memperoleh besaran $(\Delta |V_3|/|V_3|)$. Dengan demikian diperoleh,

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} (\Delta \theta_2) + \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} (\Delta \theta_3) + \left(|V_3| \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} \frac{\Delta |V_3|}{|V_3|} \right) &= \Delta P_2 \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} (\Delta \theta_2) + \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} (\Delta \theta_3) + \left(|V_3| \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} \frac{\Delta |V_3|}{|V_3|} \right) &= \Delta P_3 \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} (\Delta \theta_2) + \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} (\Delta \theta_3) + \left(|V_3| \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} \frac{\Delta |V_3|}{|V_3|} \right) &= \Delta Q_3 \end{aligned}$$

Dalam bentuk matrik menjadi,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & |V_3| \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & |V_3| \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} & |V_3| \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \frac{\Delta |V_3|}{|V_3|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Penyelesaian untuk $\Delta \theta_2, \Delta \theta_3$ dan $\Delta |V_3|/|V_3|$ digunakan untuk menentukan perkiraan baru pada iterasi ke $(n + 1)$, yaitu :

$$\begin{aligned} \theta_2^{(n+1)} &= \theta_2^{(n)} + \Delta \theta_2 \\ \theta_3^{(n+1)} &= \theta_3^{(n)} + \Delta \theta_3 \\ |V_3|^{(n+1)} &= |V_3|^{(n)} + \Delta |V_3| \end{aligned}$$

Untuk elemen Jacobian matriks digunakan notasi berikut ini,

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} N_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j|$$

$$J_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} N_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j|$$

Dengan demikian, bentuk umum dari penyelesaian persamaan aliran daya dengan metode *Newton-Raphson* dapat ditulis:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \left(\frac{\Delta |V_3|}{|V_3|} \right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Evaluasi dari turunan

Berikut adalah persamaan aliran daya dalam bentuk polar yang diberikan pada persamaan (4.27) sebagai berikut:

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij})$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij})$$

Turunan pertama dari P_i terhadap θ_i adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -|V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij})$$

Dengan menggunakan persamaan (4.27b), diperoleh

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -[Q_i - |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin(-\Psi_{ii})]$$

Selanjutnya diperoleh

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ii}$$

Turunan pertama dari P_i terhadap θ_j , $j \neq i$ adalah

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \quad (j \neq i)$$

Untuk menghindari fungsi trigonometri digunakan bentuk *rectangular* untuk memperoleh

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = a_{ij}f_i - b_{ij}e_i, \quad (j \neq i)$$

dengan

$$\begin{aligned} a_{ij} &= G_{ij}a_j - B_{ij}f_j \\ b_{ij} &= G_{ij}f_j + B_{ij}e_j \end{aligned}$$

turunan pertama dari Q_i terhadap θ_i adalah

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = |V_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij})$$

dengan menggunakan persamaan (4.27a) diperoleh

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = (P_i - |V_i|^2 |Y_{ii}| \cos \Psi_{ii})$$

kemudian

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = P_i - |V_i|^2 (G_{ii})$$

turunan pertama dari Q_i terhadap $\theta_j, j \neq i$, adalah

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \quad (j \neq i)$$

untuk menghindari ekspansi trigonometri, digunakan bentuk *rectangular* untuk memperoleh

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta_i} = -a_{ij}e_i - b_{ij}f_i,$$

turunan pertama dari P_i terhadap $|V_i|$ adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \Psi_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij})$$

disederhanakan menjadi

$$|V_i| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = P_i + |V_i|^2 (G_{ii})$$

selanjutnya diperoleh

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \quad (j \neq i)$$

dikalikan dengan $|V_j|$ diperoleh

$$|V_i| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij})$$

disederhanakan menjadi

$$|V_i| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = a_{ij} e_i + b_{ij} f_i$$

untuk daya reaktif adalah

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \sin \Psi_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij})$$

dikalikan dengan $|V_i|$, diperoleh

$$|V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = Q_i - |V_i|^2 (B_{ii})$$

akhirnya diperoleh

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \quad (j \neq i)$$

disederhanakan menjadi

$$|V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = a_{ij} f_i - b_{ij} e_i$$

dengan menggunakan notasi dari elemen Jacobian matriks diperoleh :

$$\begin{aligned}
 H_{ij} &= L_{ij} = a_{ij}f_i - b_{ij}e_i \\
 N_{ij} &= -J_{ij} = a_{ij}e_i + b_{ij}e_i & j \neq i \\
 H_{ii} &= -Q_i - B_{ii}V_i^2 \\
 L_{ii} &= Q_i - B_{ii}V_i^2 \\
 N_{ii} &= P_i + G_{ii}V_i^2 \\
 J_{ii} &= P_i - G_{ii}V_i^2
 \end{aligned}$$

dimana,

$$\begin{aligned}
 a_{ij} &= G_{ij}e_j - B_{ij}f_j \\
 b_{ij} &= G_{ij}f_j + B_{ij}e_j
 \end{aligned}$$

Bila digunakan bentuk *rectangular* dari persamaan aliran daya.

$$\begin{aligned}
 P_i &= (e_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + (f_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j + B_{ij}f_j) \\
 Q_i &= (f_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + (e_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j + B_{ij}f_j)
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan variable a_{ij} dan b_{ij} , diperoleh

$$\begin{aligned}
 P_i &= (e_i) \sum_{j=1}^n a_{ij} + (f_i) \sum_{j=1}^n b_{ij} \\
 Q_i &= (f_i) \sum_{j=1}^n a_{ij} + (e_i) \sum_{j=1}^n b_{ij}
 \end{aligned}$$

Dapat disimpulkan bahwa cara menggunakan metode newton raphson yaitu

1. Menentukan besaran yang diketahui dan yang tidak diketahui seperti tegangan, sudut, dan daya
2. Membuat Y bus
3. Menentukan rumus aliran daya (rectangular, polar, hybrid)
4. Menghitung nilai jacobian matrix dengan input fungsi dari aliran daya yang tersedia

5. Hasil jacobian matrix dimasukkan ke dalam rumus metode newton raphson , dan melakukan iterasi hingga pada ketelitian yang diinginkan

Penerapan pada keadaan nyata di lapangan cara manual menghitung iterasi newton raphson sangat tidak efektif dan lama sekali, serta dibutuhkan ketelitian yang tinggi dalam menghitung . maka dari itu diperlukan software untuk menghitung iterasi, bisa menggunakan matlab, atau ETAP karna dalam library sudah tersedia metode newton raphson. Pada Tugas akhir kali ini perhitungan aliran daya newton raphson pada ETAP, Metode Newton-Raphson memiliki perhitungan lebih baik untuk sistem tenaga yang lebih besar dan tidak linier, karena lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang dibutuhkan sedikit untuk memperoleh pemecahan berdasarkan ukuran sistem. Metode ini lebih disukai karena konvergensinya jauh lebih cepat dan persamaan aliran dayanya dirumuskan dalam bentuk polar.

2.2 Kualitas Daya^[3]

Karakteristik Daya yang mengalir ke suatu sistem kelistrikan memiliki suatu kualitas, dimana baik buruknya suatu kualitas daya, tergantung oleh suatu acuan dan standar yang ada. Kualitas daya listrik adalah tingkat kualitas dari jaringan listrik dan tingkat efesiensi dari penggunaan energi. Kualitas daya listrik memiliki tiga komponen utama yaitu kontinuitas, level tegangan, dan efesiensi energi. Sedangkan permasalahan kualitas daya yaitu segala permasalahan pada tegangan, arus atau frekuensi, yang meyebabkan kegagalan (hubung singkat) , atau kegagalan pengoperasian peralatan pelanggan. Adapun parameter kualitas daya yang harus diperhatikan yaitu, faktor daya, level tegangan, frekuensi daya, harmonisa, kedip tegangan, ketidaksetimbangan , *transients*, dan *sag (dip) and swell*, dalam Tugas akhir ini, akan di bahas tentang faktor daya, harmonisa, dan level tegangan.

Identifikasi kualitas daya sangatlah diperlukan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan peralatan listrik, karena dewasa ini, peralatan-peralatan kelistrikan dibuat semakin kritis terhadap spesifikasi dan sensitif, hal ini terjadi agar peralatan kelistrikan semakin murah dan terjangkau.

Salah satu faktor yang menyebabkan penurunan kualitas daya listrik ialah beban yang non linear. Beban bisa dikatan non- linear apabila arus yang diserap tidak memiliki gelombang yang sama (non-sinus)

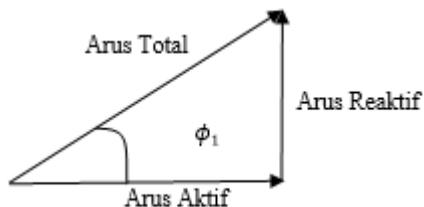
dengan tegangan supply (mengandung harmonisa). Contoh beban non linear ialah saat motor *start*, transformator saat kondisi *switch on*, karena memerlukan arus yang besar saat start, serta beban-beban yang memakai sistem elektronika daya (*Silicon Rectifier, IGBT, MOSFET* etc) karena saat proses *switching*, jarang berhimpit dengan *zero crossing*, sehingga menimbulkan arus-arus sisa yang kembali ke sistem. Kegunaan daripada kualitas daya ialah untuk menjaga peralatan listrik agar tidak mengalami kerusakan sehingga dapat beroperasi secara optimal dan meminimalkan pengeluaran biaya, dalam hal ini *maintainance* dan pergantian alat

2.1 Analisa Aliran Daya Newton Rhapson

2.2 Faktor Daya[3]

2.3.1 Pengertian

Faktor daya adalah perbandingan daya aktif (P) dan daya Semu (S). Peralatan listrik pada umumnya memiliki dua komponen arus yang di serap, arus yang dikonversikan oleh suatu peralatan, pada umumnya menjadi panas cahaya atau daya mekanik. Satuan daya yang dihasilkan adalah watt, adapun komponen arus yang diserap lainnya yaitu arus magnetisasi, disebut juga *watless*, Merupakan arus yang diperlukan untuk membangkitkan fluks untuk pengoperasian peralatan elektromagnetis. Jika arus magnetis tidak ada, maka energy tidak mengalir melalui trafo atau menembus celah udara pada motor induksi. Arus magnetisasi ini mempunyai satuan yang disebut VAR.



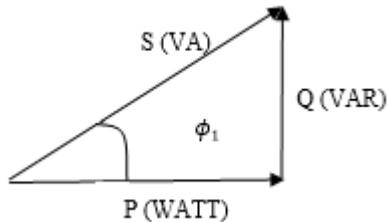
Gambar 2. 1 Hubungan Arus

Pada gambar diatas dapat dilihat fasor diagram kedua komponen tersebut, penjumlahan dua komponen arus tersebut menghasilkan arus total yang dapat di tarik persamaannya sebagai berikut :

$$I_t \text{ (arus total)} = \sqrt{(\text{Arus aktif})^2 + (\text{Arus reaktif})^2} \quad (2.19)$$

$$I_t = \sqrt{(I \cdot \cos \theta)^2 + (I \cdot \sin \theta)^2}$$

Pada saat ada tegangan V, maka akan ada daya , yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya total (segitiga daya) membentuk hubungan vector yang sama.



Gambar 2. 2 Hubungan Daya

Dari gambar diatas dapat ditarik penjumlahan vector sbb:

$$S (\text{daya semu}) = \sqrt{P(\text{Daya aktif})^2 + Q(\text{Daya reaktif})^2}$$

$$S (VA) = \sqrt{(VI \cdot \cos \theta)^2 + (VI \cdot \sin \theta)^2} \quad (2.20)$$

Sederhananya faktor daya merupakan perbandingan daya aktif (P) dan daya total (S), nilai dari faktor daya berkisar 0 s/d 1 , atau biasanya dinyatakan dalam persen. Biasa juga dilambangkan dengan $\cos \phi$ dengan persamaan sbb:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (2.21)$$

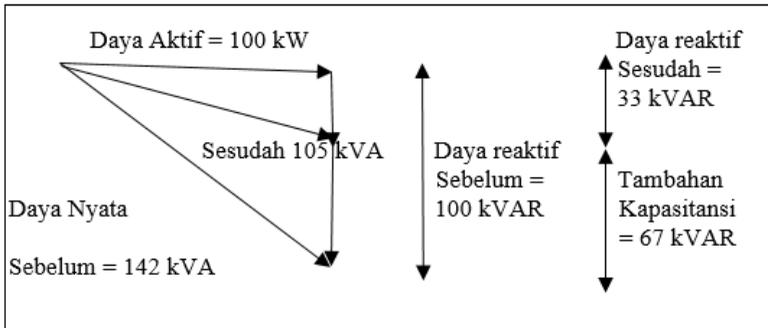
Semakin $\cos \phi$ mendekati 1 maka semakin sedikit daya reaktif yang dipasok oleh perusahaan listrik.

Menurut Standar PLN (70-1) batas $\cos \phi$ yang diizinkan ialah 85%, jika dibawah 85% yang terhubung pada jala-jala PLN , akan dikenakan denda. Namun ada beberapa cara yang bisa dilakukan untuk memperbaiki $\cos \phi$ daya, seperti perbaikan faktor daya dengan kompensasi daya menggunakan kapasitor bank atau filter.

2.3 Kompensasi Daya Reaktif

Jika faktor daya tak sampai 85% , maka perlu dilakukan perbaikan faktor daya, cara memperbaiki faktor daya pada dasarnya mengurangi

atau menyerap daya reaktif (Q) pada daya mengalir di beban, dapat dilihat pada gambar dibawah ini, jika Q diserap, maka sudut daya akan turun dan melancip. Artinya cos phi mendekati 1 dan daya total yang disalurkan semakin sedikit. Seperti pada ilustrasi dibawah ini, 100 kW dan cos phi 0.7 Pada gambar 6, segitiga daya menunjukkan faktor daya 0,70 untuk 100 kW (daya aktif) beban induktif. Daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban adalah 100 kVAR. Dengan memasang 67 kVAR kapasitor, daya nyata akan berkurang dari 142 menjadi 105 kVA. Hasilnya terjadi penurunan arus 26% dan faktor daya meningkat menjadi 0,95.



Gambar 2. 3 Ilustrasi Perbaikan PF

Adapun cara menghitung untuk perbaikan faktor daya, yaitu dari segitiga daya, dari segitiga daya kita dapat menuliskan beberapa persamaan :

$$\cos \Phi = pf = \frac{KW}{KVA} \quad (2.22)$$

$$\tan \Phi = \frac{kVAR}{kW} \quad (2.23)$$

Karena P (daya aktif) selalu sama, maka dapat ditulis persamaan:

$$Daya\ Reaktif = Daya\ aktif \times \tan \Phi$$

$$Q = P \times \tan \Phi \quad (2.24)$$

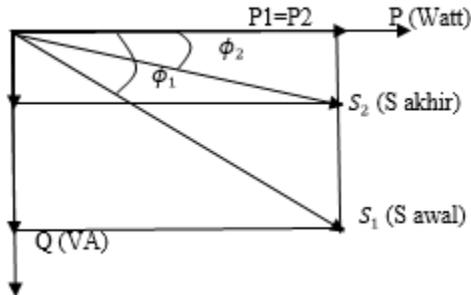
Untuk mengetahui berapa daya reaktif yang dibutuhkan dalam perbaikan faktor daya, dapat mengurangi dari daya reaktif awal nya dan daya reaktif tujuan.

Daya reaktif awal (sebelum perbaikan)

$$Q = P \times \tan \phi_1 \quad (2.25)$$

Daya reaktif tujuan (setelah perbaikan)

$$Q = P \times \tan \phi_2 \quad (2.26)$$



Gambar 2. 4 Diagram Fasor Kompensasi Daya Reaktif

Dari gambar diatas dapat diketahui hubungan P , Q , dan S . Sehingga dapat diketahui kapasitor yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya adalah :

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 \quad (2.27)$$

$$\Delta Q = P \times (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (2.28)$$

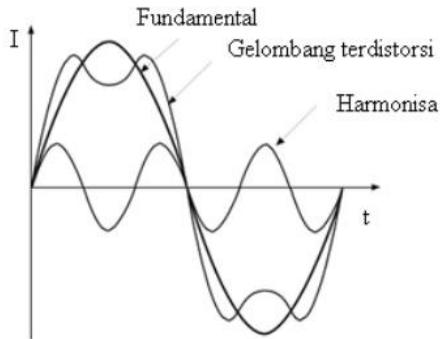
2.4 Harmonisa

2.5.1 Pengertian Harmonisa dan Perhitungan

Harmonisa dalam sistem tenaga listrik adalah distorsi gelombang arus dan tegangan secara berulang (periodik) disaat keadaan *steady state*. Distorsi gelombang terjadi karena adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya (50 Hz).

Istilah *harmonic* sering dipakai untuk menjelaskan penyimpangan gelombang sinusoidal yang berhubungan dengan arus dan tegangan dari amplitude dan frekuensi berbeda. Dalam sistem tenaga listrik definisi harmonic dapat dijelaskan sebagai komponen sinusoidal dari gelombang

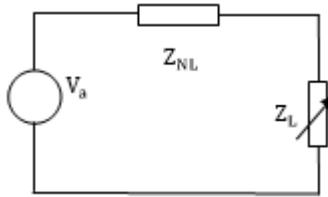
periodik yang mempunyai frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar [2]. Frekuensi dasar berarti frekuensi fundamental, di Indonesia sendiri bernilai 50 Hz. Gambar dibawah ini menunjukkan gelombang fundamental yang terpengaruh oleh harmonisa, dan menghasilkan gelombang yang terdistorsi (rusak).



Gambar 2. 5 Gelombang Terdistorsi karena Harmonisa

Dari gambar diatas terlihat bahwa gelombang fundamental terdistorsi karena adanya gelombang harmonisa pada sistem tersebut. Untuk sistem yang fundamentalnya 50 Hz, bisa dikatakan harmonisa pertama dari sistem tersebut adalah 50 Hz, sedangkan untuk harmonisa kedua (100 Hz) adalah kelipatan kedua dari harmonisa pertama, begitu juga selanjutnya 150 Hz, 200 Hz dll. Harmonisa sendiri terjadi kebanyakan karena beban non linear dari peralatan listrik atau peralatan elektronika daya.

Berikut adalah ilustrasi harmonisa dalam sistem tenaga listrik, pada Gambar 2.5. dapat dilihat thevenin dari suatu rangkaian sistem tenaga listrik. Terdapat sumber (V_a) serta beban Linear Z_L dan beban non Linear Z_{NL} . beban non linear akan menyerap arus harmonic karena adanya beban non linear penghasil harmonisa.



Gambar 2. 6 Ilustrasi Rangkaian Sistem Tenaga Listrik

Jika :

$$V_a = V_m \sin n(\omega t) , \quad (2.29)$$

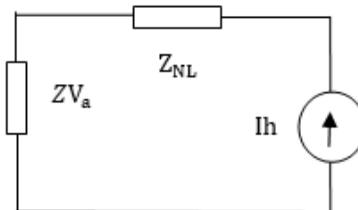
sedangkan arus yang diserap beban non linear adalah

$$I_t = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (2.30)$$

Karena V_a tidak mempunyai komponen harmonisa, maka jika $n > 1$ harga V_a adalah nol, maka arus :

$$I_t = \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (2.31)$$

Dapat disimpulkan dari rangkaian 2.6, bahwa I_t tetaplah ada, walaupun $V_a=0$, dalam keadaan seperti ini, Z_L dianggap sumber arus dan tegangan, sedangkan sumber generator (V_a) dianggap sebagai impedansi, seperti ilustrasi gambar dibawah ini



Gambar 2. 7 Rangkaian STL Beban non Linear Sebagai Sumber

Misal :

$$I_n(t) = -i(t) = - \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (2.32)$$

Jika : $\theta_n = \phi_n + \pi$, maka

$$I_n(t) = I_n \sin(\omega_n t - \phi_n) \quad (2.33)$$

Pada sistem tenaga listrik, harmonisa genap diabaikan karena resultan harmonisa dengan frekuensi fundamentalnya menghasilkan gelombang simetris. Dalam sistem tiga fasa harmonisa yang dihasilkan sama seperti sistem satu fasa. Dalam analisa harmonisa tiga fasa, harmonisa ditinjau dari komponen simetris dan dianggap simetris. Pada sistem tiga fasa seimbang, gelombang (arus) yang terdistorsi akan bernilai sama pada tiap fasanya, dan dianggap arus tiap fasa nyamerupakan fungsi ganjil, agar mudah analisanya. Sistem tiga fasa seimbang mempunyai tiga urutan fasa, a-b-c yang berarti fase a mendahului b dan b mendahului c atau dikenal juga dengan komponen urutan fasa. Ada urutan positif negative dan urutan nol, pun juga harmonisa memiliki urutan positif negative dan nol . hubungan tersebut dapat di tentukan dari hubungan arus harmonisa. contoh dari tiga orde harmonisa

- Harmonisa 3

$$I_{a3} = I_{a3} \cdot \sin 3\omega t \quad (2.34)$$

$$I_{b3} = I_{b3} \cdot \sin 3(\omega t - 120^\circ)$$

$$I_{c3} = I_{c3} \cdot \sin 3(\omega t - 360^\circ)$$

$$I_{b3} = I_{b3} \cdot \sin 3\omega t \quad (2.35)$$

$$I_{c3} = I_{c3} \cdot \sin 3(\omega t - 240^\circ)$$

$$I_{c3} = I_{c3} \cdot \sin 3(\omega t - 720^\circ)$$

$$I_{c3} = I_{c3} \cdot \sin 3\omega t \quad (2.36)$$

Dari persamaan diatas , dapat diketahui, bahwa harmonisa ketiga tidak memiliki beda sudut, tidak ada beda fasa sehingga harmonisa urutan ketiga termasuk komponen urutan nol, yang mana paling berbahaya bagi peralatan listrik.

- Harmonisa ke lima

$$I_{a5} = I_{a5} \cdot \sin 5\omega t \quad (2.37)$$

$$I_{b5} = I_{b5} \cdot \sin 5(\omega t - 120^\circ)$$

$$I_{b5} = I_{b5} \cdot \sin(5\omega t - 600^\circ)$$

$$I_{b5} = I_{b5} \cdot \sin(5\omega t - 240^\circ) \quad (2.38)$$

$$I_{c5} = I_{c5} \cdot \sin 5(\omega t - 240^\circ)$$

$$I_{c5} = I_{c5} \cdot \sin(5\omega t - 1200^\circ)$$

$$I_{c5} = I_{c5} \cdot \sin(5\omega t - 240^\circ) \quad (2.39)$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa harmonisa orde lima mempunyai arah sudut yang berlawanan dengan komponen positif, maka harmonisa ke lima termasuk komponen arus urutan negative.

- Harmonisa 7

$$I_{a7} = I_{a7} \cdot \sin 7\omega t \quad (2.40)$$

$$I_{b7} = I_{b7} \cdot \sin 7(\omega t - 120^\circ)$$

$$I_{b7} = I_{b7} \cdot \sin(7\omega t - 840^\circ)$$

$$I_{b7} = I_{b7} \cdot \sin(7\omega t - 120^\circ) \quad (2.41)$$

$$I_{c7} = I_{c7} \cdot \sin 7(\omega t - 240^\circ)$$

$$I_{c5} = I_{c5} \cdot \sin(5\omega t - 1680^\circ)$$

$$I_{c5} = I_{c5} \cdot \sin(5\omega t - 240^\circ) \quad (2.42)$$

Dari persamaan diatas, dapat diketahui harmonisa urutan ke tujuh mempunyai urutan sesuai dengan urutan positif, maka harmonisa ke tujuh, termasuk harmonisa urutan positif.

Dari data diatas, dapat di ambil kesimpulan bahwa tiap orde harmonisa memiliki komponen urutan masing-masing. Dari analisa yang dilakukan, harmonisa orde 1 memiliki urutan + , orde 2 memiliki urutan negative, dan orde 3 urutan nol, maka tiap kelipatan orde tiga, harmonisanya adalah urutan nol. Harmonisa Orde $3n+1$ merupakan urutan positif, harmonisa $3n-1$ merupakan urutan negative, dan harmonisa orde $3n$ merupakan urutan nol.

2.6 Besaran Harmonisa

Harmonisa mempunyai besaran-besaran dan standrad yang perlu diketahui, agar dapat menentukan kualitas suplai listrik dan sejauh mana batas harmonisa yang diperbolehkan.

2.6.1 Faktor Distorsi Arus dan Tegangan

Faktor Distorsi adalah rasio perbandingan dari harga efektif harmonisa terhadap harga efektif gelombang fundamental (50 Hz) dan dinyatakan dalam bentuk persentase (%) dari gelombang dasarnya

$$FD = \sqrt{\frac{\text{jumlah kuadrat dari amplitudo semua harmonisa}}{\text{kuadrat dari amplitudo gelombang dasar}}} \times 100\%$$

2.6.2 Total Harmonic Distortion (THD)

THD adalah jumlah semua komponen harmonisa dalam bentuk persentase terhadap komponen fundamentalnya. Komponen bisa tegangan atau arus.berikut rumus THD

$$THD = \frac{[\sum_2^k U_n]^{1/2}}{U_1} \times 100\%$$

Dengan U_n adalah komponen harmonisa

U_1 adalah komponen fundamental (50Hz)

K adalah komponen harmonisa yang diamati

Untuk THD tegangan dan arus mempunyai rumus masing-masing yaitu

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \text{ , } THD_v \text{ untuk tegangan}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \text{ } THD_i \text{ untuk arus}$$

V_h adalah tegangan harmonisa, sedangkan V_1 tegangan fundamental

I_h adalah arus harmonisa, sedangkan I_1 adalah arus fundamental

Rumus-rumus diatas merupakan perbandingan rms tegangan dan arus fundamental dengan rms tegangan dan arus harmonisa. Untuk tegangan sinusoid murni THD nya nol.

Setiap negara memiliki standar sendiri dalam menentukan batas THD tegangan dan arus yang diizinkan tergantung standar yang dipakai. Biasanya mengacu pada IEEE Std. 519-1992. Ada dua pembatasan, yaitu batas arus harmonisa yang diizinkan dan batas tegangan harmonisa yang diizinkan. Tabel dibawah ini menunjukkan standar batas THD tegangan yang diizinkan

Tabel 2. 1 Standar Batas THDv

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	THD_v (%)
69 kV and below	3,0	5,0
69,001kV trough 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV and above	1,0	1,5

Note : High voltage system can have up to 2,0 % THD where the cause is an HVDC

Tabel 2. 2 standar Batas THDi

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
I_{sc}/I_L	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					
	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	THD
< 20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 – 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 – 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 – 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Even harmonic are limited to 25% of the odd harmonic above.						
Current distortion that result in a dc, e.g. half-wave converters, are not allowed.						
*All power generation equipment is limited to these values of current distortion regardless of the actual I_{sc}/I_L .						
Where : I_{sc} = maximum short circuit at PCC I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC						

Tabel di atas menunjukkan standar batas arus harmonisa yang diizinkan.

2.7 Sumber Harmonik[5]

2.7.1 Konverter

Kebanyakan beban yang menimbulkan cacat gelombang adalah beban yang mengandung konverter. Karena penggunaan komponen semikonduktor pada converter seperti diode thyristor, mengubah bentuk sumber tegangan , misal pada penyearah (*rectifier*) mengubah bentuk gelombang AC ke DC. Dari perubahan tersebut melalui proses *switching*,

sedangkan proses *switching* tersebut, jarang sekali berhimpit dengan *zero crossing* dari gelombang sumber, sehingga berakibat timbulnya pulsa-pulsa arus yang kembali ke sistem atau peralatan listrik lainnya. Contoh peralatan yang mengandung converter ialah lampu dimmer, computer, perangkat elektronik rumah tangga, *rectifier*, *inverter*, VSD.

2.8 Tanur Busur Listrik

Tanur busur Listrik berfungsi untuk peleburan biji besi dan baja. Memiliki beban yang tak linear dan menyebabkan timbulnya arus harmonik yang cukup besar pada jaringan yang terhubung dengan tanur busur listrik. Penggunaan tanur busur listrik seringkali menimbulkan gangguan terhadap jaringan, seperti harmonisa, kedip tegangan, ketidaksetimbangan tegangan. Busur listrik yang terjadi selama tanur busur listrik beroperasi hampir selalu tidak dalam keadaan stabil. Hal ini disebabkan oleh perubahan elektroda, interaksi gaya elektromagnetik busur dan pengaruh *ripple* permukaan biji yang lebur. Bentuk gelombang arus tanur busur listrik tidak dapat di buat persamaannya karena bentuk gelombang pada tiap periode tidak sama.

2.8.1 Transformator

Peralatan elektromagnetik termasuk mesin berputar dan trafo merupakan sumber harmonik, karena magnetisasi besi yang tidak linear. Pada saat tidak berbeban tegangan primer trafo sebanding dengan emf balik, karena efek resistansi belitan belitan dan reaktansi bocor yang kecil sekali. Tegangan tersebut dirumuskan :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.43)$$

Dari persamaan diatas dapat dihitung rerata fluks

$$\phi = - \int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{Em}{N_1 \omega} \sin \omega t = \phi_m \sin \omega t \quad (2.44)$$

Dapat disimpulkan, jika tegangan primer yang sinusoidal akan menghasilkan fluks yang sinusoidal pula pada kondisi tanpa beban. Pada inti ideal tanpa rugi-rugi hidterisis, hubungan fluks dan arus magnetisasi I_m ditentukan oleh kurva magnetisasi bahan besi yang digunakan didalam laminasinya.

2.8.1 Mesin-Mesin Berputar

Pada mesin berputar seperti Generator sinkron dan motor induksi secara umum menghasilkan sejumlah harmonic. Pada generator sinkron harmonisa terjadi karena kejenuhan dan distribusi fluks yang tidak sinusoidal sehingga terbangkit emf yang tak sinusoidal dan menghasilkan harmonisa jika dibebani.

2.8.2 Pengaruh Harmonisa

Harmonisa akan memberikan efek negative pada peralatan listrik dan jaringan listrik. Efek yang di timbulkan akibat harmonisa bisa dibagi dua, yaitu jangka panjang dan jangka pendek. Contoh jangka pendek yaitu harmonisa menyebabkan kesalahan pada peralatan pengukuran listrik yang menggunakan prinsip induksi magnetik, menimbulkan interferensi pada saluran komunikasi, karena kabell untuk telekomunikasi di letakkan dekat dengan kawat netral, harmonisa kelipatan tiga (urutan nol) menyebabkan induksi harmonik. Untuk jangka panjang efek harmonisa yang paling umum ialah panas berlebih misal pemanasan pada kapasitor dan pada trafo serta mesin-mesin berputar.

2.9 Resonansi

Kehadiran kapasitor yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya dapat menyebabkan timbulnya resonansi sistem lokal yang diikuti dengan naiknya arus yang sangat besar yang merugikan kapasitor itu sendiri. Dalam hal ini ada dua buah resonansi sistem, yaitu resonansi paralel dan resonansi seri.

Resonansi paralel menghasilkan impedansi yang tinggi pada frekuensi resonansi. Umumnya sumber harmonisa dianggap sebagai sumber arus yang menaikkan tegangan harmonisa dan arus harmonisa yang tinggi pada setiap lengan impedansi paralel.

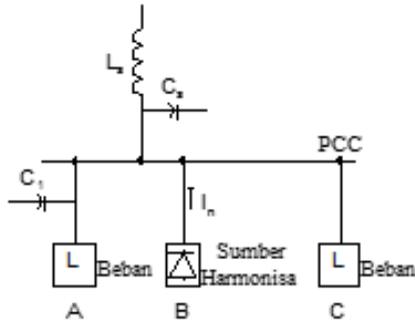
Resonansi paralel dapat terjadi pada beberapa cara, yang paling sederhana mungkin ketika sebuah kapasitor dihubungkan pada busbar yang sama dengan sumber harmonisa. Sebuah resonansi paralel dapat terjadi antara sumber dan kapasitor. Dengan asumsi bahwa sumber harmonisa bersifat induktif, frekuensi resonansi adalah :

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_s}{S_c}} \quad (2.45)$$

dimana :

f = frekuensi fundamental (Hz)

- f_p = frekuensi resonansi paralel (Hz)
- S_s = rating hubung singkat sumber (Var)
- S_c = rating kapasitor (Var)



Gambar 2. 8 Ilustrasi Resonansi Paralel Pada Point of Common Coupling

Resonansi paralel dapat terjadi pada sistem seperti pada gambar diatas Arus harmonisa dari konsumen B bertemu dengan impedansi harmonisa yang tinggi pada busbar. Hal ini mungkin karena resonansi antara induktansi sistem (L_s) dan kapasitansi sistem atau kapasitansi beban (C_1).

Untuk menentukan kondisi resonansi yang ada diperlukan pengukuran arus-arus harmonisa pada setiap beban konsumen dan suplai, bersama dengan tegangan harmonisa pada busbar. Secara umum, jika aliran arus yang masuk ke sistem tenaga dari busbar adalah kecil ketika tegangan harmonisa tinggi, menandakan terjadi resonansi pada sistem tenaga. Sedangkan jika ada arus harmonisa yang besar mengalir ke beban konsumen A dan meningkatkan tegangan harmonisa pada busbar, menandakan terjadi resonansi antara induktansi sistem dan kapasitor.

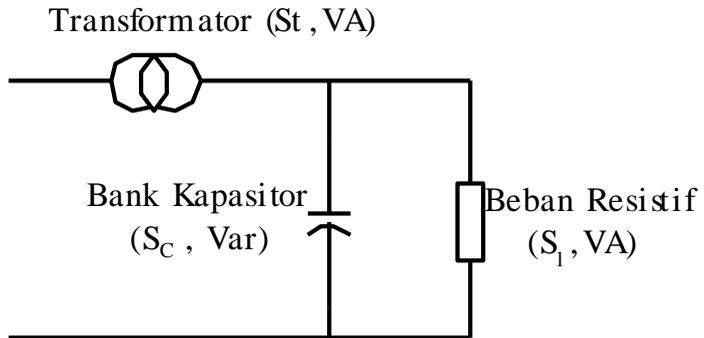
Melihat sistem pada gambar 2.10 Pada frekuensi yang lebih tinggi beban dapat diabaikan sebagai penekan impedansi kapasitif. Pada kondisi ini sebuah resonansi seri akan terjadi ketika :

$$f_s = f \sqrt{\left(\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_t^2}{S_c^2}\right)} \quad (2.46)$$

dengan

- f = frekuensi dasar (Hz)
- f_s = frekuensi resonansi seri (Hz)
- S_t = rating transformator (VA)
- S_l = rating beban (VA)
- S_c = rating dari kapasitor bank (VA)
- Z_t = impedansi transformator (pu)

Pada resonansi seri, arus kapasitor yang tinggi dapat mengalir pada tegangan harmonisa yang relatif kecil. Arus nyata yang mengalir tergantung pada faktor kualitas (Q) rangkaian. Biasanya sekitar 5 pada 500 Hz.

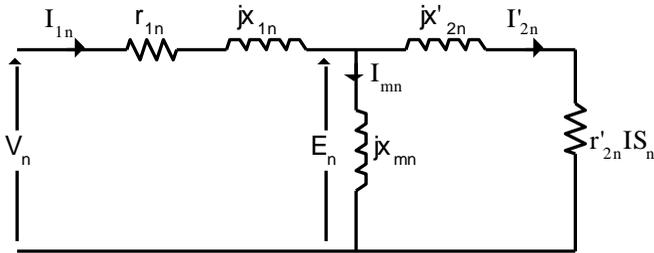


Gambar 2. 9 Rangkaian resonansi seri

2.9.1 Pengaruh Pada Mesin-Mesin Berputar

Tegangan atau arus harmonisa menambah rugi pada belitan stator, rangkaian rotor, dan laminasi pada stator dan rotor. Rugi-rugi pada konduktor stator dan rotor lebih besar daripada rugi-rugi yang disebabkan resistansi DC karena arus Eddy atau efek kulit.

Rangkaian ekuivalen yang umum pada mesin induksi digambarkan pada gambar 2.11 dimana semua parameter berhubungan dengan frekuensi dari arus belitan.



Gambar 2. 10 Rangkaian ekivalen motor induksi untuk harmonisa ke N

Arus harmonisa timbul pada stator mesin ac menghasilkan aksi induksi motor (yaitu slip harmonisa positif, S_n) Aksi motor ini meningkatkan torsi shaft pada arah yang sama dengan kecepatan medan harmonisa sehingga semua harmonisa urutan positif akan meningkatkan torsi shaft yang membantu putaran shaft sedangkan harmonisa urutan negatif berlaku efek sebaliknya

Karena slip dengan frekuensi harmonisa hampir menyatu maka torsi yang dihasilkan oleh per unit arus harmonisa sangat kecil dan lagi torsi kecil yang terjadi cenderung untuk dihapuskan. Sehingga efek harmonisa terhadap torsi rata-rata bisa diabaikan.

2.9.2 Pengaruh Pada Saluran Transmisi

Aliran arus harmonisa menghasilkan dua pengaruh utama. Pertama adalah menambah rugi transmisi yang disebabkan oleh meningkatnya nilai rms gelombang arus yaitu :

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (2.47)$$

dimana I_n adalah arus harmonisa ke-n dan R_n resistansi sistem pada harmonisa ke-n.

Dampak kedua adalah aliran arus harmonisa menyebabkan drop tegangan diantara berbagai impedansi rangkaian. Ini berarti bahwa pada sistem yang kecil dengan impedansi besar dan tingkat gangguan rendah, akan menghasilkan gangguan tegangan yang lebih besar daripada sistem yang besar dengan tingkat gangguan yang tinggi dan impedansi rendah.

Pada transmisi dengan kabel, tegangan harmonisa meningkatkan tekanan dielektrik yang sebanding dengan puncak tegangannya. Hal ini akan memperpendek masa pakai kabel dan juga dapat meningkatkan gangguan sehingga meningkatkan biaya pemeliharaan.

2.9.3 Pengaruh Pada Transformator

Timbulnya arus harmonisa meningkatkan rugi-rugi histerisis dan arus *Eddy* serta tekanan isolasi. Aliran arus harmonisa meningkatkan rugi-rugi tembaga dan efek ini lebih nyata pada transformator konverter, karena transformator tersebut tidak terpengaruh adanya filter yang biasanya dihubungkan pada sisi sistem ac. Terlepas dari rating yang dikehendaki, transformator konverter sering menimbulkan titik panas yang tidak dikendaki pada tangki.

Pengaruh yang penting khususnya pada transformator daya adalah adanya arus sirkulasi *tripelen* urutan nol pada belitan delta. Sirkulasi arus yang berlebihan dapat melampaui batas kemampuan belitan kecuali hal ini diperhatikan saat perencanaan.

Yang perlu dipertimbangkan juga, untuk transformator yang mensupply beban tidak seimbang. Jika arus beban mengandung komponen DC akan mengakibatkan kejenuhan pada rangkaian magnetik transformator terutama meningkatkan level seluruh komponen harmonisa dari arus penguatan AC.

2.9.4 Pengaruh Pada Kapasitor Bank

Adanya distorsi tegangan mengakibatkan rugi daya tambahan pada kapasitor bank sebesar

$$\sum_{n=1}^{\infty} C(\tan\delta)\omega_n V_n^2 \quad (2.48)$$

dengan $\tan \delta = R/(1/\omega C)$ adalah faktor rugi, $\omega_n=2\pi f_n$ dan V_n adalah tegangan rms pada harmonisa ke-n.

Daya reaktif total, termasuk daya fundamental dan harmonisa sebesar :

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (2.49)$$

Dari persamaan diatas maka dapat disimpulkan bahwa daya reaktif total kapasitor tidak boleh melampaui rating daya reaktifnya.

Resonansi seri dan paralel antara kapasitor dan sistem dapat menyebabkan tegangan lebih dan arus besar yang meningkatkan rugi-rugi yang tinggi dan panas berlebih pada kapasitor yang sering menyebabkan kerusakan pada kapasitor tersebut.

ANSI/IEEE Standar 18-1980 menyatakan batasan pemakaian kapasitor pada frekuensi dasar dan harmonisa :

- a. kVar kapasitor pada frekuensi dasar dan harmonisa tidak melebihi 135% kVar nameplatennya.
- b. Tegangan rms kapasitor pada frekuensi dasar dan harmonisa tidak melebihi 110% rating tegangannya.
- c. Arus rms kapasitor pada frekuensi dasar dan harmonisa tidak melebihi 180% rating arusnya.
- d. Tegangan kapasitor tidak melebihi 120% tegangan puncaknya.

2.9.5 Pengaruh Pada Rele Pengaman

Harmonisa dapat mempengaruhi karakteristik kerja rele pengaman tergantung pada desain dan prinsip operasinya. Rele digital yang tergantung pada data yang di sampling atau *zero crossing* cenderung error ketika distorsi harmonisa ada. Dalam banyak kasus, perubahan karakteristik operasi kerja rele adalah kecil dan tidak menyebabkan masalah. Masalah yang muncul adalah berbeda selama operasi normal dan operasi gangguan dan hal ini diperhitungkan secara terpisah.

Fungsi pengaman biasanya dikembangkan pada tegangan dan/atau arus fundamental sedangkan keberadaan harmonisa diabaikan. Hal tersebut biasanya benar untuk rele elektromagnetik. Elektromekanikal rele memiliki inersia yang berhubungan dengan rele elektromagnetik dan biasanya kurang sensitif pada harmonisa yang lebih tinggi.

Lebih jauh lagi adalah efek frekuensi harmonisa pada pengukuran impedansi. Setting rele jarak berdasarkan impedansi fundamental dari saluran transmisi dan kehadiran arus harmonisa (terutama harmonisa ketiga) dalam kondisi gangguan menyebabkan error pengukuran yang sangat besar relatif pada seting fundamental.

2.10 Filter Harmonisa

Filter harmonisa berfungsi untuk mengurangi amplitude frekuensi harmonisa tertentu. Penambahan filter harmonisa pada bus atau komponen peralatan listrik yang mengandung harmonisa diharapkan dapat menekan sekecil mungkin , sehingga penyebaran harmonisa ke

suatu sistem tenaga listrik dapat di tekan seminimal mungkin. Ada dua jenis filter, yaitu filter pasif dan filter aktif.

2.10.1 Filter Pasif [6]

2.10.1.1 Single Turned Filter

Filter dengan penalaan tunggal ditala pada salah satu orde harmonisa (biasanya pada orde harmonisa rendah). Filter ini terdiri dari rangkaian seri kapasitor, reaktor dan resistor (RLC).

Impedansi dari rangkaian gambar 2.11a. dinyatakan dalam persamaan :

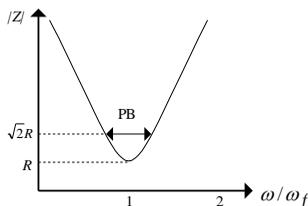
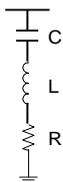
$$Z(\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (3.1)$$

Rangkaian filter ini mempunyai impedansi yang rendah pada frekuensi resonansinya. Sebuah shunt filter dikatakan ditala pada sebuah frekuensi, jika pada frekuensi tersebut reaktansi induktif dan kapasitifnya sama dengan nol. Kualitas sebuah filter (Q) ditentukan dari ketajaman pada penalaannya. Filter dengan Q yang tinggi ditala secara tajam pada satu frekuensi harmonisa yang rendah (contohnya ke-5) dan nilai yang umum diantara 30 dan 60. Filter dengan Q yang rendah biasanya dalam batas 0,5 sampai 5 memiliki impedansi yang rendah pada jangkauan frekuensi yang lebar.

Faktor kualitas (Q) filter didefinisikan sebagai perbandingan antara induktansi (atau kapasitansi) pada saat resonansi dengan besarnya resistansi.

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (3.2)$$

dengan $X_L = X_C = X_0$ pada keadaan resonansi.



Gambar 2. 11 Rangkaian filter penalaan tunggal

Gambar 2. 12 Kurva Impedansi filter terhadap frekuensi

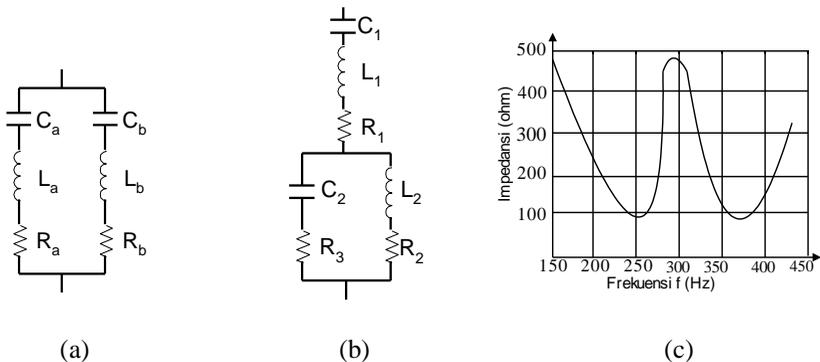
Seperti yang telah ditunjukkan dalam gambar diatas Pass Band (PB) dari filter didefinisikan sebagai batas frekuensi filter sama dengan resistansinya yaitu sudut impedansinya 45^0 dan besarnya impedansi sama dengan $\sqrt{2} R$. Sedangkan hubungan faktor kualitas dan Pass Band (PB) dinyatakan sebagai :

$$Q = \frac{\omega_0}{PB} \quad (3.3)$$

Dengan ω_0 adalah frekuensi sudut penalaan dalam rad/sec.

2.8.1.1 Filter Dengan Penalaan Ganda [6]

Impedansi ekivalen dari dua buah filter penalaan tunggal (ditunjukkan Gambar diatas) yang memiliki frekuensi resonansi yang berdekatan dalam prakteknya sama dengan konfigurasi sebuah filter penalaan ganda yang ditunjukkan pada gambar diatas, sedangkan untuk gambar diatas menunjukkan penalaan pada harmonisa orde ke-7 dan batas sebagai batas frekuensi filter sama dengan resistansinya.



Gambar 2. 13 Rangkaian filter penalaan ganda

- (a) Gabungan 2 *single tuned filter*
- (b) *Double Tuned Filter*
- (c) Kurva Impedansi Filter

Hubungan antara kedua rangkaian filter ini adalah sebagai berikut :

$$C_1 = C_a + C_b \quad (3.4)$$

$$C_2 = \frac{c_a + c_b(c_a + c_b)(L_a + L_b)}{(L_a c_a - L_b c_b)^2} \quad (3.5)$$

$$L_b = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \quad (3.6)$$

$$L_2 = \frac{(L_a c_a - L_b c_b)^2}{(c_a + c_b)^2 (L_a + L_b)^2} \quad (3.7)$$

$$R_2 = R_a \left[\frac{a^2(1-X^2)}{(1+aX^2)^2(1+X^2)} \right] + R_b \left[\frac{1-R_1 X^2}{(1+aX^2)^2(1+X^2)} \right] + R_1 \left[\frac{(1-X^2)(1-aX^2)}{(1+X^2)(1+aX^2)} \right] \quad (3.8)$$

dimana

$$a = \frac{c_a}{c_b} \text{ dan } X = \sqrt{\frac{L_b c_b}{L_a c_a}}$$

2.11 Komponen Filter

Dengan mengetahui tegangan fundamental dan harmonisa pada busbar, maka rating arus dan tegangan dari kapasitor, induktor dan resistor dapat ditentukan. Selain itu juga daya reaktif dan aktif serta rugi-ruginya dapat ditentukan pula.

Untuk mencegah kerusakan komponen-komponen ini, rating dari komponen harus didasarkan kepada beberapa kondisi yang ada yaitu tegangan fundamental tertinggi, deviasasi frekuensi tertinggi serta arus harmonisa dari sumber-sumber lain dan dari resonansi yang mungkin terjadi antara filter dan sistem ac.

2.11.1 Kapasitor

Kapasitor tersusun dalam unit standar yang dihubungkan seri dan/atau paralel untuk memperoleh rating tegangan dan kVA yang diinginkan. Hal-hal pokok dari kapasitor adalah:

- a. Koefisien suhu dari komponen kapasitor
- b. Daya reaktif per unit volume
- c. Rugi-rugi daya
- d. Reliability
- e. Harga

Koefisien suhu yang sangat rendah dari kapasitor lebih diharapkan untuk menala filter dalam orde penalaan supaya menghindari penalaan ulang karena perubahan kapasitansi oleh perubahan suhu di sekeliling atau oleh pemanasan sendiri oleh kapasitor tersebut. Hal ini tidak penting pada jenis filter damped atau untuk kapasitor daya.

Kapasitor mendapatkan daya reaktif yang besar per unit volume dengan cara memiliki losses yang rendah dan dengan dioperasikan pada tegangan tinggi. Untuk alasan ini maka untuk operasi yang lama pada tegangan lebih harus dihindari untuk mencegah terjadinya kerusakan dielektrik akibat panas. Rating daya reaktif kapasitor adalah penjumlahan daya reaktif pada masing-masing frekuensi yang diinginkan.

2.12 Induktor

Induktor yang digunakan dalam rangkaian filter dirancang mampu menahan selubung frekuensi tinggi dan diantaranya efek kulit dan rugi-rugi histerisis harus dimasukkan dalam perhitungan rugi-rugi daya. Begitu juga efek dari level fluks dari inti besi, yaitu penalaan ulang yang disebabkan oleh magnetisasi yang tidak linier sehingga harus dipertimbangkan. Komponen induktor pada filter lebih baik dirancang dengan inti non-magnetic. Rating induktor terutama tergantung pada arus rms maksimum dan pada level isolasi yang dibutuhkan agar tahan terhadap surja hubung. Umumnya R dan L ditempatkan dibagian bawah dari filter.

2.13 Pengaruh Impedansi Jaringan Terhadap Efektifitas Filter

Impedansi jaringan dapat bersifat induktif atau kapasitif pada frekuensi-frekuensi harmonisa. Dalam perencanaan suatu filter harmonisa, perlu diketahui sifat impedansi jaringan ditinjau dari titik pemasangan filter. Dengan mengetahui sifat impedansi jaringan dapat dibuat penalaan yang tepat sehingga filter akan berfungsi optimal.

Rangkaian filter dan jaringan dapat membentuk resonansi paralel pada suatu frekuensi harmonisa. Jika frekuensi resonansi ini mendekati salah satu frekuensi harmonisa, maka filter tidak dapat mencegah masuknya harmonisa ke jaringan bahkan memperbesar distorsi harmonisa pada titik pemasangan filter.

Impedansi jaringan dapat diketahui dari pengukuran langsung maupun tidak langsung melalui perhitungan. Sifat impedansi jaringan ditinjau dari titik pemasangan filter dapat diketahui dari nilai impedansi bus jaringan sepanjang frekuensi harmonisa yang diperhitungkan. Nilai

impedansi bus yang diperlukan adalah elemen matriks impedansi harmonisa sendiri (*Harmonic Driving Point Impedance*). Nilai Impedansi ini dapat diperoleh dari persamaan matriks tiap komponen jaringan.

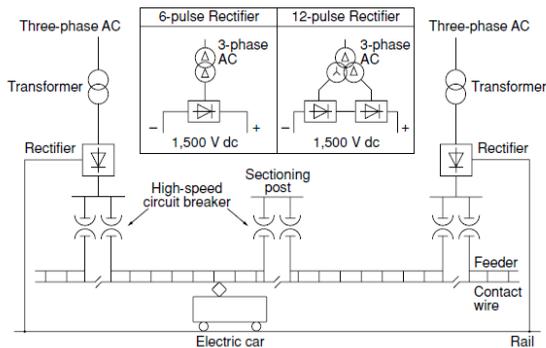
.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PENCATU KERETA REL LISTRIK STASIUN UI

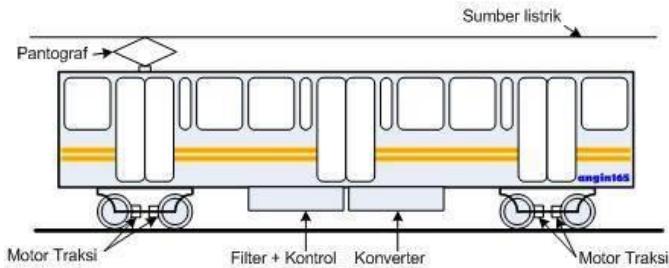
3.1 Kereta Rel Listrik dan Sistem Pencatunya

Kereta Rel Listrik (KRL) merupakan kereta yang menggunakan tenaga listrik dalam menggerakkan motornya. Sumber yang digunakan KRL ada dua macam, yaitu sumber AC dan sumber DC. Untuk sumber AC. Untuk sumber AC menggunakan tegangan sebesar 15kV dengan frekuensi 16.7 Hz dan 25 kV, sedangkan untuk yang memakai sumber DC menggunakan tegangan sebesar 600 V, 750 V, 1500 V, dan 3 kV. Indonesia sendiri memakai sistem Listrik Aliran Atas DC 1500 kV untuk mencatu KRL [7]. Dapat dilihat pada gambar 3.1



Gambar 3. 1 Sistem Pencatu DC Pada KRL

Sedangkan pada stasiun UI dan semua stasiun yang menggunakan KRL di Indonesia penyaluran sumber listrik ke KRL menggunakan sistem DC 1.5 kV melalui pantograph. Pantograf sendiri berfungsi untuk mengalirkan listrik dari sumber gardu traksi menuju konverter KRL itu sendiri, yang nantinya akan menggerakkan KRL. Pantograf dialiri listrik secara terus menerus untuk mencatu daya kereta, maka dari itu, pantograf sendiri haruslah tahan lama.



Gambar 3. 2 Komponen KRL

Penggunaan motor DC pada awal perkembangan KRL sangatlah umum, hal ini karena motor DC sangat mudah diatur. Pengaturan motor DC yaitu dengan cara membatasi tegangan. Cukup menggunakan rheostat. Seiring berkembangnya zaman, teknologi thyristor menggantikan fungsi rheostat. Saat ini, pengaturan motor DC pada KRL menggunakan DC Chopper. Dewasa ini, penggunaan motor DC pada KRL sudah mulai ditinggalkan, karena pengaturan kecepatan motor DC berdasarkan tegangan dan fluks yang mengalir, dibutuhkan tegangan yang besar dan fluks yang kecil jika ingin kecepatan motor bertambah, karena ini, KRL lebih cenderung lambat. Contohnya pada KRL di Indonesia dengan rata-rata kecepatan hanya 70 km/ jam, alasan dari penggunaan motor DC pada sistem supply kelistrikan KRL Indonesia adalah karena jarak tempuh antar stasiun di Indonesia pendek, sehingga memerlukan kecepatan pengaturan gas dan rem yang responsive, alias cepat, dengan menggunakan motor DC, kecepatan dan pengereman diatur dengan hanya mengatur tegangan yang masuk sehingga mudah pengaturannya

Sedangkan motor AC yang digunakan KRL mulai banyak digunakan karena pengaturan kecepatan motor AC lebih mudah, hanya berdasarkan frekuensi dengan nilai tegangan dan arus yang sama. Pengatur kecepatan motor AC pada KRL biasanya menggunakan VVVF (*variable voltage, variable frequency*) untuk mengatur tegangan dan frekuensi dari motor AC. Stasiun UI menggunakan KRL bermotor DC 1500 V, dengan sistem *feeding* listrik dari gardu traksi-traksi yang ada melalui aliran atas menggunakan pantograf.

3.2 Model Sistem Kelistrikan Gardu Traksi Stasiun UI

Pada saat ini, PT Komuter Line Indonesia memiliki kurang lebih 30 gardu untuk mencatu perjalanan KRL ke seluruh rutenya. Gardu traksi KRL memiliki 2 tegangan, yaitu sisi AC dan sisi DC. Pada sisi AC

komponenya transformator dan pada sisi DC komponennya adalah konverter (*rectifier*). Stasiun UI terdiri dari trafo 4530 kVA dan penyearah 4000 kW

Dari SLD dapat di jelaskan bahwa gardu KRL di catu oleh JTM PLN 20 kV 3 fasa , tahapan dari masukan tegangan AC sampai dengan DC adalah sebagai berikut:

- Panel pemisah 24 kV, 630 A (kubikel H1)
- Pemutus tenaga distribusi VCB 24 kV 600 A (kubikel H2)
- Pemutus tenaga penyearah VCB 24 kV/600A (kubikel H4)
- Trafo 4530 kVA , Δ - Δ , PV : 20 kV SV: 1200 V
- Penyearah 4000 kW , LA DC 1500 V
- Penyulung negative menuju bawah rel
- Panel DC positif terdiri dari 1500 V 4000 A, HSCB 1500 kV 50 kA, SPDS 1500 V 2000A.
- Ke sistem katenari , 2 line.

Stasiun UI memasok maksimal 2 kereta, karena hanya ada 2 jalur (jalur arah JKT dan arah Bogor). Setiap kereta yang melewati stasiun UI memiliki 1200 kW motor DC per keretanya. Adapun tabel data nameplate peralatan, ada pada lampiran.

3.2.1 Simulasi Sistem Tenaga Listrik

Pemodelan SLD Gardu KRL UI menggunakan *software* ETAP, agar memudahkan dalam menganalisanya. Adapun gambar SLD pada ETAP akan di tampilkan pada lampiran.

3.3 Aliran Daya Sistem Kelistrikan dan Identifikasi Faktor Daya Pada Stasiun UI

Simulasi aliran daya yang diambil adalah pada saat keadaan full load (beban beroperasi penuh) yaitu dengan keadaan terdapat dua kereta yang di catu oleh gardu stasiun UI, dan dalam keadaan steady state. Berikut tabel

Tabel 3. 1 Aliran Daya 1

Bus 1	kW	kVar	pf
Trafo 1 (4530 kVA)	3818	2824	80.1 %
Trafo 3 (200 kVA)	3	2	83.7 %

Dari tabel 3.1 terlihat bahwa faktor daya keluaran bus 1 kurang dari 85% baik dari keluaran trafo 1 dan keluaran trafo 3.

Tabel 3. 2 Aliran Daya 2

Bus 2	kW	kVar	pf
Trafo 2 (50 kVA)	0	0	0
Rectifier (5229kVA)	3778	2341	85%

Tabel 3. 3 Aliran Daya 3

dcBus6	kW	Arus I
Panel DC	20	172.4

Pada gambar 3.2 Trafo 2 bernilai nol karena panel pengaturan AC DC tegangan rendah dicatu oleh trafo lainnya. Pada bus 2 juga terdapat trafo cadangan sebesar 50 kVA.

Tabel 3. 4 Aliran Daya 4

dcBus1	kW	Arus I
Kereta 1	1576	1051
Kereta 2	1576	1051

Data beban kereta dapat dilihat pada tabel 3.4, dimana pada simulasi kali ini, dianggap gardu listrik mencatu 2 kereta sekaligus. Sedangkan pada tabel 3.3 adalah beban pada panel kontrol DC. Pada tabel 3.5 , dapat dilihat bahwa pf tidak sampai 85%.

Tabel 3. 5 Aliran Daya 5

BUS	Peralatan	kW	kVar	KVa	Pf (%)
Bus 4	Trafo 5 (50 kVA)	26	16	31	84.3
Bus 3	Charger	26	16	30	85

3.4 Sumber-Sumber Harmonisa Pada Sistem Kelistrikan Gardu Traksi Stasiun UI

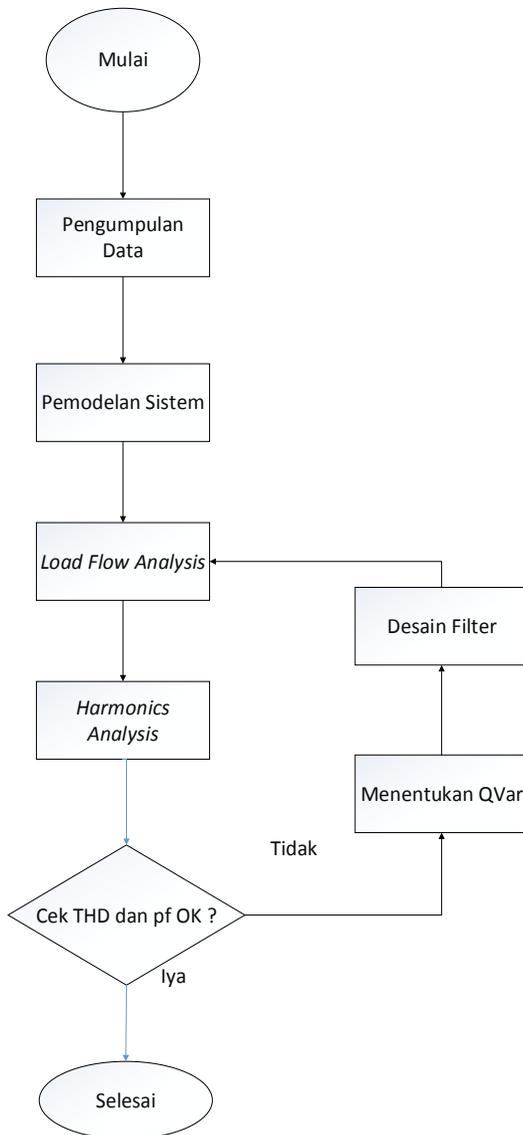
Penggunaan penyearah (rectifier) pada bus 2 untuk suplai kereta dan charger pada bus 3 untuk suplai charger baterai cadangan dan suplai panel kontrol DC merupakan beban yang menghasilkan harmonisa, karena merupakan beban tidak linear. Sedangkan nilai harmonisa per bus nya adalah. Bus 2 terhubung langsung oleh sumber harmonisa yaitu penyearah 6 pulsa, untuk bus 5 akan bernilai sama, karena bus 5

terhubung langsung dengan bus 2 . Sedangkan pada bus 3 terhubung pada beban charger (tidak linear). Penyearah 6 pulsa akan menghasilkan harmonisa sebesar $6n+1$ dan $6n-1$, dengan n adalah kelipatan integer harmonisa.

3.5 Langkah Meredam Arus Harmonisa dan Koreksi pf, Untuk Meningkatkan Kualitas Daya Pada Stasiun UI

Kualitas daya listrik dikatakan baik jika parameternya memenuhi standar yang ada. Seperti harmonisa yang sesuai standar, pf, *flicker*, *voltage sag and dim*, *over voltage*, *under voltage* yang sesuai standar. Dalam studi ini, hanya akan membahas pada bagian harmonisa dan pf , karena beban yang ada adalah beban tidak linear menyebabkan rentan terhadap harmonisa yang berlebih. Dalam beberapa dekade terakhir, sudah terjadi beberapa kali kebakaran pada gardu listrik KRL, yang di sebabkan oleh tingginya harmonisa yang ada dan tidak adanya filter pada gardu listrik KRL. Contoh kebakaran yang ada ialah pada stasiun UI tahun 2009 yang diperkirakan penyebabnya ialah harmonisa, lalu terbaru trafo meledak pada gardu listrik jalur manggarai-tanah abang (23 Oktober 2018) yang menyebabkan terbakarnya seluruh komponen gardu traksi dan bangunan warga sekitar. Studi ini bertujuan untuk mitigasi kualitas daya pada gardu listrik seperti mengoreksi pf dan harmonisa yang ada, dan desain filter pasif *single tuned filter*, untuk mereduksi harmonisa dan menaikkan pf pada sistem, dan tentunya untuk mencegah kerusakan dan kenakaran-kebakaran lainnya dimasa mendatang..

Berikut alur dan flowchart untuk menyelesaikan masalah harmonisa dan pf.



Gambar 3. 3 Diagram Langkah-Langkah mereduksi Harmonisa

Pertama-tama yang dilakukan adalah mengumpulkan data sistem kelistrikan pada gardu listrik, pengumpulan data merupakan hal terpenting karena dari data akan bisa dimodelkan, peliputan data meliputi seluruh komponen utama kelistrikan yang berhubungan dengan kualitas daya listrik (harmonisa dan pf). Setelah semua data terkumpul, maka dibuat pemodelan. Pemodelan ini berdasarkan data *single line diagram* dan spesifikasi peralatan atau komponen pada gardu sehingga didapatkan rangkaian simulasi mendekati kondisi di lapangan sesungguhnya.

Pemodelan data pada Rangkaian Gardu listrik Stasiun UI dilakukan pada software ETAP. Simulasi dilakukan untuk mengetahui letak dan nilai spektrum harmonisa yang paling tinggi serta mengetahui pf keseluruhan bus. Setelah diketahui, dirancang filter untuk mereduksi atau menala harmonisa yang ada.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Simulasi Etap Power Station 12.6.0

Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan kondisi sistem yang sebenarnya. Walaupun dalam proses simulasi terdapat sedikit perbedaan dengan keadaan sistem yang sebenarnya. Simulasi dengan bantuan software ETAP Power Station 12.6.0 untuk membantu mempermudah analisis pf dan kinerja suatu filter yang telah dirancang. Pemasangan kompensator akan dibarengi dengan RLC, dalam satu kesatuan filter pasif. Berikut langkah-langkah perbaikan harmonisa dan pf :

- Membuat SLD pada ETAP
- Analisa *Load flow* saat berbeban dan tidak berbeban
- Evaluasi pf , *overload* , *undervoltage*
- Analisa dan evaluasi besaran harmonisa
- Analisa impedansi untuk mengetahui frekuensi resonansi
- Menentukan titik pemasangan filter dan desain filter pasif
- Evaluasi hasil

4.1.2 Analisa *Load flow* dan Evaluasi

Terdapat dua keadaan yang diperhatikan dalam analisa *Load Flow*, yaitu pada saat keadaan tidak berbeban, dan pada saat keadaan berbeban penuh.

- **Keadaan 1 berbeban 100 %**

Hasil simulasi *Load Flow* dapat dilihat pada tabel dibawah ini

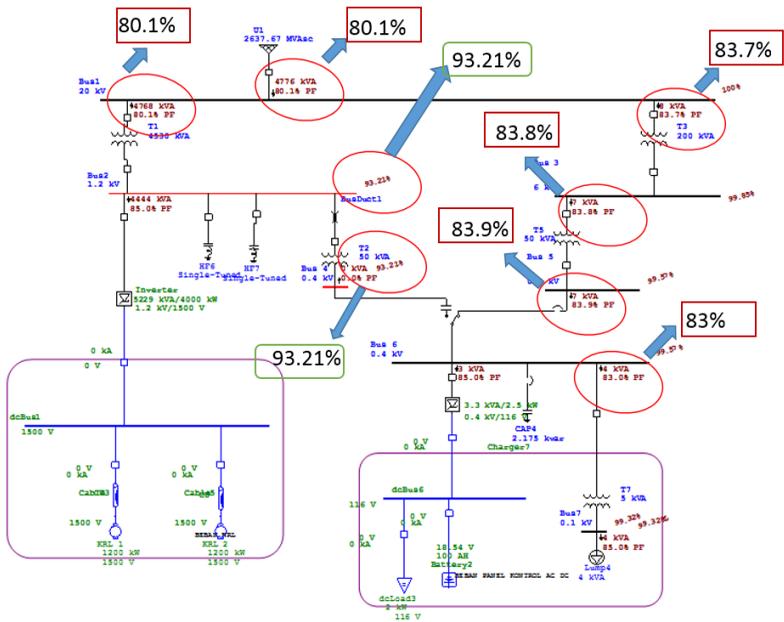
Tabel 4. 1 Load Flow dari ETAP

Bus	Voltage			Generation		Load		Load Flow				
ID	kV	%Mag	Ang	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	%PF
1	20	100	0	3.824	2.828	0	0	2	3.818	2.824	137.1	80.4
								3	0.006	0.004	0.2	83.7
2	1.2	100	0	0	0	3.778	2.341	1	-3.778	-2.341	2173.2	85.0
								4	0.000	0	0	0
3	6	99.85	-0.1	0	0	0	0	1	-0.006	-0.004	0.7	83.8
								5	0.006	0.004	0.7	83.8
4	0.4	100	-4.7	0	0	0	0	2	0	0	0	0
5	0.4	99.5	-0.2	0	0	0	0	3	-0.006	-0.004	10.8	83.9
								6	0.006	0.004	10.8	83.9
6	0.4	99.5	-0.2	0	0	0.003	0.002	7	0.003	0.002	6.1	82.0
								5	-0.006	-0.004	10.8	83.9
7	0.1	94.3	-2.3	0	0	0.003	0.002	6	-0.003	-0.002	23.2	85.0

Dari tabel diatas dapat diambil data pf yang tidak memenuhi syarat , baik dari tidak memenuhi syarat pf dan *undervoltage*. Adapun daftar yang tidak memenuhi standar adalah sbb:

Tabel 4. 2 Magnitude Tegangan & PF Dibawah Standar

Peralatan/beban	V Magnitude %	PF %	Keterangan
Trafo 1	-	80.1	<i>Pf <85%</i>
Trafo 3	-	83.7	<i>Pf <85%</i>
Trafo 5	99.89	83.8	<i>Pf <85%</i>
Trafo 7	99.7	83	<i>Pf <85%</i>
Bus 1	100	80.1	<i>Pf <85%</i>
Bus 2	93.21	85	<i>Undervoltage</i>
Bus 3	99.85	84.3	<i>Pf <85%</i>
Bus 4	93.2	-	<i>Undervoltage</i>
Bus 5	99.58	84.3	<i>Pf <85%</i>
Bus 6 ke Panel AC DC	99.58	83.2	<i>Pf <85%</i>
Bus 7	97.16	85	<i>Undervoltage</i>



Gambar 4. 1 Simulasi Berbeban dan Tidak Terhubung Filter

Pada Tabel 4.2 dapat dijadikan dasar dalam perancangan kapasitor bank , baik letak pemasangan atau pun VAR yang harus dipasang. Untuk masalah *undervoltage*, bisa langsung di atasi dengan mengubah tap transformer, yang mulanya tidak ada tap di sisi sekunder dan primer, lalu di setting tap nya. Buruknya pf dan magnitude tegangan diakibatkan beban motor dan adanya penyearah pada bus. Batas tegangan dikatakan *undervoltage* atau *overvoltage* ialah $\pm 5\%$ dengan kata lain dalam rentang 95% hingga 105%. Jika magnitude tegangan kurang dari 95%, maka dikatakan *undervoltage*, sedangkan jika diatas 105% maka magnitude dikatakan *overvoltage*. Pada Bus 1 memiliki Pada trafo 1 tap setting primer diganti menjadi -5% , setelah tap setting diganti, magnitude tegangan menjadi 98.9% yang artinya tidak *undervoltage*, sedangkan pada bus 7, tap setting primer diganti menjadi -5% maka *magnitude* tegangan bus menjadi 99.7%. Sedangkan untuk evaluasi PF, perlu menambahkan kapasitor bank sebagai kompensator. Ada 2 titik yang akan di beri kapasitor bank sebagai kompensator, yaitu bus 1 dan bus 6, hal ini

dikarenakan bus 1 terhubung langsung dengan beban Trafo Penyearah, serta bus 6 yang terhubung langsung dengan charger yang mensuplai panel DC dan *charger* baterai. Pemberian kapasitor bank secara individual diharapkan bisa memperbaiki pf pada bus dan di atasnya (bus sumber trafo 1). Berikut perhitungan yang dilakukan untuk menghitung VAR kapasitor yang dibutuhkan untuk mengkompensasi pf yang rendah pada bus 1, dengan estimasi pf yang didapat semula dari 80.4% menjadi 98% dan hasil dari perubahan tap transformator.

Pada Bus 1

$$\begin{aligned} Q_c &= P \times (\tan \theta_{\text{awal}} - \tan \theta_{\text{tujuan}}) \\ &= 3815 \times (\tan 31.7 - \tan 11.47) \\ &= 1582 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Pf pada bus 3 hingga 6 (satu deret) terlihat kurang dari 85% , pemilihan pemasangan kapasitor bank pada bus 6. Perbaikan pada bus 6 diharapkan menaikkan pf di atasnya (*upstream*). Adapun perhitungannya adalah sbb:
 Pada Bus 6

$$\begin{aligned} Q_c &= P \times (\tan \theta_{\text{awal}} - \tan \theta_{\text{tujuan}}) \\ &= 5 \times (\tan 32.54 - \tan 11.47) \\ &= 2.175 \text{ kVAR.} \end{aligned}$$

Tabel 4. 3 Perbaikan Bus Undervoltage

Bus	V Magnitude % awal	Tap Primer	Tap Sekunder	V Magnitude % akhir
Bus 2 (Trafo 1)	93.21	-5%	-	98.9
Bus 4	93.2	-	-	98.9
Bus7 (Trafo 7)	97.16	-5%	-	99.7

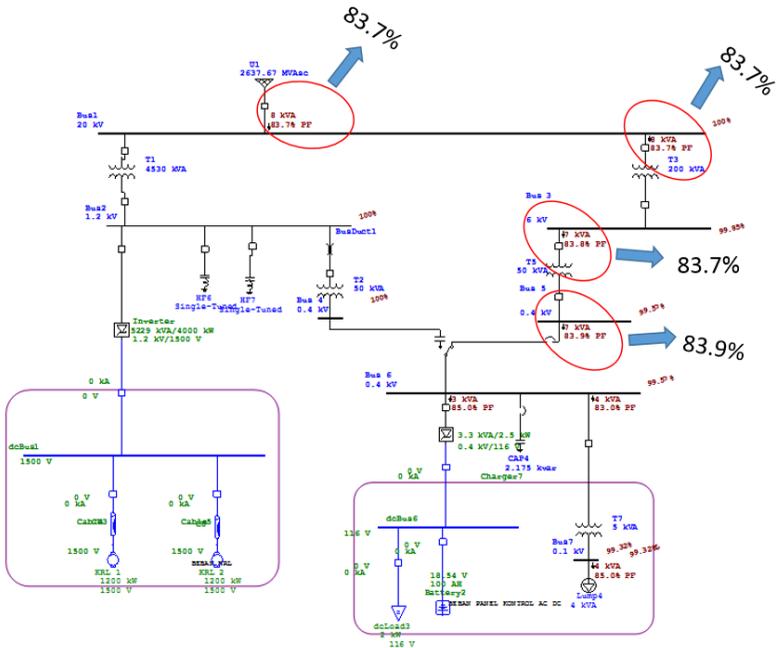
Dari tabel 4.3, dapat dilihat perubahan yang signifikan dari masing-masing bus ketika sudah di ganti tap primernya. Untuk kompensasi daya, jika di pasang kapasitor pada bus 2 dan bus 6, diharapkan pf yang awalnya pada bus 1 80.1% menjadi 98%. Nilai daya reaktif tersebut yang seharusnya di pasang pada bus 1 dan bus 6 agar pf meningkat, pada bus 6 akan di pasang kapasitor bank sebagai kompensator. Akan tetapi, pada bus 1 tidak dipasang kapasitor bank, karena pemasangan digabung menjadi satu kesatuan dengan filter pada bus 2, yang mana akan menaikkan pf pula

pada bus 1 . Filter akan dipasang pada nilai harmonisa tertinggi. Sebelum melakukan analisa harmonisa, terlebih dahulu dilakukan analisa frekuensi resonansi, guna mengetahui titik frekuensi resonansi pada sistem dan mencegah terjadinya resonansi pada sistem. Salah satu penyebab resonansi ialah pemasangan kapasitor bank sebagai korektor faktor daya. Resonansi adalah bertemunya 2 atau lebih frekuensi yang dapat saling melemahkan atau menguatkan. Ada dua jenis resonansi yaitu resonansi seri dan paralel. Resonansi seri membuat impedansi rangkaian sangat rendah, sehingga arus yang mengalir akan sangat besar sesaat pada saat frekuensi resonansinya dan berbahaya bagi sistem kelistrikan itu sendiri. Resonansi paralel menyebabkan impedansi besar sekali, menyebabkan tegangan sesaat pada sistem lokalnya sangat besar pada saat frekuensi resonansinya, hal yang paling berbahaya dari resonansi paralel dan paling dihindari adalah pada saat frekuensi resonansi berbarengan dengan orde harmonisa terbesar, akan menghasilkan tegangan yang amat besar sesaat , karena impedansi yang besar akan menghasilkan tegangan yang besar dari rumus tegangan berbanding arus dikali impedansi.

Pada sistim kelistrikan gardu listrik stasiun UI, menggunakan konverter 6 pulsa dan charger untuk panel kontrol. Karena adanya peralatan elektronika daya tersebut, maka akan menimbulkan masalah harmonisa. Untuk mencegahnya diperlukan filter, dan sebelum desain filter di hitung, perlu melakukan analisa frekuensi resonansi agar tidak terjadi resonansi ketika sudah terjadi pemasangan filter. Analisa resonansi dilakukan pada *software* ETAP, pada saat sebelum pemasangan filter. Untuk itu, diperlukan data-data dari sistim kelistrikan tersebut. Dari analisa load flow dapat diimpulkan bus-bus mana yang masih belum memenuhi standar yang ada, baik pf ataupun magnitude tegangannya, dan dapat ditentukan tempat pemasangan kapasitor bank pada bus 6 dan filter pada bus 2.

- **Keadaan 2 tidak berbeban**

Berikut hasil analisa *Load Flow* pada saat keadaan tidak berbeban.



Gambar 4. 2 Simulasi Tak Berbeban Tidak Terhubung Filter

Karena pengaruh beban pada panel control, yang menggunakan trafo, PF pada jala-jala kurang dari 85 %.

Tabel 4. 4 Load Flow Kondisi Tak Berbeban

Bus ID	Voltage			Generation		Load		Load Flow				
	kV	%Mag	Ang	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	%PF
1	20	100	0	0.006	0.004	0	0	2	0	0	0	0
								3	0.006	0.004	0.2	83.7
2	1.2	100	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
								4	0	0	0	0
3	6	99.85	-0.1	0	0	0	0	1	-0.006	-0.004	0.7	83.8
								5	0.006	0.004	0.7	83.8
4	0.4	100	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
5	0.4	99.5	-0.1	0	0	0	0	3	-0.006	-0.004	10.7	83.9
								6	0.006	0.004	10.7	83.9
6	0.4	99.5	-0.1	0	0	0.003	0.002	7	0.003	0.002	6	82.9
								5	-0.006	-0.004	10.7	83.9
7	0.1	94.3	-2.3	0	0	0.003	0.002	6	-0.003	-0.002	23.9	85

Dari tabel dan gambar diatas dapat disimpulkan bahwa pf dari tiap bus saat keadaan tidak berbeban dibawah 85%, hanya pada bus 7 (panel kontrol) pf 85%. Analisa aliran daya tidak berbeban dilakukan untuk mengetahui nilai magnitudo tegangan dan pf ketika tidak ada kereta yang lewat alias tidak berbeban, yang mana nilai yang didapat dijadikan acuan kualitas daya sistem saat tidak berbeban dan pengaruh yang diberikan filter saat sistem tidak berbeban. Hal ini dapat dijadikan pertimbangan dalam mendesain filter agar tidak membahayakan sistem saat tidak berbeban, dan tidak membuat kualitas daya pada sistem menurun, mengingat filter yang memiliki komponen kapasitor. Jika pada saat gardu tidak berbeban dan filter tersambung dengan sistem, maka perlu diperhatikan magnitudo tegangan serta pf nya. Jika kualitas daya memburuk maka diperlukan *auto switch* sehingga filter hanya tersambung pada saat berbeban dan terputus pada saat tidak berbeban.

4.1.3 Harmonisa Pada Sistim Kelistrikan Gardu Listrik UI

Sebelum merancang filter , terlebih dahulu mendeteksi harmonisa yang timbul pada sistem. Deteksi harmonisa dilakukan dengan ETAP untuk mempermudah perolehan hasil harmonisa pada sistem. Dengan menggunakan modul *harmonics analysis* dan mengimput data-data peralatan , analisa harmonisa dilakukan pada saat keadaan berbeban , berikut profil THD tegangan yang melebihi standar :

Tabel 4. 5 Profil Tegangan Harmonisa (IHD) yang melebihi standar

Bus ID	Voltage Distortion			
	kV	Fund. %	VIHD %	Order
Bus2	1.200	98.39	8.04	5.00
Bus 4	0.400	98.39	8.04	5.00
Bus2	1.200	98.39	7.75	7.00
Bus 4	0.400	98.39	7.75	7.00
Bus2	1.200	98.39	6.75	11.00
Bus 4	0.400	98.39	6.75	11.00
Bus2	1.200	98.39	6.24	13.00
Bus 4	0.400	98.39	6.24	13.00
Bus2	1.200	98.39	4.88	17.00

Bus		Voltage Distortion		
ID	kV	Fund.	VIHD	Order
		%	%	
Bus 4	0.400	98.39	4.88	17.00
Bus2	1.200	98.39	4.00	19.00
Bus 4	0.400	98.39	4.00	19.00

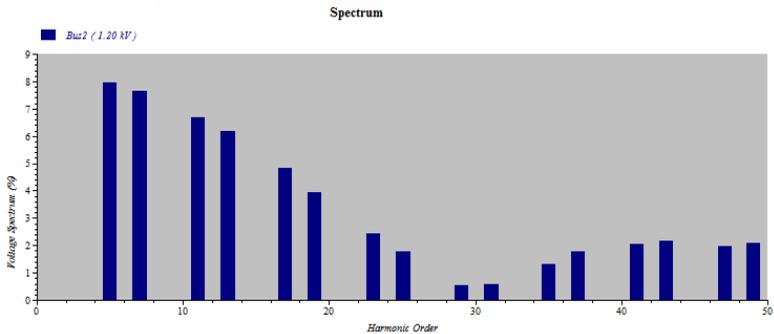
Dari tabel diatas dapat diketahui letak profil tegangan harmonisa yang melebihi standar beserta ordenya. Pada bus 2 profil harmonisa orde 5 dan orde 7 terbesar diantara lainnya, hal ini karena bus 2 berhubungan langsung dengan beban penyearah. Sedangkan pada bus 4 nilai profil harmonisa sama karena bus 4 berhubungan langsung dengan bus 2 dan tidak di bebani. Tabel diatas juga dipakai sebagai acuan terhadap perancangan filter pasif harmonisa, yang mana filter dirancang untuk menurunkan besar tegangan harmonisa menjadi dibawah 5% (sesuai standar IEEE Std. 519-1992), dan untuk mengetahui ada atau tidaknya frekuensi resonansi pada orde-orde harmonisa yang dominan dengan membandingkan dengan impedansinya, harapannya tidak ada resonansi pada harmonisa yang dominan, sehingga THD tidak meningkat tajam. Adapun untuk total keseluruhan harmonisa atau THD sistem adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Distorsi total harmonisa THD

Bus		Voltage Distortion	
ID	kV	Fund.	VTHD
		%	%
Bus2	1.200	98.9	16.78
Bus 4	0.400	98.3	16.78

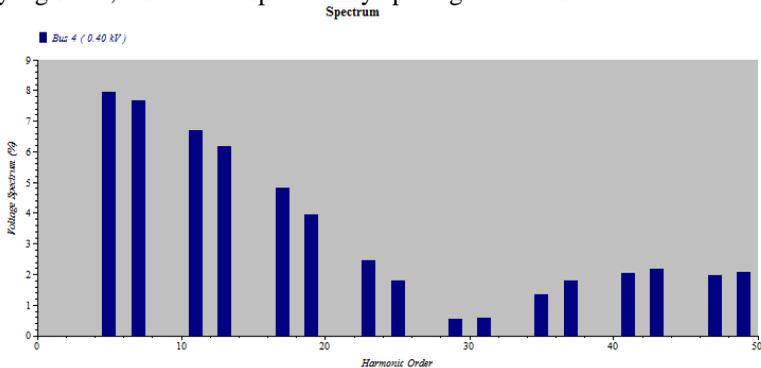
Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa THD bus 2 sangatlah besar dan sudah melewati batas standar IEEE Std. 519-1992 yang hanya 5%. Pada tegangan pada sistem tersebut. Hal ini tentu tidak berlangsung kontinyu, hanya pada saat beban 100% atau terdapat 2 kereta jalan dengan kecepatan penuh yang dicatu oleh gardu. Akan tetapi, harmonisa yang ada dapat mengganggu peralatan elektronika yang ada. untuk lebih detail,

berikut spektrum harmonisa yang didapat pada sistem kelistrikan gardu listrik stasiun UI.



Gambar 4. 3 Spektrum Harmonisa Bus 2

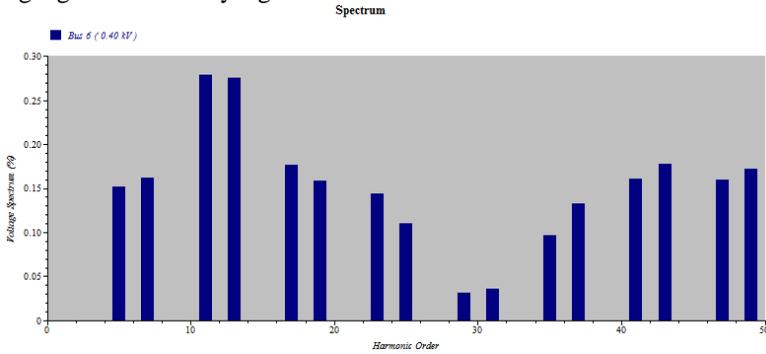
Dari tabel diatas, terlihat bahwa spektrum harmonisa ke 5 dan 7 merupakan yang terbesar dan dominan, dengan orde 5 sebesar 8.04% dan orde 7 sebesar 7.75%, diikuti dengan spektrum harmonisa ke 11 sebesar 6.75% dan 13 sebesar 6.24% sedangkan untuk THD sebesar 16.78%. Dari data diatas, tegangan harmonisa yang harus di filter ialah orde 5 dan 7, diharapkan setelah tegangan harmonisa ke 5 dan ke 7 di beri filter, akan menurunkan harmonisa belakangnya. Adapun pada bus 4 memiliki nilai yang sama, bisa dilihat spektrumnya pada gambar dibawah ini



Gambar 4. 4 Spektrum THD Bus 4

Selanjutnya pada beban panel pengaturan AC DC, terdapat charger yang berfungsi sebagai penyearah, hal ini juga akan menghasilkan

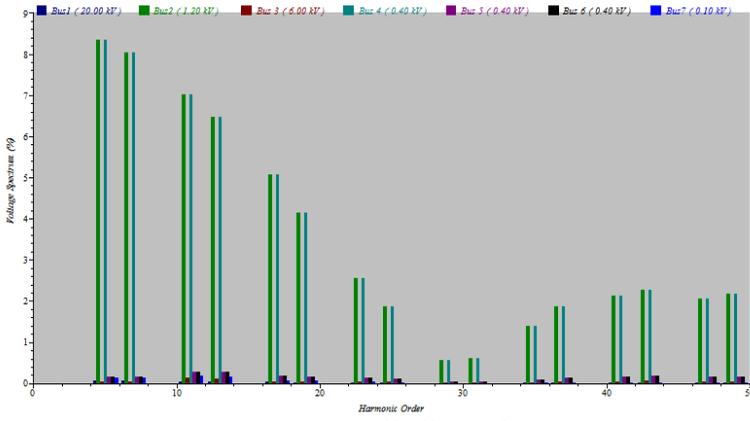
harmonisa, tetapi karena ratingnya kecil, sehingga tidak menghasilkan tegangan harmonisa yang besar.



Gambar 4.5 Spektrum TDH bus 6

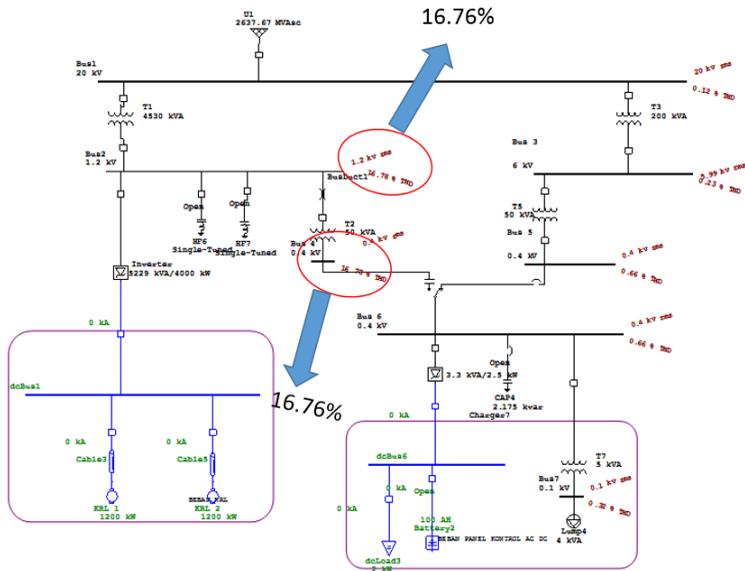
Dari tabel diatas, dapat dilihat bahwa tegangan harmonisa terbesar dominan ialah pada orde ke 11 dan 13, hanya sebesar 0.2788 dan 0.275 sedangkan total THD hanya 0.66% , yang artinya tidak melewati standar yang ada.

Untuk keseluruhan gambar spectrum harmonisa dan gambar sinus tegangan yang tereduksi harmonisa tiap bus sbb:



Gambar 4.6 Spektrum THD Seluruh Sistem

Dari gambar di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan yang paling terkena dampak harmonisnya adalah tegangan pada bus 2 dan dibawahnya yaitu bus 4. Adapun simulasi harmonisa pada ETAP, ialah sbb:



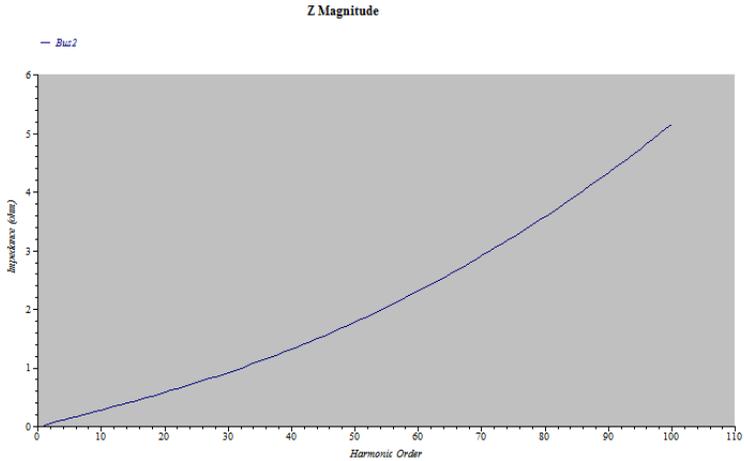
Gambar 4. 8 Analisa Harmonisa Pada Sistem

Kesimpulan yang didapat dari analisa harmonisa ialah, bus 2 menjadi bus yang memiliki THD tertinggi, adapun hasil nilai besaran IHD dan THD harmonisa terdapat pada tabel 4.4 dan tabel 4.5, bisa dipakai sebagai acuan dalam perancangan filter. Sebelum memasang filter, perlu di lakukan analisa terhadap besaran impedansi agar dapat diketahui pada frekuensi berapa terjadi resonansi. Diharapkan tidak terjadi resonansi pada frekuensi harmonisa dominan.

4.1.4 Analisa Impedansi Untuk Mitigasi Resonansi

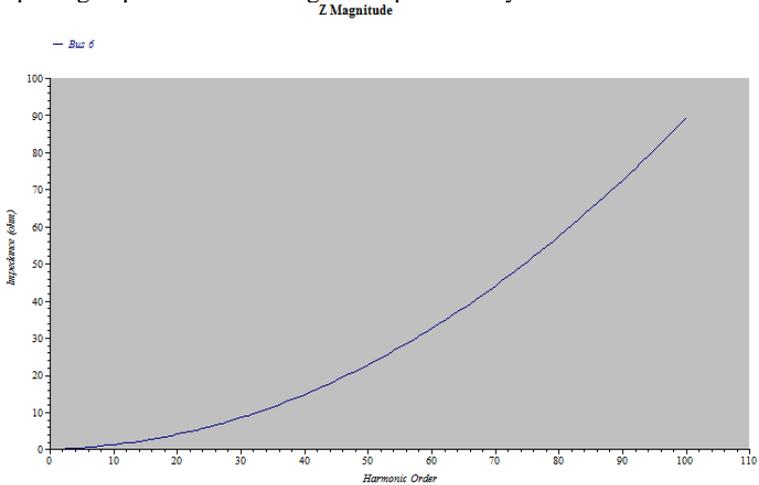
Analisa impedansi dilakukan untuk mengetahui dimana letak frekuensi resonansi kemungkinan akan terjadi, dan sebagai mitigasi sebelum menghitung desain filter pasif (*single tuned filter*). Maka dari itu dilakukan analisa impedansi pada bus-bus yang memiliki sumber harmonisa yang tinggi dan yang berada disekitarnya, pun juga pada titik

dimana filter akan dipasang. Berikut gambar- gambar karateristik impedansi pada sistem yang dimaksud.



Gambar 4. 9 Karateristik Impedansi Bus 2

Pada bus 2 yang akan di pasang filter tidak terlihat adanya potensi frekuensi resonansi baik seri maupun paralel. Lanjut pada bus 6 yang akan di pasang kapasitor bank sebagai kompensasi daya reaktif .



Gambar 4. 10 Karateristik Impedansi Bus 6

Pada bus 6 yang akan di pasang kapasitor bank , tidak ada potensi resonansi seri ataupun paralel. Pada bus ini akan di pasang kapasitor bank sebesar 2.75 kVAR sebagai perbaikan terhadap pf.

Analisa yang didapat dalam menganalisa impedansi saluran ialah sebagai mitigasi terhadap resonansi.

4.2 Desain Filter dan Kapasitor Bank

Setelah menganalisa dan mensimulasikan total harmonisa dan impedansi yang ada, akan di pasang filter harmonisa pada bus 2, pemasangan pada bus 2 untuk memperbaiki pf pada bus 1, filter yang dipilih yaitu *single tuned filter*. Bus 6 tidak dipasang harmonisa, hanya kapasitor bank. Langkah dalam merancang filter ialah memahami karakteristik impedansi dari filter *single tuned*, lalu menjadikan tegangan harmonisa yang dominan (orde-n) sebagai *tuning* frekuensi filter. Pada item kelitrikan ini, akan dibuat filter *single tuned* untuk meredam harmonisa orde k-5 dan ke-7 pada bus 2.

- Filter orde 5 pada bus 2
- 1) Menentukan kapasitor untuk perbaikan daya

$$\text{PF awal } 80.1\% \\ \cos^{-1}(0.801) = 36.7^{\circ}$$

$$\text{PF tujuan } 98\% \\ \cos^{-1}(0.98) = 11.47^{\circ}$$

- 2) Menghitung VAR

$$\begin{aligned} Q_c &= P \times (\tan \theta \text{ awal} - \tan \theta \text{ akhir}) \\ &= 3778 \times (\tan 36.7 - \tan .47) \\ &= 3778 \times (0.745 - 0.2029) \\ &= 2049.45 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Dibutuhkan daya reaktif sebesar 2049 kVAR untuk memperbaiki faktor daya yang mulanya 80.1% menjadi 98% ., karena filter yang akan dibuat ada 2 (filter orde 5 dan orde 7), maka nilai daya reaktif dibagi di kedua filter terssebut. Untuk filter orde 5 Q_c sebesar 1049 kVAR.

- 3) Menghitung nilai kapasitor

$$X_c = \frac{v^2}{Q_c}$$

$$X_c = \frac{1200^2}{1049 \times 10^3} = 1,372 \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1,372}$$

$$C = 2.3212 \times 10^{-3} F$$

Pada filter orde 5, ditentukan kapasitor bernilai $2,3212 \times 10^{-3} F$

4) Menghitung nilai induktor sebagai komponen reaktor filter

$$L = \frac{1}{(\omega \cdot n)^2 \cdot c}$$

$$L = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot n)^2 \cdot c} = \frac{1}{(2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 5)^2 \cdot 2,3212 \times 10^{-3}}$$

$$L = 17.477 \times 10^{-3} H$$

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 17.477 \times 10^{-3}$$

$$X_L = 0.05488 \Omega$$

Faktor kualitas untuk *single tuned filter* ialah dalam rentang 30-60, dalam filter ini dipilih 60. Berikut tabel hasil perancangan filter.

Tabel 4. 7 Spesifikasi Filter Orde 5

Spesifikasi	Nilai
L	$17.477 \times 10^{-3} H$
X_L	0.05488Ω
C	2.3212×10^{-3}
X_c	$1,372 \Omega$
QVar	1049 kVAR

Spesifikasi	Nilai
VLL	1200 V

- Filter orde 7 pada bus 2

Untuk nilai PF target sama dengan perhitungan pada filter orde 5, sedangkan untuk nilai kVAR memakai sisa dari pemakaian filter orde 5, yaitu sebesar 1000 kVAR

- 1) Menghitung nilai kapasitor

$$X_c = \frac{v^2}{Q_c}$$

$$X_c = \frac{1200^2}{1000 \times 10^3} = 1.44 \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1,44}$$

$$C = 2.2116 \times 10^{-3} F$$

Pada filter orde 7, ditentukan kapasitor bernilai $2,2116 \times 10^{-3} F$

- Menghitung nilai induktor sebagai komponen reaktor filter

$$L = \frac{1}{(\omega \cdot n)^2 \cdot C}$$

$$L = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot n)^2 \cdot C} = \frac{1}{(2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 7)^2 \cdot 2,2116 \times 10^{-3}}$$

$$L = 935.91 \times 10^{-3} H$$

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 935.91 \times 10^{-3}$$

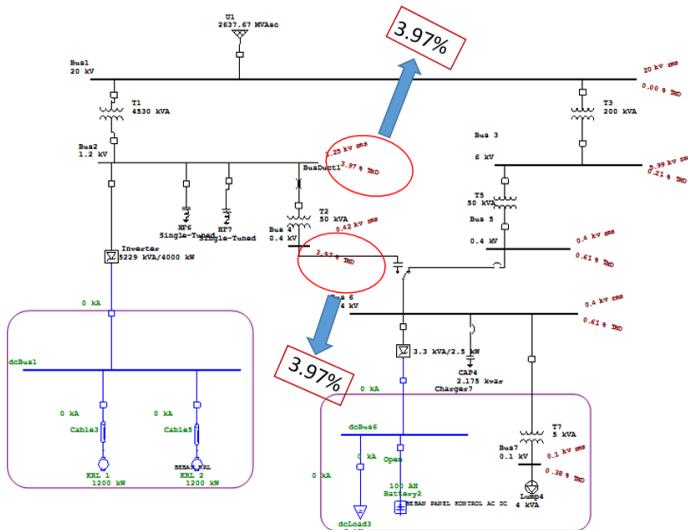
$$X_L = 0.0293 \Omega$$

Faktor kualitas untuk *single tuned filter* ialah dalam rentang 30-60, dalam filter ini dipilih 60. Berikut tabel hasil perancangan filter.

Tabel 4. 8 Spesifikasi Filter Orde 7

Spesifikasi	Nilai
L	$935.91 \times 10^{-3} \text{H}$
X_L	0.0293Ω
C	$2,2116 \times 10^{-3} \text{F}$
X_C	1.44Ω
QVar	1000 kVAR
VLL	1200 V

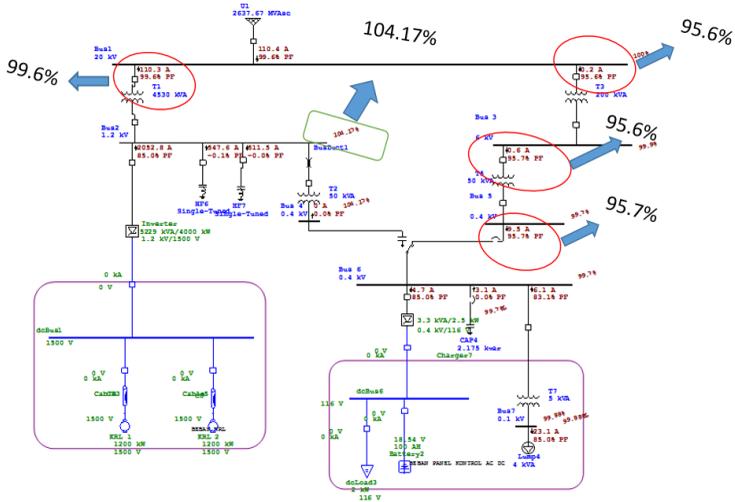
Setelah merancang filter, hasil yang didapat akan disimulasikan pada ETAP , dan berikut hasil dari simulasi setelah pemasangan filter



Gambar 4. 11 Simulasi Setelah Pemasangan Filter

Dapat dilihat dari gambar diatas, harmonisa yang awalnya 16.7% menjadi 3.97 % , sesuai dengan standar yang ada.

Untuk hasil pemasangan kapasitor bank, perancangan sudah dilakukan diawal, didapatkan nilai daya reaktif yang dibutuhkan sebesar 2.175 kVAR, berikut hasil analisa simulasi pemasangan kapasitor Bank



Gambar 4. 12 Simulasi Setelah Pemasangan Filter dan Kapasitor Bank

Dapat dilihat hasil yang didapat setelah pemasangan kapasitor Bank, bus-bus yang semula PF nya kurang dari 85% (terutama Bus 1 yang terhubung dengan sumber PLN) sudah diatas 85%. Berikut tabel nilai sebelum dan sesudah perbaikan:

Tabel 4. 9 Harmonisa Sesudah Pemasangan Filter

Bus	THDv Sebelum	THDv Sesudah	Standar
Bus 2	16.76 %	3.97 %	5%
Bus 4	16.7 6%	3.97 %	5%

Tabel 4. 10 Magnitude Tegangan dan PF Sesudah dan Sebelum Pemasangan Kapasitor

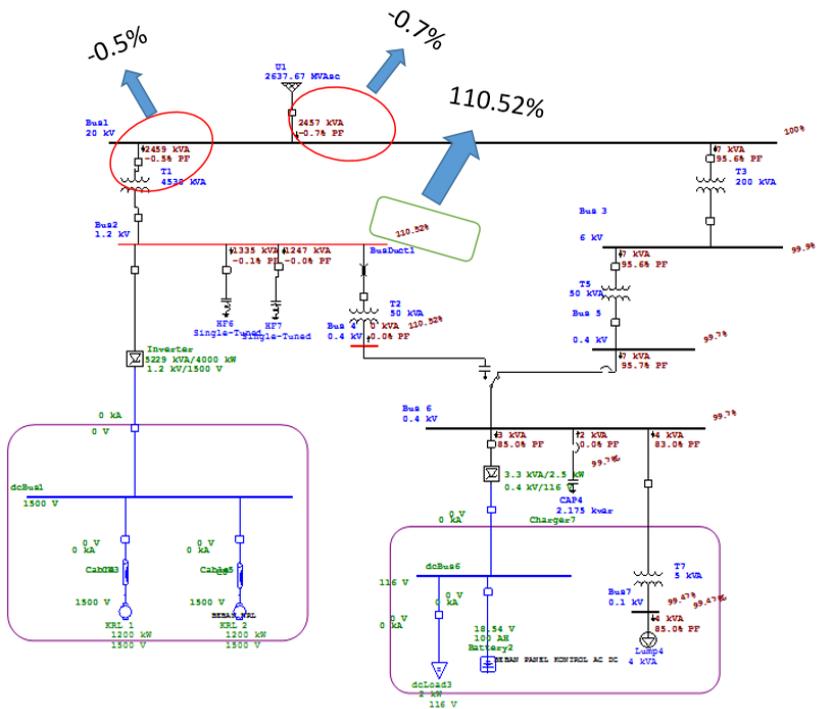
Peralatan/beban	PF Sebelum %	PF sesudah %	Std %
Trafo 1	80.1	99.6	85
Trafo 3	84.2	95.6	85
Trafo 5	84.3	95.6	85

Peralatan/beban	PF Sebelum %	PF sesudah %	Std %
Trafo 7	83.2	85	85
Bus 1	80.1	99.5	85
Bus 2	85	85	85
Bus 3	84.3	95.6	85
Bus 4	-		85
Bus 5	84.3	95.7	85
Bus 6 ke Panel AC DC	83.2	85	85
Bus 7	85	85	85

Dari hasil simulasi diatas dapat diketahui bahwa pada bus 2 magnitudo tegangan hampir *overvoltage*, hal ini karena tap primer trafo 1 yang diubah menjadi -5% karena pada saat berbeban dan tidak ada filter, tegangan magnitudo kurang dari 95%, diharapkan trafo menggunakan auto tap transformer, sehingga trafo dapat mengatur tap secara otomatis saat berbeban dan tak berbeban, dan pada saat terhubung filter maupun saat tidak terhubung filter. Sedangkan pada bus 2 harmonisa masih cukup besar (3.97%) walau sudah dibawah standar, hal ini dikarenakan dikhawatirkan beban menjadi kapasitif jika desain filter diubah.

4.3 Simulasi Saat Tak Berbeban dan Terhubung Filter

Simulasi saat keadaan tak berbeban dan terhubung dengan filter sangatlah dibutuhkan, berfungsi untuk mengetahui komponen kualitas daya yang ada dan perencanaan desain filter itu sendiri. Jika kualitas daya pada saat kondisi tak berbeban dan terhubung filter memiliki nilai yang sesuai standar yang ada, maka tidak diperlukan suatu sistem *switch* otomatis untuk melepasnya dari sistem, begitu juga jika pada saat tak berbeban nilai dari kualitas daya melebihi atau kurang dari standar yang ada, maka diperlukan suatu *automatic switch* yang melepas filter dari sistem kelistrikan. Berikut hasil simulasi :



Gambar 4. 13 Simulasi Tak Berbeban & Terhubung Filter

Dari hasil simulasi diatas, dapat diketahui bahwa tegangan pada Bus 2 menjadi *overvoltage* tegangan (110%) saat terpasang filter pada sistem, dan karakteristik beban yang berubah menjadi kapasitif (pf melebihi 100%). Hal ini terjadi karena terdapat kapasitor pada filter. Dari hasil simulasi diatas dapat disimpulkan bahwa diperlukan *switch* otomatis untuk melepasnya filter dari sistem kelistrikan, saat gardu tidak berbeban dan diperlukan Tap otomatis pada Trafo 1, guna menjaga *magnitude* tegangan tetap pada standar yang ada.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dari hasil simulasi Analisa kualitas daya berupa evaluasi *undervoltage/overvoltage* , PF,dan Harmonisa maka pada tugas akhir ini didapatkan beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Pemasangan filter pada titik harmonisa terbesar (pada bus yang terhubung oleh penyearah) sangat efektif dalam mengurangi reduksi harmonisa yang ada dan menaikkan pf. Sedangkan pemasangan kapasitor bank pada bus 6 , membuat semua pf menjadi diatas 85%, hal ini karena kompensasi daya bersifat *upstream* atau memperbaiki pf diatasnya.
2. Sebelum pemasangan filter dan kapasitor bank, terlihat beberapa bus ada yang memiliki tegangan dibawah standar (*undervoltage*) . pengaturan tap trafo pada bus 2 memberikan hasil yang efektif , menjadikan tegangan tidak *undervoltage*.
3. Berdasarkan simulasi ketika berbeban, bus 2 memiliki nilai tegangan harmonisa sebesar 16.76% setelah perhitungan dan pemasangan filter untuk menala harmonisa orde 5 dan orde 7, harmonisa menurun menjadi 3.97% dan pf pada bus 1 menuju trafo 1 mengalami perbaikan dari 80.4% menjadi 99.6% . Sedangkan kenaikan pf setelah pemasangan kapasitor bank pada bus 6 menaikkan pf bus-bus diatas nya, dari 83.7 % menjadi 95.6%.
4. Rugi-rugi daya sebelum pemasangan filter dan kapasitor sebesar 39.9 kW + 483.2 kvar menjadi 25.9 kW + 313 kvar stelah pemasangan.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah mengerjakan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai masalah harmonisa pada sistem kelistrikan KRL Indonesia, mengingat telah terjadinya beberapa kasus kebakaran pada gardu listrik pada satu dekade terakhir ini.
2. Perlu pembaharuan data dan gambar SLD Gardu Listrik pada setiap stasiun, untuk memudahkan penelitian.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lu Xiaohui, Xu Yonghai. 2017. “*Analysis of Power Quality Issues of Electrified Railway*”. *8th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*. IEEE
- [2] Pang Yan, Xu Yonghai. 2016 . “*Analysis and Treatment of Harmonic in Power Network with Railway based on ETAP Software*”. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference - Xi'an – China*. IEEE.
- [3] Roger C. Dugan ,Mark F.McGranagan ,H. Wayne Beaty.1996. *Electrical Power Quality*.McGraw Hill.
- [4] Sabri Yusra, Kurniawan Ekki. 2012. “Perancangan Filter Pasif Untuk Mengatasi Harmonisa Pada Gardu Penyearahan Pusat Listrik Aliran Atas - PT KAI Commuter Jabodetabek Indonesia”. *Jurnal.Lab.Sistim Tenaga dan Distribusi Elektrik STEI ITB Bandung, Indonesia*.
- [5] Ali, M.M., “Pengurangan Harmonisa pada Konverter 12 Pulsa Tiga Fasa Menggunakan Diagonal Recurrent Neural Network (DRNN)”, *Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia*
- [6] Arrillaga, J., D.A. Bradley, and P.S. Bodger, “*Power System Harmonics*”, John Wiley & Sons, Singapore, 1985.
- [7] Jitendra Kumar Srivastava, Vinod Kumar Singh ,” *Review on Railway Traction Power Supply System*”, *JECET*; September 2013 – November 2013; Vol.2.No.4, 1236-1250.
- [8] Bergen, A.R., *Power System Analysis*, Prentice Hall, New Jersey, 1986

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

LAMPIRAN

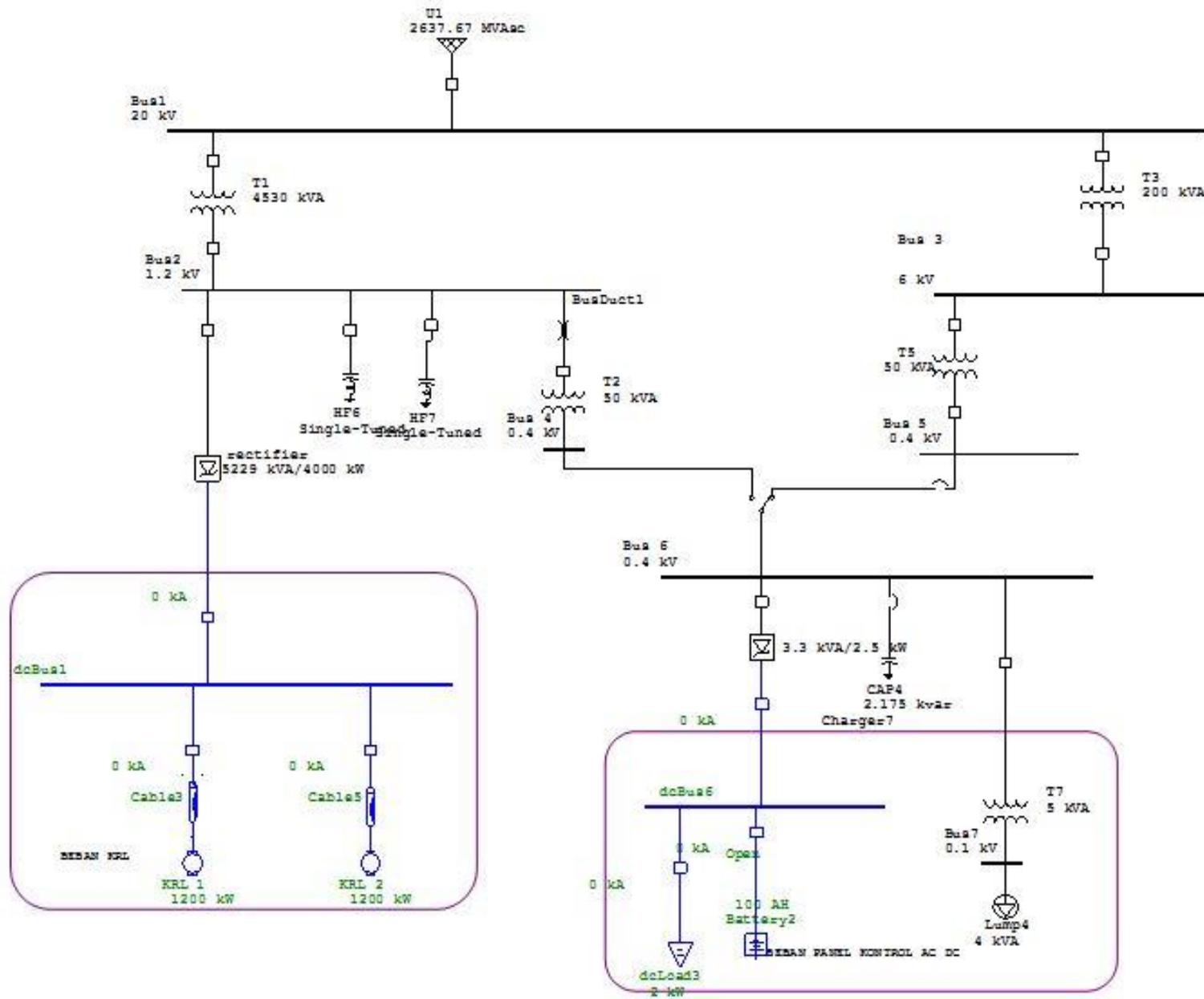
Lampiran 1 Data Peralatan

No	Kubikel	Keterangan Panel	Nama Peralatan	Name plate
1	H1	Pemisah	LB	type: KL.20/630-275/24KV/630A/SN:8909122
2	H2	Pemisah Utama	VCB	type: VB ED 202225BC-E/24KV/600A1991/SN:ML7991-2
3	H3	Pemisah Tenaga Distribusi	VCB	type: VB ED 202225BC-E/24KV/600A1991/SN:ML7991-1
4	H4	Pemutus Tenaga Penyearah	VCB	type: VB ED 202225BC-E/24KV/600A1991/SN:ML7991-3
5	D0	Kubikel Negatif	DS	type: D0W-SR1/110V/1989/SN:MK1074
6	D1	Pemutus Cepat DC Utama	HSCB	type:IR6140/1800VDC/4000A/SN:42211451C01
7	D2	Pemutus Cepat DC Keluar Cadangan	HSCB	type: AHGD-5154FSB/RATE CURRENT 3 KA/2010/ SN: 4U6083DP-5
8	D3	Pemutus Cepat DC Keluar Cadangan (UI-LNA)	HSCB	type: AHGD-5154FSB/RATE CURRENT 3 KA/2010/ SN: 4U6083DP-4
9	D4	Pemutus Cepat DC Keluar Cadangan (LNA-UI)	HSCB	type: AHGD-5154FSB/RATE CURRENT 3 KA/2010/ SN: 4U6083DP-6
10	D5	Pemutus Cepat DC Keluar Cadangan (DP-UI)	HSCB	type: AHGD-5154FSB/RATE CURRENT 3 KA/2010/ SN: 4U6083DP-1
11	D6	Pemutus Cepat DC Keluar Cadangan (UI-DP)	HSCB	type: AHGD-5154FSB/RATE CURRENT 3 KA/2010/ SN: 4U6083DP-7

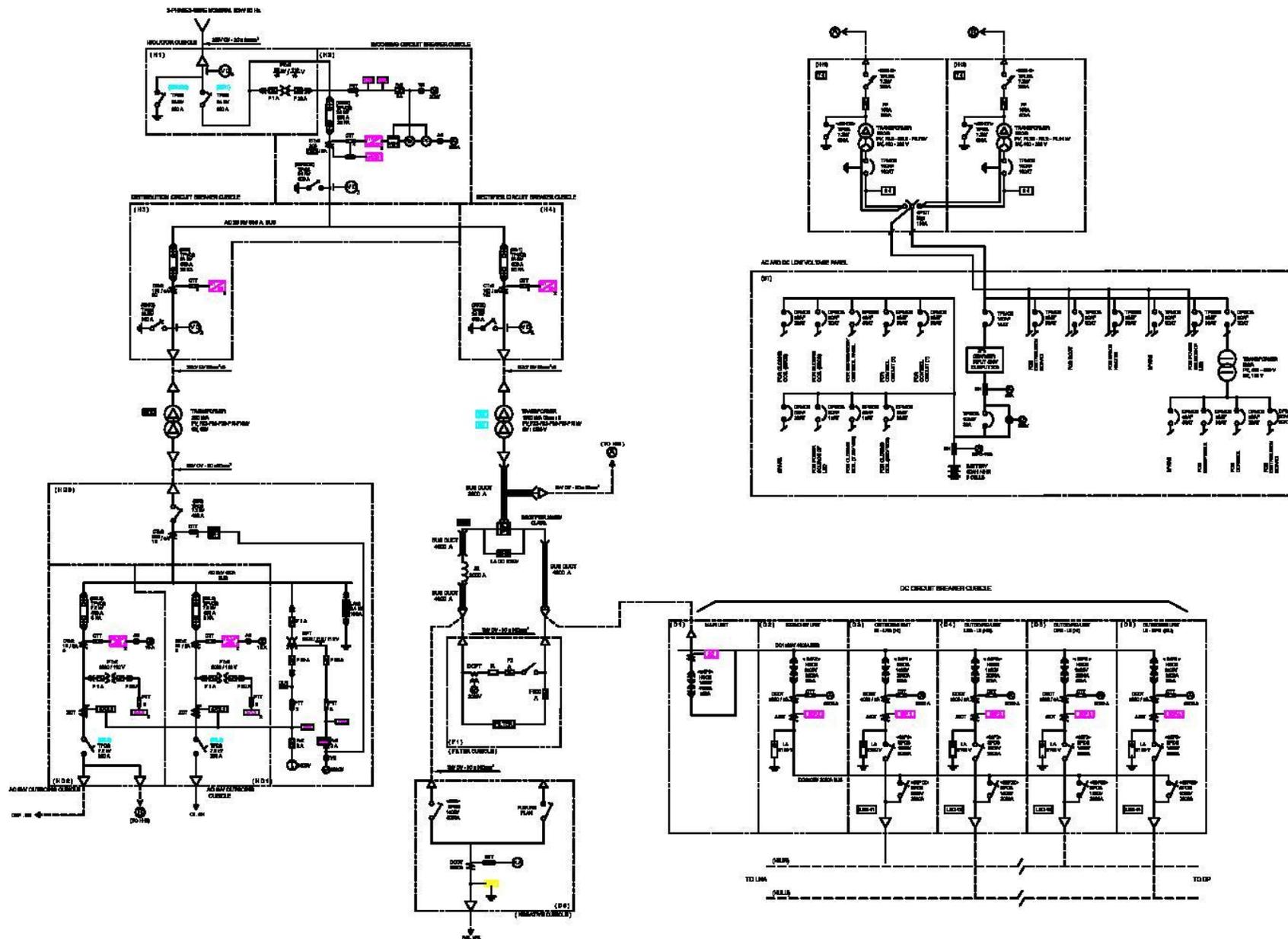
1	HD	Pemutus Tenaga		type:BEA-
2	0	Utama 6 kV	LBS	FW/6,9KV/1990/SN:8A6806 MAX0501
1	HD	Pemutus Tenaga		type: VBED-6108SC-
3	1	Distribusi 6 kV	VCB	EL/7,2KV/400A/1989/SN:ML 7441-2
1	HD	Pemutus Tenaga		type: VBED-6108SC-
4	2	Distribusi 6 kV	VCB	EL/7,2KV/400A/1989/SN:ML 7441-1
1	HH		TRANSF	type: BEA-
5	1	Trafo Bantu	ORMER	FW/50KVA/PV:F1.26-R1.2- F1.14 KV/SV:400- 231/1990/SN:8A6806MAX07 01
1	HH		TRANSF	type: BEA-
6	2	Trafo Cadangan	ORMER	FW/50KVA/PV:F1.26-R1.2- F1.14 KV/SV:400- 231/1990/SN:8A6806MAX08 02
1	BT	Panel Tegangan	CARGHE	type: YNCHX-101-
7		Rendah AC dan	R	200/400V/RATE OUT FLOAT: 116V- 20A/EQUAL:121,6- 20A/1990/SN:8C8395TH
		Baterai	BATERA	TYPE: SPT12V-
			I	100/12V/100AH/10 HOUR (9 BUAH)
1	FL1	Saringan Bunyi	DC	CATALOG NUMBER
8			FILTER	:152541LX37161Z/DC1500V
1	RS	Panel Supervisory	MODUL	
9		Remote Control	REMOTE	MISVY STC 1000
2	SC	Panel Supervisory	MODUL	TYPE
0		Remote Control	REMOTE	DT0102C2MB65/DC24V/199 2/SN: 8E8443SP
2	LB			TYPE: HR-
1	D	Panel LBD	LBD	12/DC:110V/JUN2011/SN:11 0596
2		Panel Monitoring		TYPE:
2		LBD	SDH	V8081ZD/24VDC/48A/SN:10 70537
2		Panel		INTERTRIPPING UI-
3		Intertripping	LBD	LNA,LNA-UI

2			TYPE NORSG- AY/4530KVA/CLASS:S /ONAN/20KV TO 1200
4	Transformer	TRANSF ORMER	KV/MAR1991/SN:8Q98241T 1
2			TYPE YOTR-152-
5	SR	RECTIFI ER	272/DC1500KV/4000KW/26 67A/1991SN:8C9624TH
2		DC	TYPE
6	DC Reactor	REACTO R	NOT/1500V/3000A/1991/SN: 8C9625TH
2			TYPE:NOKG/200KVA/ONA N/20KV TO
7	Transformer 6 kV	TRANSF ORMER	6KV/FEB1990/SN:8P82T1T2
2	Kabel Outgoing (DP-UI)	KABEL	KABEL 3X300
2	Kabel Outgoing (UI-DP)	KABEL	KABEL 3X300
3	Kabel Outgoing (UI-LNA)	KABEL	KABEL 3X300
3	Kabel Outgoing (LNA-UI)	KABEL	KABEL 3X300
3	Kabel Negatif (Sepur 1)`	KABEL	KABEL 3X300
3	Kabel Negatif (Sepur 2)`	KABEL	KABEL 3X300

Lampiran 2 SLD UI ETAP



UI SINGLE LINE DIAGRAM



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Makassar pada tanggal 01 Desember 1994. Sebagai anak pertama dari empat bersaudara, penulis mengawali kegiatan pendidikan formal di SD Muhammadiyah 2 Sidoarjo dilanjutkan di SMP Islam Khaira Ummah Padang, kemudian melanjutkan pendidikannya di MA Perguruan Islam Ar-risalah Padang dan pada tahun 2012 penulis diterima sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Elektro ITS, mengambil Program Studi Teknik Sistem Tenaga. Selama menjalani perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan berbagai macam wirausaha, *trading*, investasi serta *social project* kepanitian *event* di kampus maupun regional, khususnya kepesantrenan, penulis juga aktif dalam organisasi ekstra kampus seperti KAMMI.

Email : fauzan_ikhwan@ymail.com
Hp/WA : 08871330905