

ABSTRAK

Pakistan Deep Water Container Port ini merupakan proyek pembangunan pelabuhan peti kemas yang berada di Pakistan. Pelabuhan ini nantinya akan melayani bongkar muat dari kapal-kapal tanker. Oleh karena itu diperlukan motor-motor untuk melakukan hal tersebut. Pada *plant* ini terdapat beberapa motor berkapasitas besar yang dikontrol oleh *Variable Frequency Drive* (VFD) untuk mengendalikan kecepatan putar motor tersebut. Akibat adanya beban tersebut dipastikan dapat menimbulkan frekuensi harmonisa, dimana frekuensi tersebut akan berpengaruh terhadap kualitas daya yang ada pada *plant* tersebut serta dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan seperti trafo dan kabel. Untuk mencegah hal tersebut, perlu dilakukan studi perencanaan pemasangan filter untuk meredam frekuensi harmonisa yang timbul.

Oleh karena itu, dalam tugas akhir ini akan dirancang sebuah filter pasif dengan metode bertingkat (*Multistage Passive Filter*) untuk meredam frekuensi harmonisa yang timbul akibat beban motor tadi. Dalam membantu proses analisa, pengerjaan Tugas Akhir ini dibantu dengan menggunakan *software* ETAP 7.0.

Kata kunci : *Harmonisa, Filter Pasif, Multistage*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRACT

Pakistan Deep Water Container Port is a container port development projects which is located in Pakistan. This port will serves the loading and unloading activities of the tankers. Therefore we need the motors to do such things. In this plant, there are several large capacity motors controlled by Variable Frequency Drive (VFD) to control the motor's rotating speed. Due to the load, it can certainly causes frequency harmonics, where the frequency will affects the quality of power that exists in the plant and can causes damage to the equipmenst such as transformers and cables. To prevent this, studies need to be done in planning the installation of filters to minimizing the effects of frequency harmonics.

Therefore, this thesis contained a design of a passive filter with multilevel method (Multistage Passive Filters) to minimize the frequency harmonics that arising from motor's load earlier. For the process of analysis, this final project aided by using ETAP software 7.0.

Keywords: *Harmonics, Passive Filters, Multistage*

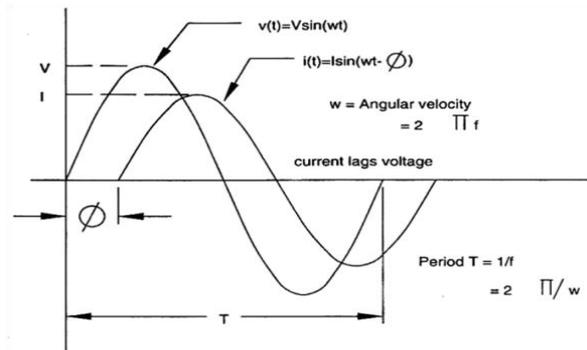
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

KONSEP DAYA, HARMONISA, DAN CARA MENGATASINYA

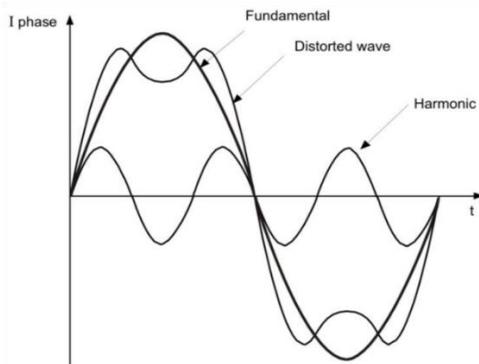
2.1 Harmonisa

Harmonisa bisa dikatakan sebagai cacat gelombang akibat adanya interferensi gelombang lain yang memiliki frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamentalnya [6]. Akibat timbulnya frekuensi harmonisa ini, maka frekuensi fundamental akan mengalami distorsi. Hal ini bisa mengakibatkan pemanasan pada peralatan, menurunkan kinerja dari proteksi sistem, timbul masalah resonansi, bahkan menurunnya kualitas daya pada sistem tersebut. Harmonisa sendiri bisa timbul akibat adanya pembebanan non linier yang tersambung pada sistem. Pada Gambar 2.1 dapat dilihat gelombang arus dan gelombang tegangan normal.



Gambar 2.1 Gelombang Sinus Arus dan Tegangan

Akibat adanya arus harmonik yang timbul, maka gelombang fundamental yang sebelumnya berbentuk sinusoidal, akan terdistorsi menjadi tidak sinusoidal lagi seperti yang terlihat pada Gambar 2.2. Hal ini terjadi akibat adanya penjumlahan dari gelombang sinusoidal fundamental dengan gelombang sinusoidal dari harmonisa yang timbul.



Gambar 2.2 Gelombang Fundamental yang Sudah Terdistorsi Harmonisa

2.1.1 Perhitungan Harmonisa dengan Metode *Fourier*

Gelombang-gelombang non sinusoidal pada umumnya timbul akibat adanya perangkat elektronika daya. Gelombang tersebut dapat terdefinisi dengan ciri-ciri sebagai berikut :

1. Berulang serta teratur mengikuti periode tegangan sumber.
2. Saat kondisi tunak, bentuk dan ukuran akan sama persis dengan periode sebelumnya.

Gelombang non sinusoidal tersebut timbul berupa fungsi waktu (ωt) yang cukup rumit untuk dianalisa. Untuk itu perlu suatu penyederhanaan agar masalah tersebut bisa diselesaikan secara matematis. Salah satu cara untuk menyederhanakan permasalahan tersebut ialah dengan mengubahnya kedalam bentuk lain, yaitu dalam domain frekuensi. Teori *Deret Fourier* bisa digunakan dalam mengubah persamaan periodik menjadi persamaan berdomain frekuensi [7].

Menurut metode Fourier, suatu fungsi periodik dapat diuraikan menjadi fungsi-fungsi sinusoidal dengan frekuensi, amplitudo, dan sudut fasa tertentu apabila memenuhi syarat-syarat sebagai berikut :

1. Fungsi tersebut merupakan fungsi periodik $f(\omega t) = f(\omega t + T)$ dimana T adalah periodenya.
2. Fungsi tersebut merupakan fungsi kontinu. Apabila fungsi tersebut tidak kontinu, jumlah ketidakkontinuitasnya harus memiliki batasan dalam satu periode.

3. Dalam selang periode, nilai rata-rata fungsi tidak boleh nol, dalam artian rata-rata fungsi harus memiliki harga tertentu.
4. Fungsi tersebut memiliki nilai maksimum dan minimum dalam satu periode T.

Dari syarat-syarat diatas, fungsi tersebut dapat diuraikan kedalam deret Fourier sebagai berikut :

$$f(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega n t + b_n \sin \omega n t) \quad (2.1)$$

dimana :

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) d\omega t \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (2.4)$$

Untuk mempercepat penyederhanaan analisa Fourier, dapat digunakan sifat-sifat khusus gelombang sebagai berikut [6] :

- a. Apabila luas siklus positif dan negatif adalah sama dalam satu periode, maka $a_0 = 0$.
- b. Apabila $f(\omega t) = -f(\omega t + \frac{T}{2})$ atau fungsi mempunyai simetri pada setengah gelombang positif dan negatif, maka akan muncul harmonik orde ganjil.
- c. Apabila $f(\omega t) = f(-\omega t)$ atau fungsi genap, maka $b_n = 0$.
- d. Apabila $-f(\omega t) = f(-\omega t)$ atau fungsi ganjil, maka $a_n = 0$.

2.1.2 Distorsi Harmonisa

2.1.2.1 Total Harmonic Distortion (THD)

Untuk mengetahui bahwa suatu sistem terdistorsi oleh harmonisa atau tidak, bisa dilihat dengan cara mengetahui nilai *Total Harmonic Distortion (THD)*. Nilai THD sendiri merupakan perbandingan nilai dari komponen harmonisa terhadap nilai pada frekuensi fundamentalnya.

Nilai THD ini merupakan persentasi dari nilai harmonisa yang timbul. Untuk nilai THD dari tegangan dan arus maksimal ini mengacu sesuai dengan standard dari IEEE Std 519-1992 yang terlihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

$$THD = \frac{[\sum_{n=2}^k U_n^2]^{\frac{1}{2}}}{U_1} \times 100\% \quad (2.5)$$

dimana :

U_n : komponen harmonisa

U_1 : komponen fundamental

k : komponen harmonisa maksimum yang diamati

Tabel 2.1 Limit Distorsi Harmonisa untuk Sistem Distribusi 120 V sampai 69 kV Berdasarkan IEEE Std 519-1992

Distorsi Harmonisa Arus Maksimum dalam Persen terhadap I_L						
Isc/ I_L	Orde Harmonisa Individual (Harmonisa Orde Ganjil)					
	<11	11≤h≤17	17≤h≤23	23≤h≤35	35≤h	TDD
<20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
Harmonisa orde genap dibatasi 25% dari Harmonisa orde ganjil di atas.						
Tidak diperbolehkan distorsi arus yang dihasilkan sistem DC, contohnya converter setengah gelombang.						
*Semua peralatan pembangkit listrik terbatas pada nilai-nilai distorsi arus terlepas dari Isc/ I_L aktual.						
dimana :						
Isc = Arus hubung singkat maksimum pada PCC						
I_L = Arus beban maksimum (komponen frekuensi fundamental) pada PCC						

Tabel 2.2 Limit Distorsi Tegangan Berdasarkan IEEE Std 519-1992

Tegangan Bus pada PCC	Distorsi Tegangan Individual (%)	THD (%)
69 kV dan ke bawah	3	5
69,001 kV sampai 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV dan ke atas	1	1,5

Untuk melakukan perhitungan tegangan distorsi (THD_v) dan arus distorsi (THD_I) dapat dilakukan menggunakan persamaan berikut :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \text{ dan } THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.6)$$

2.1.2.2 Total Demand Distortion

Perbandingan nilai rms antara komponen arus harmonisa dengan arus beban *demand* maksimum disebut sebagai *Total Demand Distortion* (TDD). Pada saat beban penuh $THD_I = TDD$, maka TDD merupakan seberapa besar distorsi arus pada sistem.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (2.7)$$

2.1.3 Sumber-sumber Harmonisa

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban, yaitu beban linier dan non-linier. Beban tersebut dikatakan linier apabila nilai arus berbanding secara linier terhadap tegangan beban. Dengan seperti ini maka gelombang arus akan sama dengan bentuk gelombang tegangan beban.

Sedangkan beban non-linier merupakan kebalikan dari beban linier, dimana bentuk gelombang arus tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan. Arus yang ditarik oleh beban non-linier ini tidak berbentuk sinusoidal tetapi periodik. Untuk lebih jelasnya, contoh-contoh dari sumber harmonisa dijabarkan sebagai berikut.

2.1.3.1 Konverter

Konverter merupakan alat elektronika daya yang berfungsi untuk mengkonversi tegangan masukan menjadi tegangan yang diinginkan. Konversi tersebut bisa berupa AC/DC, DC/AC, ataupun DC/DC. Dari kebanyakan jenis converter ini bisa menimbulkan cacat gelombang (*deforming loads*) akibat adanya proses *switching* yang terjadi pada proses konversi tersebut. Beberapa contohnya Antara lain :

- a. *Variable Frequency Drive* (VFD).
- b. *Charger* baterai.
- c. Lampu *fluorescent*, dimmer.

d. *Uninterruptible Power Supply* (UPS).

2.1.3.2 Tanur Busur Listrik (*Electric Arc Furnace*)

Tanur busur listrik merupakan komponen utama dalam proses peleburan baja. Tanur busur listrik ini berfungsi sebagai tempat untuk melebur baja atau biasa disebut dengan dapur listrik. *Furnace* berbentuk seperti mangkuk yang memiliki tutup dan memiliki tiga buah elektroda untuk mengalirkan busur listrik ke bahan baku baja dan mencairkannya agar bisa dicetak sesuai bentuk yang diinginkan. Tanur busur listrik ini merupakan komponen beban yang tidak linier dan akibatnya akan menimbulkan komponen harmonisa yang cukup besar pada jaringan tersebut.

Pada saat pengoperasiannya, tanur busur listrik bisa menimbulkan gangguan terhadap jaringan. Contoh dari gangguan tersebut antara lain :

- a. Distorsi harmonisa.
- b. Kedip tegangan.
- c. Gangguan frekuensi.
- d. Ketidakseimbangan tegangan.

Untuk mengatur tanur listrik digunakanlah poin impedansi atau bisa disebut dengan *Zset*. *Zset* ini ditentukan melalui perhitungan kestabilan busur listrik. Hal ini akan mempengaruhi perubahan elektroda, konsumsi *refractory*, dan konsumsi daya listrik yang akhirnya menimbulkan ketidakstabilan.

2.1.3.3 Transformator

Peralatan-peralatan yang mengalami saturasi seperti transformator dan peralatan elektromagnetik lainnya dengan inti besi, dan termasuk juga motor-motor (mesin-mesin berputar) merupakan sumber harmonik. Harmonik tersebut dibangkitkan oleh karakteristik magnetisasi besi yang non linier. Hal tersebut dapat diperlihatkan oleh Gambar 2.4.

Pada saat transformator tidak berbeban, tegangan primer trafo sebanding dengan EMF balik karena efek resistansi belitan dan reaktansi bocor diabaikan pada arus rendah. Tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan :

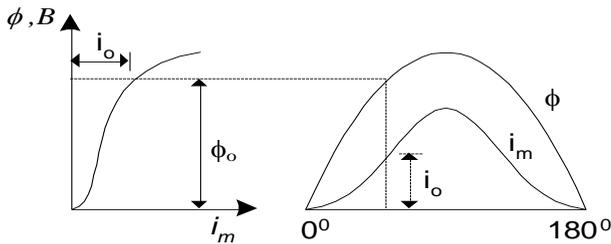
$$e_1 = -N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.8)$$

Dari persamaan di atas dapat diperoleh rata-rata fluks :

$$\varphi = -\int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{E_m}{N_1\omega} \cos\omega t = \varphi_m \cos\omega t \quad (2.9)$$

Berarti bahwa tegangan primer yang sinusoidal akan menghasilkan fluks yang sinusoidal pula pada keadaan transformator tidak berbeban.

Pada inti ideal tanpa rugi-rugi histerisis, hubungan fluks φ dan arus magnetisasi I_m ditentukan oleh kurva magnetisasi bahan besi yang digunakan didalam laminasinya seperti terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Magnetisasi Transformator (tanpa histerisis)

a. Kurva Magnetisasi

b. Bentuk Gelombang Fluks Dan Arus Magnetisasi

Suatu cara yang tepat untuk menangani harmonisa pada transformator adalah dengan memperlengkapi sambungan netral. Jadi dengan demikian sambungan netral adalah suatu yang mendasar untuk meredam harmonisa pada sistem Y-Y. Tetapi selain manfaat tersebut, pada beberapa jenis transformasi sambungan transformator, sambungan netral juga menghasilkan keuntungan-keuntungan sebagai berikut :

1. Sebagai jalur bagi arus yang tidak seimbang karena beban tidak seimbang.
2. Untuk memperkecil atau mengurangi kenaikan pada tegangan fasa yang tidak terganggu apabila ada salah satu fasa yang mengalami gangguan tanah (hubung singkat ke tanah).

2.1.3.4 Mesin-mesin Berputar

Generator sinkron dan motor induksi secara umum menghasilkan sejumlah komponen harmonik. Harmonik tersebut disebabkan oleh terjadinya kejenuhan dan distribusi fluks yang tidak sinusoidal sehingga akan terbangkit emf yang tidak sinusoidal. Hal ini apabila diberi beban, akibatnya akan menghasilkan arus harmonik.

Untuk mengatasi hal tersebut dan meredam serta memperkecil distorsi yang terjadi, dalam pembuatan generator sinkron dapat diperhatikan hal-hal sebagai berikut :

- a. Distribusi kerapatan fluks pada celah udara dibuat mendekati sinusoidal.
- b. Sudut konduktor kumparan (*coil pitch*) dibuat kurang dari 180° listrik. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi magnitude harmonik yang timbul.
- c. Dalam installasinya dapat digunakan hubungan Y pada statornya sehingga tidak muncul harmonik ketiga pada terminal generator.

2.1.4 Pengaruh yang Ditimbulkan oleh Harmonisa

Dampak negatif yang ditimbulkan akibat adanya harmonisa dibagi menjadi dua, yaitu efek seketika (*instantaneous effects*) dan efek jangka panjang (*long-term effects*) karena efek pemansan (*overheating*).

Contoh dari efek seketika yang timbul ialah pada pengoperasian kontroler sistem elektronik. Dengan adanya harmonic, dapat menimbulkan salah pembacaan (*misreading*) pada pengukuran besaran listrik. Gelombang tersebut terdistorsi pada saluran dan menimbulkan interferensi pada saluran komunikasi dan rangkaian control atau monitoring.

Sedangkan efek jangka panjang yang sering terjadi adalah *overheating*, misalnya pada kapasitor. *Overheating* yang terjadi pada mesin-mesin listrik maupun transformator terjadi karena adanya rugi-rugi energi tambahan akibat harmonik.

Pada kabel dan peralatan, rugi-rugi energi tambahan ini disebabkan oleh bertambahnya nilai rms arus untuk daya aktif yang sama dan bertambahnya resistansi inti yang sebanding dengan bertambahnya frekuensi (karena *skin effect*).

Distorsi harmonisa bisa menyebabkan terjadinya pergeseran *voltage zero crossing*, yang berakibat pada kesalahan operasi bila digunakan untuk sinkronisasi control. Komputer dan peralatan sejenisnya membutuhkan sumber AC dimana kandungan harmonisa THD (*Total Harmonic Distortion*) tegangannya tidak lebih dari 5% dan untuk masing-masing harmonisa tidak boleh lebih dari 3% gelombang dasar (50Hz).

2.1.4.1 Rugi-rugi pada Konduktor Kabel dan Kawat Transmisi

Adanya harmonisa yang timbul pada suatu sistem kelistrikan dapat menimbulkan resonansi yang menimbulkan peningkatan tegangan. Akibatnya kabel dan isolator lainnya akan mengalami stress tegangan berlebih dan korona. Hal tersebut dapat menyebabkan kegagalan isolasi bahkan mempercepat penuaan (*aging*). Dari segi pengukuran juga dapat terjadi kesalahan. Alat ukur yang bekerja berdasarkan induksi seperti *watt-hour meter*, dirancang dan dikalibrasi untuk gelombang sinus. Harmonisa membangkitkan tambahan kopel atau *torque electromagnetic* pada *disk*, sehingga hasil pengukurannya menjadi lebih tinggi.

Meningkatnya rugi transmisi yang disebabkan oleh meningkatnya nilai rms gelombang arus dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R \tag{2.10}$$

dimana I_n adalah arus harmonik ke- n dan R adalah resistansi sistem.

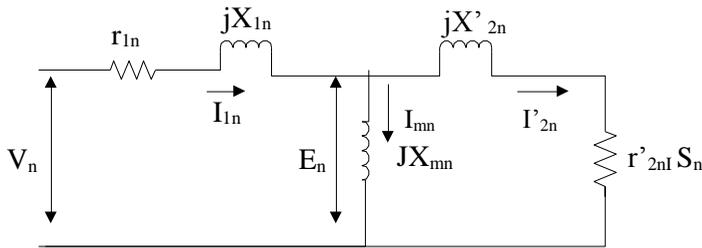
2.1.4.2 Pengaruh Harmonik pada Generator Sinkron

Harmonisa juga memiliki pengaruh terhadap generator sinkron maupun mesin berputar lainnya. Hal tersebut bisa terjadi akibat adanya putaran fluks yang terdistorsi sehingga tidak berbentuk sinusoidal. Harmonisa terjadi akibat timbulnya EMF yang tidak sinusoidal. Dampak yang timbul akibat hal tersebut adalah sebagai berikut :

- a. Beban non-linier akan menyebabkan rugi-rugi tambahan pada generator sinkron.
- b. Rugi-rugi tambahan akibat beban non-linier disebabkan oleh rugi-rugi arus urutan nol dan rugi-rugi arus urutan negatif.

- c. Dalam sistem pembangkitan energi listrik sendiri yang umumnya menggunakan konfigurasi tiga fasa empat kawat, kontribusi rugi-rugi tambahan akibat arus urutan nol lebih besar dibandingkan rugi-rugi tambahan akibat oleh arus urutan negatif.

Rangkaian penyederhanaan ekivalen yang paling umum pada mesin induksi digambarkan pada Gambar 2.4. Pada gambar tersebut resistansi *core* (R_c) diabaikan karena memiliki arus yang kecil.



Gambar 2.4 Rangkaian Penyederhanaan Motor Induksi Untuk Harmonik ke- n

Parameter tersebut berhubungan dengan frekuensi dan arus belitan. Akibat adanya arus harmonik yang timbul pada stator mesin AC, maka terjadi motor slip harmonik positif (S_n). Peristiwa ini menimbulkan torsi shaft pada arah sesuai dengan kecepatan medan harmonik sehingga semua harmonik urutan positif akan memperkuat torsi poros, sedangkan harmonik urutan negatif akan bertindak sebaliknya. Dari pernyataan tersebut, maka dapat dibuat persamaan sebagai berikut :

Harmonik I_n

$$T_n = \left(\frac{I_n^2}{n}\right) \left(\frac{r'_{2n}}{S_n}\right) \quad (2.11)$$

apabila S_n mendekati 1, maka persamaan diatas menjadi

$$T_n = \left(\frac{I_n^2}{n}\right) r'_{2n} \quad (2.12)$$

Dengan menggunakan hubungan $V_n = I_n Z_n$ dan $Z_n \cong nX_l$, torsi dapat dinyatakan dalam bentuk tegangan harmonik yaitu :

$$T_n = \left(\frac{I_n^2}{n^3}\right) \left(\frac{r_{2n}}{X_1^2}\right) \quad (2.13)$$

Slip pada frekuensi harmonik mendekati satu, maka torsi yang timbul akan sangat kecil. Torsi tersebut timbul berpasangan sehingga menghilangkan satu sama lain. Akibatnya, pengaruh dari rata-rata torsi dapat diabaikan pada beberapa kasus.

2.1.4.3 Pengaruh terhadap Sistem Proteksi

Harmonisa bisa juga mengganggu kinerja dari sistem pengamanan pada suatu sistem. Hal ini sangatlah berbahaya karena dengan terjadinya kesalahan proteksi akibat harmonik yang timbul, akan menggagalkan pengamanan peralatan apabila terjadi *fault*. Dampak-dampak negatif tersebut adalah sebagai berikut :

1. Terjadinya penurunan rating (*derating*) akibat pemanasan yang timbul.
2. Terjadinya peningkatan panas dan rugi-rugi pada komponen *switchgear* yang akan menyebabkan penurunan kemampuan mengalirkan arus dan mempersingkat umur dari komponen isolator.
3. Timbul getaran mekanis pada panel listrik yang merupakan getaran resonansi mekanis akibat harmonisa frekuensi tinggi.
4. Dengan timbulnya harmonisa dapat memberi tambahan torsi pada kWh-meter yang berjenis elektromagnetis piringan berputar. Akibatnya akan terjadi kesalahan pengukuran karena piringan akan berputar lebih cepat.
5. Triplen harmonisa pada kawat netral dapat memberikan induksi harmonisa yang mengganggu sistem telekomunikasi.
6. *Circuit breaker* akan bekerja tidak sesuai dengan *setting* karena CB akan bekerja di bawah arus pengenalnya bahkan mungkin tidak bekerja pada arus pengenal.
7. Pada sistem tenaga, terjadi kenaikan arus pada kawat netralnya. Tegangan sentuh peralatan juga mengalami kenaikan dan berbahaya untuk operator.

2.1.4.4 Pengaruh Terhadap Transformator

Belitan delta pada transformator daya bertujuan untuk membuat arus tak seimbang bersirkulasi. Arus urutan nol yang bersirkulasi

menyebabkan pemanasan yang berlebih. Untuk mengatasi pemanasan berlebih akibat harmonisa, biasanya kapasitas transformator diperbesar dengan tujuan memperbesar kapasitas pendinginan. Akan tetapi, hal ini justru menimbulkan masalah baru karena konduktor yang lebih besar menyebabkan pemanasan yang lebih besar pula akibat harmonisa frekuensi tinggi. Penambahan kapasitas transformator juga akan mengakibatkan bertambahnya arus harmonisa yang mengalir pada sistem. Dampak langsung yang bisa dirasakan pada transformator saat terkena harmonisa ialah bertambahnya suhu transformator tersebut. Dengan naiknya suhu tersebut akan menyebabkan kerugian sebagai berikut :

1. Bertambahnya rugi-rugi daya akan mengurangi kapasitas pembebanan transformator.
2. Mengurangi kemampuan arus maksimum.
3. Mengurangi umur dari transformator tersebut.

2.1.4.5 Pengaruh Harmonik terhadap Faktor Daya

Dalam penggunaan sistem tenaga listrik, yang paling sering ditemukan ialah beban-beban dengan karakteristik faktor kerja *lagging* atau bersifat induktif. Contohnya saja motor-motor, transformator daya, dan converter yang menarik arus magnetisasi dari jaringan. Dengan begitu, kebutuhan daya reaktif akan meningkat dan berakibat pada penurunan faktor daya. Turunnya daya reaktif tersebut menimbulkan kerugian bagi konsumen dan juga pembangkit. Kerugian tersebut adalah sebagai berikut :

➤ Konsumen

1. Adanya perbedaan tegangan pada saat beban ringan dan beban penuh yang berarti pengaturan tegangan menurun.
2. Dengan penggunaan beban tetap tetapi memerlukan kapasitas daya yang lebih besar. Hal ini tentu saja merugikan karena konsumen harus menaikkan kapasitas dayanya.

➤ Pembangkit

1. Penurunan tegangan meningkat.
2. Menurunnya efisiensi dari peralatan. Dengan menurunnya $\cos \varphi$ dan daya aktif yang sama, akan memperbesar arus yang melalui peralatan. Mekan sesuai rumus I^2R , rugi-rugi yang timbul pada peralatan akan meningkat seiring meningkatnya arus yang timbul.

2.2 Daya pada Sistem Tenaga Listrik

2.2.1 Pengertian

Pada dasarnya harmonisa bergantung kepada analisa aliran daya. Untuk lebih jelasnya, akan dijabarkan konsep tentang aliran daya tenaga listrik. Dalam sistem tenaga listrik, daya dibagi menjadi tiga, yaitu :

a. Daya Aktif

Daya aktif, P (Watt) atau bisa juga disebut daya real, adalah energi rata-rata yang dikirimkan dan dapat dilihat langsung serta bisa dirasakan.

b. Daya Reaktif

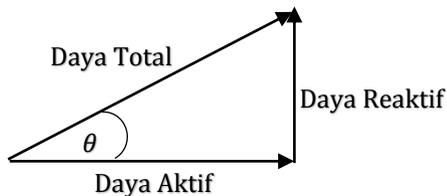
Daya reaktif, Q (VAR) atau bisa disebut juga daya imajiner. Daya tersebut tidak bisa dirasakan atau dilihat secara langsung. Daya tersebut biasa dibutuhkan untuk proses induksi, seperti medan magnet.

c. Daya Total

Daya total, S (VA) merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus rms dari daya aktif dan daya reaktif.

Untuk menghitung daya total, dapat dipergunakan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Daya Total (VA)} &= \sqrt{(\text{Daya Aktif})^2 + (\text{Daya Reaktif})^2} \\ I_t &= \sqrt{(V \cdot I \cdot \cos \theta)^2 + (V \cdot I \cdot \sin \theta)^2} \end{aligned} \quad (2.14)$$



Gambar 2.5 Segitiga Daya

Dari Gambar 2.5 ditunjukkan diagram fasor dari segitiga daya. Sudut yang terbentuk antara daya aktif dengan daya total merupakan $\cos \theta$ atau bisa disebut kualitas daya. Semakin kecil nilai dari θ , maka akan

semakin baik kualitas dayanya. Sedangkan sebaliknya, apabila θ semakin besar nilainya, maka kualitas daya juga akan berkurang.

Faktor daya dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Faktor Daya} &= \frac{\text{Daya rata-rata}}{(\text{Tegangan rms} \times \text{Arus rms})} \\ &= \frac{\text{Daya aktif}}{\text{Daya total}} = \frac{kW}{kVA} \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.2.2 Perhitungan Perbaikan Faktor Daya

Apabila dilihat dari Gambar 2.5, secara trigonometri dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$\cos \theta = \frac{\text{Daya aktif (kW)}}{\text{Daya Total (kVA)}} \quad (2.16)$$

$$\tan \theta = \frac{\text{Daya reaktif (kVAR)}}{\text{Daya aktif (kW)}} \quad (2.17)$$

Dalam sistem tenaga listrik, daya aktif pada umumnya bernilai tetap. Oleh karena itu, $\cos \theta$ atau faktor daya akan sangat bergantung terhadap perubahan dari daya reaktif. Daya reaktif inilah yang nantinya harus diatasi agar factor daya menjadi baik. Berdasarkan persamaan 2.17, maka didapatkan perhitungan sebagai berikut :

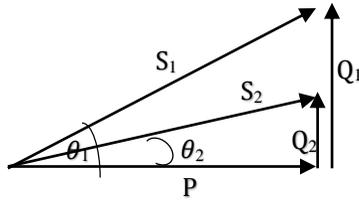
$$\begin{aligned} \text{Daya reaktif} &= \text{Daya aktif} \times \tan \theta \\ Q &= P \times \tan \theta \end{aligned} \quad (2.18)$$

dari persamaan 2.18 maka didapat :

$$Q_1 = P \times \tan \theta_1 \quad (2.19)$$

$$Q_2 = P \times \tan \theta_2 \quad (2.20)$$

Untuk memperbaiki faktor daya, maka nilai θ harus sebisa mungkin mendekati harga 1. Nilai θ nantinya akan berpengaruh terhadap besarnya kapasitor yang akan ditambahkan untuk memperbaiki faktor daya tersebut. Gambar 2.6 memperlihatkan bagaimana perbaikan faktor daya dapat dilakukan.



Gambar 2.6 Diagram Perbaikan Faktor Daya

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 \quad (2.21)$$

$$\Delta Q = P \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (2.22)$$

2.3 Filter Harmonisa

Pemasangan filter harmonisa bertujuan untuk mengurangi amplitudo satu atau lebih frekuensi tertentu dari tegangan dan arus. Penambahan filter pada sistem tenaga listrik yang mengandung harmonisa bisa meredam penyebaran arus harmonisa ke seluruh jaringan dan dapat ditekan sekecil mungkin. Pemasangan filter juga memberikan kompensasi daya reaktif pada frekuensi fundamental, maka akan terjadi pula perbaikan faktor daya pada sistem.

2.3.1 Filter Pasif

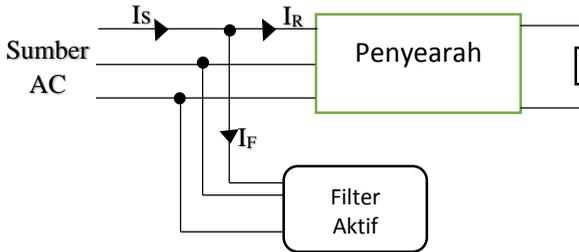
Filter pasif lebih banyak digunakan dalam dunia industri karena selain harganya yang relatif murah, penggunaannya pun cukup sederhana. Filter pasif sendiri memiliki dua jenis, yaitu filter pasif seri dan juga filter pasif parallel. Filter pasif seri bekerja sebagai pembangkit impedansi tinggi pada frekuensi tertentu yang akhirnya bisa meredam frekuensi harmonisa pada orde tersebut. Sedangkan filter pasif parallel bekerja sebagai *trap* yang memiliki impedansi yang rendah pada frekuensi tertentu. Secara umum, filter pasif terbagi atas :

- Filter dengan penalaan tunggal (*Single Tuned Filter*).
- Filter dengan penalaan ganda (*Double Tuned Filter*).
- *High Pass Damp Filter Type*.

2.3.2 Filter Aktif

Filter aktif bekerja dengan cara membangkitkan arus dan tegangan yang sesuai dengan bentuk sinyal harmonisa pada sistem tetapi berbeda fase sebesar 180° sehingga penjumlahannya adalah nol. Berdasar sifat tersebutlah filter aktif ini bisa meredam frekuensi harmonisa.

Filter ini disusun dari peralatan berbasis elektronika daya. Dari Gambar 2.7 berikut ini merupakan contoh pemakaian umum dari filter berjenis aktif.



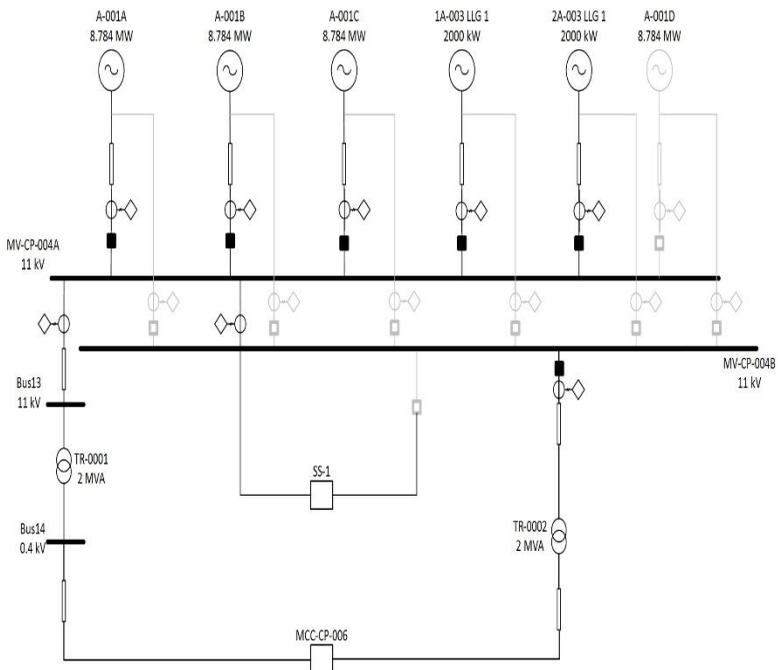
Gambar 2.7 Diagram Filter Aktif

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN *PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT PROJECT*

3.1 Sistem Kelistrikan *Pakistan Deep Water Container Port Project*

Terdapat 6 unit pembangkit yang ada di *Pakistan Deep Water Container Port Project*. Kapasitas masing-masing pembangkit, yaitu 4 unit kapasitas 8.784 MW (1 unit sebagai *backup*) dan 2 unit kapasitas 2000 kW. Pada *Project* ini terdapat 2 buah *network utility*, yaitu SS-1 dan MCC-CP-006. Sistem kelistrikan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan Utama pada *Pakistan Deep Water Container Port Project*

3.2 Pembangkitan dan Pembebanan pada *Pakistan Deep Water Container Port Project*

Total pembangkit yang terdapat pada *Pakistan Deep Water Container Port Project* ada 6 unit, dimana 5 unit yang beroperasi dan 1 unit bertindak sebagai *backup*. Adapun kapasitas pembangkitannya ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Nilai Kapasitas Pembangkitan

No	ID	MW	MVar	kV	%PF
1	A-001A (<i>Swing</i>)	8.784	4.821	11	80
2	A-001B (<i>Voltage Control</i>)	8.784	2.812	11	80
3	A-001C (<i>Voltage Control</i>)	8.784	2.812	11	80
4	1A-003 LLG 1 (<i>MVar Control</i>)	2	0.5	11	80
5	2A-003 LLG 1 (<i>MVar Control</i>)	2	0.5	11	80
6	2A-003 LLG 1 (<i>Swing Backup</i>)	8.784	0	11	80

Pada *Project* ini, total pembangkitan dan total pembebanan dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Total Pembangkitan dan Pembebanan

Name	MW	MVar	MVA	%PF
<i>Source (Swing Bus)</i>	22.877	11.445	25.858	89.4 Lag
<i>Source (Non Swing Bus)</i>	0	0	0	-
<i>Total Demand</i>	22.898	11.887	25.8	88.75 Lag
<i>Total Motor Load</i>	21.444	10.69	23.961	89.5 Lag
<i>Total Static Load</i>	1.305	0.937	1.606	81.23 Lag

3.3 Distribusi Kelistrikan pada *Pakistan Deep Water Container Port Project*

Pada *Project* ini, aliran distrisbusi kelistrikan dilakukan secara radial dari pembangkit ke *network utility*. Untuk meningkatkan keandalan, dalam proses pendistribusian tersebut dibuat jalur *backup* agar proses tetap berjalan apabila salah satu saluran mengalami gangguan. Daya yang dihasilkan dari kelima generator yang aktif, yaitu generator A-001, A-001B, A-001C, 1A-003 LLG-1, dan 2A-003 LLG-1 disalurkan langsung ke *network utility* SS-1 dengan level tegangan 11 kV, sedangkan disalurkan ke MCC-CP-006 dengan cara menurunkan tegangan dari level 11 kV ke 0,4 kV menggunakan trafo TR-0001.

3.3.1 *Network Utility* SS-1

Pada *network* ini berisi dua buah *Lump Load*, yaitu *Lump* 2 dan *Lump* 3. Masing-masing dari *Lump* tersebut memiliki rating 0.4 kV sehingga dibutuhkan penurunan tegangan dari 11 kV ke 0.4 kV menggunakan trafo T3. Selain itu, pada *network* ini terdapat empat buah *network utility* lagi, yaitu SS-6, SS-7, SS-2, dan SS. Pada *network* SS-6 terdapat beban-beban motor yang dikontrol oleh *Variable Frequency Drive*. Beban tersebut adalah 2 buah motor kapasitas 700 kW, 6 buah motor kapasitas 2000 kW, serta ditambah sebuah beban *Lump* berkapasitas 250 kVA. *Lump* tersebut menggunakan level tegangan 0.4 kV sehingga dibutuhkan trafo *step down*. Akibat adanya motor-motor yang dikontrol oleh VFD tersebut, maka harmonisa menjadi muncul. Oleh karena itu, pada bus ini nantinya akan dipasang filter yang diharapkan bisa meredam bahkan menghilangkan frekuensi harmonisa yang timbul. Apabila diuji dengan menggunakan simulasi ETAP, harmonisa yang timbul pada bus tersebut ternyata sebesar 17.42% THD dan 41.13% TDD serta tegangannya yang seharusnya bernilai 11 kV, naik menjadi 11.15 kV. Tentu saja hal ini akan mempengaruhi kinerja dari sistem kelistrikan yang ada pada *Project* ini.

Apabila melihat *network* SS-7, disana juga terdapat beban-beban motor. Beban tersebut adalah 8 buah motor berkapasitas 2000 kW serta sebuah *Lump* berkapasitas 250 kVA. *Lump* ini juga memerlukan trafo *step down* untuk menurunkan tegangan dari 11 kV ke 0.4 kV. Motor-motor kapasitas besar ini juga mengakibatkan timbulnya harmonisa yang cukup

tinggi, yaitu sebesar 17.35% THD dan 42,67 TDD serta tegangannya juga naik dari 11 kV menjadi 11.16 kV.

Pada *network* SS-2 juga terdapat beberapa beban motor, tetapi kapasitasnya tidak terlalu besar dan juga tidak dibutuhkan penambahan VFD sebagai alat bantu *starting*-nya. Beban-beban tersebut adalah 7 buah motor kapasitas 50x20 kW, 1 buah motor kapasitas 80x20 kW, serta *Lump* dengan kapasitas 315 kVA. Masing-masing dari beban tersebut menggunakan level tegangan sebesar 0.4 kV, maka dibutuhkan 9 buah trafo untuk menurunkan tegangan bagi masing-masing beban tersebut.

Dan yang terakhir, pada *network* SS hanya terdapat dua buah beban, yaitu *Lump* yang berkapasitas 1581 kVA dan kapasitas 1500 kVA. *Lump* tersebut juga menggunakan level tegangan 0.4 kV sehingga dibutuhkan trafo *step down*.

3.3.2 Network Utility MCC-CP-006

Pada *network* ini berisi beban-beban kecil. Beban tersebut adalah 2 buah *Induction Machine* kapasitas 15.5 kW, 2 buah *Induction Machine* kapasitas 11 kW, 4 buah *Induction Machine* kapasitas 0.8 kW, 1.6 kW, 37 kW, dan 30 kW. Selain itu terdapat juga beban 6 buah DC *Charger*. Dan yang terakhir ialah 16 buah beban *static*.

Untuk lebih jelasnya, data-data dari transformator yang ada pada *Pakistan Deep Water Container Port Project* ini, dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data Transformator pada *Pakistan Deep Water Container Port Project*

No	ID	MVA	Rating (kV)	%Z	Konfigurasi
1	TR-0001	2	11/0.4	12.5	Delta/Wye
2	TR-0002	2	11/0.4	6	Delta/Wye
3	T1	2.5	11/0.4	6	Delta/Wye
4	T3	0.2	11/0.4	4	Delta/Wye
5	T4	0.2	11/0.4	4	Delta/Wye

Tabel 3.3 Data Transformator pada *Pakistan Deep Water Container Port Project* (lanjutan)

No	ID	MVA	Rating (kV)	%Z	Konfigurasi
6	T5	0.25	11/0.4	4	Delta/Wye
7	T6	0.25	11/0.4	4	Delta/Wye
8	T7	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
9	T8	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
10	T9	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
11	T10	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
12	T11	0.315	11/0.4	6	Delta/Wye
13	T12	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
14	T13	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
15	T14	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
16	T15	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
17	T17	2.5	11/0.4	6	Delta/Wye

Sedangkan, data-data beban motor eksisting yang terdapat pada *network* SS-1 terdapat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Data-data Motor pada SS-1

No	ID	kW	kVA	kV	%PF
1	Mtr1	700	810	11	92.34
2	Mtr2	700	810	11	92.34
3	Mtr3	2000	2200	11	92.81
4	Mtr4	2000	2200	11	92.81
5	Mtr5	2000	2295	11	92.78
6	Mtr6	2000	2295	11	92.78
7	Mtr7	2000	2295	11	92.78
8	Mtr8	2000	2295	11	92.78
9	Mtr30	2000	2199	11	92.38

Tabel 3.4 Data-data Motor pada SS-1 (lanjutan)

No	ID	kW	kVA	kV	%PF
10	Mtr10	2000	2453	11	85.24
11	Mtr11	2000	2200	11	92.81
12	Mtr12	2000	2200	11	92.81
13	Mtr18	2000	2295	11	92.78
14	Mtr19	2000	2295	11	92.78
15	Mtr20	2000	2295	11	92.78
16	Mtr17	2000	2295	11	92.78
17	Mtr21	20	25.3	0.4	88.9
18	Mtr22	20	25.3	0.4	88.9
19	Mtr23	20	25.3	0.4	88.9
20	Mtr24	20	25.3	0.4	88.9
21	Mtr25	20	25.3	0.4	88.9
22	Mtr26	20	25.3	0.4	88.9
23	Mtr27	20	25.3	0.4	88.9
24	Mtr28	20	25.3	0.4	88.9

3.4 Data Motor sebagai Sumber Harmonik

Dari data-data motor yang telah dijabarkan sebelumnya, terdapat motor yang menimbulkan harmonik akibat pengontrolan oleh VFD. Motor-motor tersebut terdapat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Data VFD pada Motor Penghasil Harmonik

No	ID	Merk VFD	Jenis VFD
1	Mtr1	ABB	ACS600 6P
2	Mtr2	ABB	ACS600 6P
3	Mtr3	Typical-IEEE	XFMR Magnet
4	Mtr4	ABB	ACS600 6P
5	Mtr5	ABB	ACS600 6P

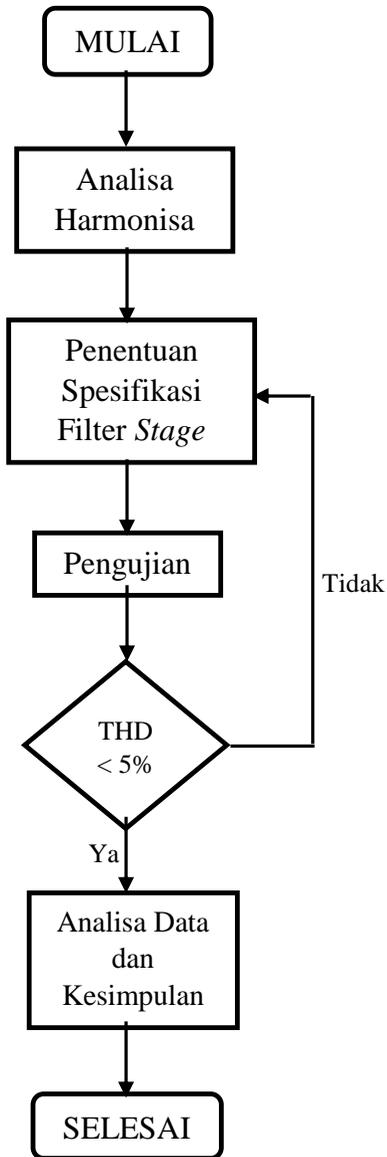
Tabel 3.5 Data VFD pada Motor Penghasil Harmonik (lanjutan)

No	ID	Merk VFD	Jenis VFD
6	Mtr6	ABB	ACS600 6P
7	Mtr7	ABB	ACS600 6P
8	Mtr8	ABB	ACS600 6P
9	Mtr30	ABB	ACS600 6P
10	Mtr10	ABB	ACS600 6P
11	Mtr11	ABB	ACS600 6P
12	Mtr12	ABB	ACS600 6P
13	Mtr18	ABB	ACS600 6P
14	Mtr19	ABB	ACS600 6P
15	Mtr20	ABB	ACS600 6P
16	Mtr17	ABB	ACS600 6P

3.5 Langkah Penyelesaian untuk Meredam Harmonik yang Timbul di *Pakistan Deep Water Container Port Project*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, tujuan dari pengerjaan Tugas Akhir ini adalah untuk meredam bahkan menghilangkan frekuensi harmonisa yang timbul akibat adanya beban motor berkapasitas besar yang dikontrol dengan VFD. Oleh karena itu, dengan cara mensimulasikan sistem kelistrikan pada *Project* tersebut dengan menggunakan *software* ETAP 7.0. Hasil yang didapat dari simulasi tersebut akan menjadi acuan dalam penentuan spesifikasi filter yang akan dipasang pada *Project* tersebut.

Untuk mengawali pengerjaan Tugas Akhir ini, dilakukan pelengkapan data dari *Single Line Diagram* (SLD), *datasheet* dari peralatan, serta referensi-referensi yang diperlukan. Setelah itu, pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 7.0. dengan menggunakan *software* tersebut dapat menganalisa bagaimana aliran daya dan harmonisa yang terjadi. Analisis harmonisa berfokus kepada bus-bus yang paling berdekatan dengan beban motor yang dikontrol oleh VFD tadi karena pada umumnya darisanalah sumber frekuensi harmonisa timbul. Pada akhirnya, untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini, akan dijabarkan melalui *flowchart* yang terdapat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 *Flowchart* Pengerjaan Tugas Akhir

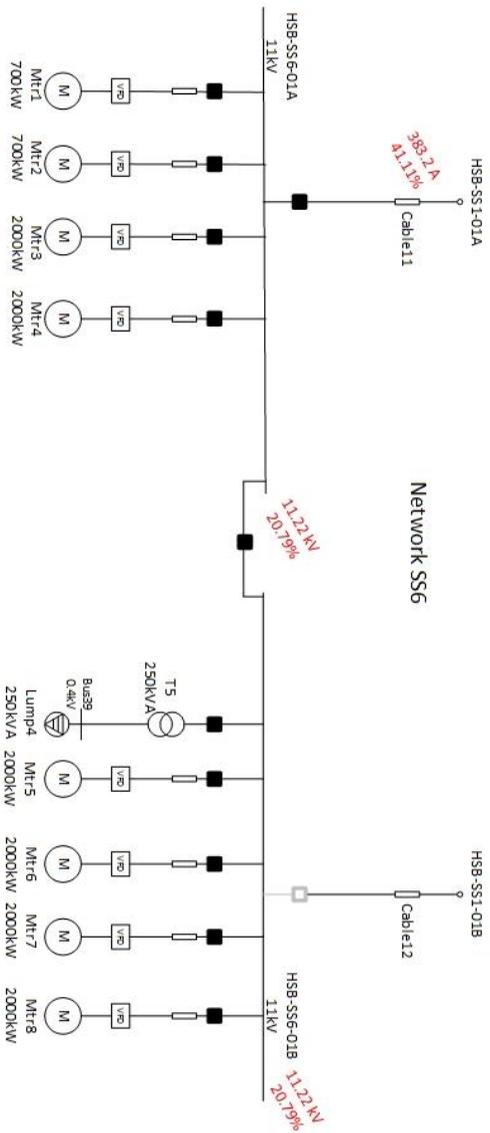
BAB IV

ANALISIS DAN HASIL SIMULASI

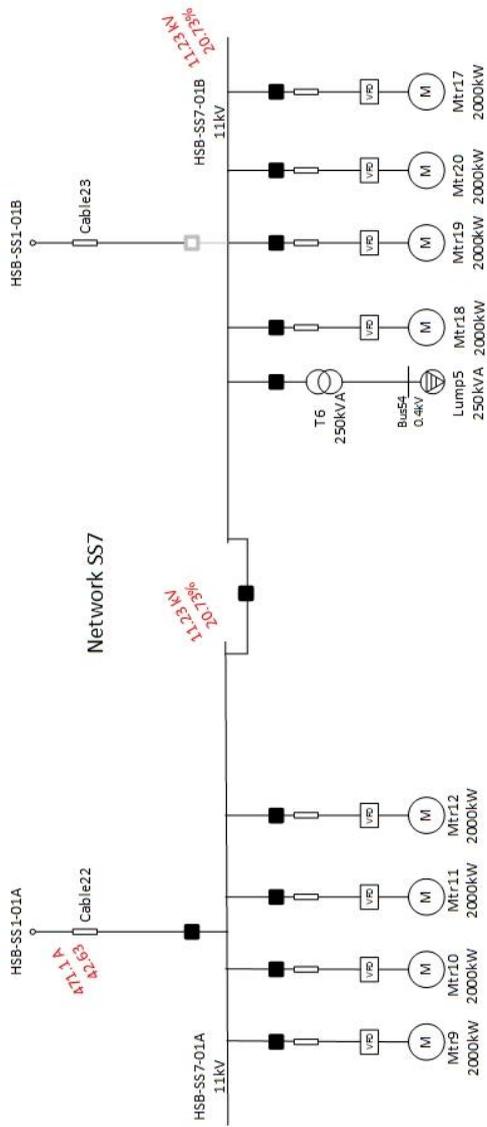
Pada *plant Pakistan Deep Water Container Port Project* ini berfokus pada perbaikan daya dan juga peredaman bahkan penghilangan frekuensi harmonisa yang timbul. Perbaikan faktor tersebut dilakukan dengan cara menjalankan simulasi dari sistem tersebut dan melakukan analisis terhadap peristiwa yang terjadi. Untuk melakukan hal tersebut, dilakukan beberapa tahap agar bisa mendukung dalam proses analisa dalam bab ini. Hal yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Menjalankan simulasi aliran daya dari sistem kelistrikan di *Pakistan Deep Water Container Port Project* dan melakukan analisa faktor daya pada *plant* tersebut.
2. Melakukan simulasi harmonisa yang terjadi pada *plant* tersebut dan berfokus terhadap bus-bus yang memang memiliki motor dengan menggunakan VFD sebagai alat bantu saat *starting*, yaitu bus **HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B**.
3. Melakukan pemasangan filter harmonisa pada bus-bus yang disebutkan pada poin 2. Spesifikasi dari filter disesuaikan dengan kebutuhan pada bus tersebut.
4. Setelah dilakukan pemasangan filter, dilakukan analisa perbandingan faktor daya dan harmonisa setelah dipasang filter dan sebelum pemasangan untuk melihat kinerja dari filter yang terpasang.

Untuk memperjelas letak bus dan motor-motor penghasil harmonisa yang telah disebutkan, gambar dari bus akan diperlihatkan oleh Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Masing-masing bus tersebut memiliki nilai THD_v dan THD_i yang cukup tinggi dan ini dapat diketahui setelah menjalankan simulasi harmonisa pada *plant*. Dari gambar tersebut juga diperlihatkan nilai THD_v yaitu nilai yang berada di bus, dan nilai THD_i ialah nilai yang berada pada kabel.



Gambar 4.1 Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B (Network SS6)



Gambar 4.2 Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B (Network SS7)

4.1 Simulasi Sistem Kelistrikan di *Pakistan Deep Water Container Port Project*

Dalam menjalankan simulasi, akan dibagi menjadi tiga bagian penting untuk mengetahui seberapa besar frekuensi harmonisa yang mendistorsi pada sistem. Proses analisa frekuensi harmonisa akan berfokus terhadap bus HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B karena pada bus inilah yang terdapat motor kapasitas besar yang dikontrol dengan menggunakan VFD. Hal yang akan dilakukan tersebut adalah sebagai berikut :

1. Simulasi sistem kelistrikan tanpa penambahan filter.
2. Simulasi sistem kelistrikan dengan menggunakan penambahan filter pada bus yang telah disebutkan.
3. Analisa harmonisa apabila CB40 dibuka, yaitu aliran listrik ke bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B diputus lalu dilihat kinerja dari filter apakah masih tetap bisa mengatasi distorsi harmonisa.
4. Analisa harmonisa apabila CB195 dibuka, yaitu aliran listrik ke bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B diputus lalu dilihat kinerja dari filter apakah masih tetap bisa mengatasi distorsi harmonisa.

4.2 Data-data Bus Hasil Simulasi Harmonisa

Berikut ini adalah data-data hasil simulasi harmonisa yang dilakukan pada sistem. Data tersebut tertuang pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter

From ID	To ID	kV	THD _v (%)	THD _i (%)
Bus1	HSB-SS2-01B	11	16.97	10.30
Bus2	Bus9	11	17.23	18.80
Bus3	Bus10	11	17.23	17.84
Bus4	Bus11	11	17.23	17.84
Bus5	Bus12	11	16.96	26.53
Bus6	HSB-SS2-01B	11	16.96	32.83
Bus9	Bus2	11	17.25	18.80
Bus10	Bus3	11	17.25	17.84

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter (lanjutan)

From ID	To ID	kV	THDv (%)	THDi (%)
Bus11	Bus4	11	17.25	17.84
Bus12	Bus5	11	17.25	26.53
Bus13	MV-CP-004A	11	17.24	7.12
Bus14	Bus92	0.4	12.40	7.49
Bus15	MCC-CP-006 BUS C	0.4	12.30	0
Bus16	Bus15	11	12.30	0
Bus19	HSB-SS2-01B	11	16.96	32.83
Bus21	HSB-SS2-01B	11	16.96	32.83
Bus22	HSB-SS1-01A	0.4	14.21	11.53
Bus23	HSB-SS1-01B	0.4	14.21	11.53
Bus25	HSB-SS2-01B	11	16.96	29.91
Bus26	HSB-SS2-01A	11	16.96	24.69
Bus28	Bus31	11	17.25	26.53
Bus31	Bus28	11	17.24	26.53
Bus33	HSB-SS6-01A	11	17.48	20.57
Bus34	HSB-SS6-01A	11	17.56	45.36
Bus35	HSB-SS6-01B	11	17.56	45.36
Bus36	HSB-SS6-01B	11	17.56	45.36
Bus37	HSB-SS6-01B	11	17.56	45.36
Bus38	HSB-SS6-01B	11	17.56	45.36
Bus39	HSB-SS6-01B	0.4	14.35	11.63
Bus40	HSB-SS2-01A	11	16.96	24.69
Bus41	HSB-SS2-01A	11	16.96	24.69
Bus43	HSB-SS5-01	0.4	15.71	12.08
Bus44	HSB-SS7-01A	11	17.72	45.29
Bus47	HSB-SS7-01A	11	17.39	45.37

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter (lanjutan)

From ID	To ID	kV	THDv (%)	THDi (%)
Bus49	HSB-SS7-01A	11	17.50	45.38
Bus54	HSB-SS7-01B	0.4	14.29	11.59
Bus55	HSB-SS2-01A	11	16.96	24.69
Bus56	HSB-SS7-01A	11	17.50	45.38
Bus61	HSB-SS7-01B	11	17.49	45.38
Bus62	HSB-SS7-01B	11	17.49	45.38
Bus63	HSB-SS7-01B	11	17.49	45.38
Bus64	HSB-SS7-01B	11	17.49	45.38
Bus67	Bus1	0.4	12.89	10.57
Bus68	Bus55	0.4	11.15	24.69
Bus69	Bus40	0.4	11.15	24.69
Bus71	Bus25	0.4	13.26	29.91
Bus72	Bus19	0.4	14.44	32.83
Bus73	Bus6	0.4	14.44	32.83
Bus74	Bus21	0.4	14.44	32.83
Bus75	Bus26	0.4	11.15	24.69
Bus79	HSB-SS5-01	11	17.43	23.98
Bus80	HSB-SS5-01	0.4	15.58	12.29
Bus81	HSB-SS4-01	11	17.53	12.23
Bus83	HSB-SS27-01	11	17.47	20.30
Bus87	MCC-CP-006B	0.4	12.30	0
Bus90	HSB-SS6-01A	11	17.56	45.36
Bus91	HSB-SS6-01A	11	17.56	45.36
Bus92	Bus14	0.4	12.30	7.49
Bus97	Bus41	0.4	11.15	24.69
HSB-SS1-01A	MV-CP-004A	11	17.26	20.85
HSB-SS1-01B	HSB-SS2-02B	11	17.26	219.11

Tabel 4.1 Data hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter (lanjutan)

From ID	To ID	kV	THDv (%)	THDi (%)
HSB-SS1-02	HSB-SS2-01B	11	17.26	24.61
HSB-SS2-01A	HSB-SS1-01A	11	16.97	25.16
HSB-SS2-01B	HSB-SS1-02	11	16.97	25.16
HSB-SS2-02A	HSB-SS1-01A	11	17.28	0
HSB-SS2-02B	HSB-SS1-01B	11	17.28	0
HSB-SS3-01	HSB-SS1-02	11	17.38	29.41
HSB-SS4-01	Bus81	11	17.50	17.04
HSB-SS5-01	HSB-SS1-01A	11	17.32	11.82
HSB-SS6-01A	HSB-SS1-01A	11	17.42	41.13
HSB-SS6-01B	Bus35	11	17.42	46.19
HSB-SS7-01A	HSB-SS1-01A	11	17.35	42.62
HSB-SS7-01B	Bus64	11	17.35	46.21
HSB-SS27-01	Bus83	11	17.52	13.47
MCC-1P-007	MCC-CP-006A	0.4	12.15	6.96
MCC-2CP-007 (ENGINE-2)	MCC-CP-006A	0.4	12.15	7.12
MCC-3CP-007 (ENGINE-3)	MCC-CP-006A	0.4	12.15	7.12
MCC-CP-006A	MCC-1P-007	0.4	12.30	6.96
MCC-CP-006B	Bus87	0.4	12.30	0
MCC-CP-006 BUS C	Bus15	0.4	12.30	0
MCC-CP-008	MCC-CP-006A	0.4	12.29	7.05
MV-CP-004A	Bus13	11	17.25	7.12
Cable61~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	12.30	0

Tabel 4.1 Data hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter (lanjutan)

From ID	To ID	kV	THDv (%)	THDi (%)
Cable62~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	12.30	0
Cable63~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	12.30	0
Cable12~	HSB-SS1-01B	11	17.26	0
Cable23~	HSB-SS1-01B	11	17.26	0

Dari data yang terdapat pada Tabel 4.1, terlihat bahwa seluruh bus pada sistem kelistrikan *Pakistan Deep Water Container Port* terpengaruh dampak dari distorsi harmonisa yang timbul pada bus yang terdapat VFD. Seluruh bus yang terkena dampak harmonisa tersebut memiliki nilai THDv dan juga THDi yang melebihi batas ambang normal yang diperbolehkan sesuai dengan standard IEEE Std 519-1992 dimana batas minimal THD untuk sistem kelistrikan dengan level tegangan 69 kV dan ke bawah adalah sebesar 5%.

Apabila dilihat pada bus yang berisikan motor kapasitas besar yang dikontrol oleh VFD seperti pada bus HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B, nilai dari distorsi THDv yang timbul menembus angka 14% untuk level tegangan 0.4 kV dan menembus angka 17% untuk level tegangan 11 kV. Sedangkan untuk THDi sendiri, menembus angka 11% untuk level tegangan 0.4 kV dan menembus angka 20% untuk level tegangan 11 kV. Hal ini tentu saja sudah cukup tinggi pengaruhnya terhadap sistem kelistrikan pada *plant* ini.

Dari hasil simulasi juga dapat dilihat seberapa besar persentase dari harmonisa pada tegangan fundamental di setiap ordenya. Hal tersebut dapat dilihat dari Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.987	0	12.46	5.89	5.09	2.51	4.27	3.30	5.55
HSB-SS6-01B	10.987	0	12.46	5.89	5.09	2.51	4.27	3.30	5.55
HSB-SS7-01A	10.992	0	12.41	5.87	5.07	2.50	4.26	3.28	5.53
HSB-SS7-01B	10.992	0	12.41	5.87	5.07	2.50	4.26	3.28	5.53
MV-CP-004A	10.998	0	12.33	5.83	5.04	2.48	4.23	3.27	5.50

Dari Tabel 4.2 dapat dilihat pula persentase dari distorsi tegangan individual IHD_v (*Individual Harmonic Distortion Voltage*) melebihi ambang batas yang diijinkan sesuai dengan standard IEEE Std 519-1992 yaitu untuk level tegangan 69 kV ke bawah hanya boleh sebesar 3% saja. Sedangkan dari Tabel 4.2, nilai *individual harmonic* paling rendah yaitu 2.48% dan yang tertinggi sebesar 12.46%. Angka tersebut sudah sangat mendekati batas normal yang diperbolehkan. Nilai dari tegangan bus tersebut juga ternyata mengalami penurunan dari nilai yang seharusnya, yaitu sebesar 11 kV.

Nilai dari individual arus juga dapat dilihat pada Tabel 4.3. Nilai individual arus bisa disebut dengan IHD_i (*Individual Harmonic Distortion Current*).

Tabel 4.3 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu

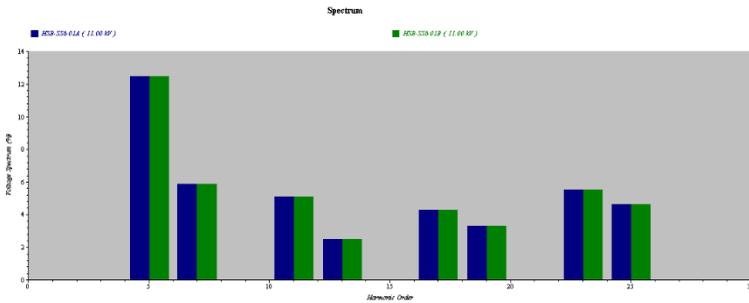
ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	354.44	0	38.00	12.83	6.94	2.87	3.54	2.31	2.69
Cable22	433.32	0	39.62	13.17	6.87	2.72	3.15	2.03	2.38

Dari Tabel 4.3, *individual harmonic distortion current* juga melebihi batas ambang yang diperbolehkan. Nilai minimal dari distorsi arus yang terjadi adalah sebesar 2.03% dan yang terbesar adalah 39.62%.

4.2.1 Distorsi Harmonisa terhadap Tegangan

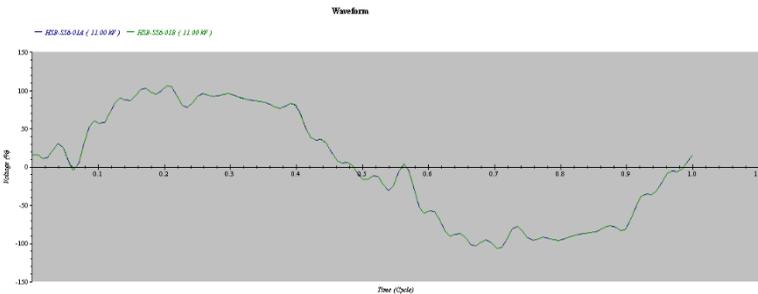
4.2.1.1 Distorsi pada Bus HSB-SS6-01A dan Bus HSB-SS6-01B

Gambar diagram serta sinyal distorsi tegangan yang terjadi pada bus HSB-SS6-01A dan bus HSB-SS6-01B di sistem kelistrikan dapat diperlihatkan oleh Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



Gambar 4.3 Diagram Distorsi Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan Bus HSB-SS6-01B

Dari Gambar 4.3 dapat disimpulkan bahwa distorsi harmonisa tertinggi terjadi pada orde kelima dan disusul dengan orde ketujuh. Hal ini sesuai dengan penjelasan pada Tabel 4.2. Dari data tersebut dapat dipastikan bahwa sinyal sinusoidal yang seharusnya merupakan sinusoidal murni, maka akan terdistorsi menjadi tidak sinusoidal murni lagi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.4.



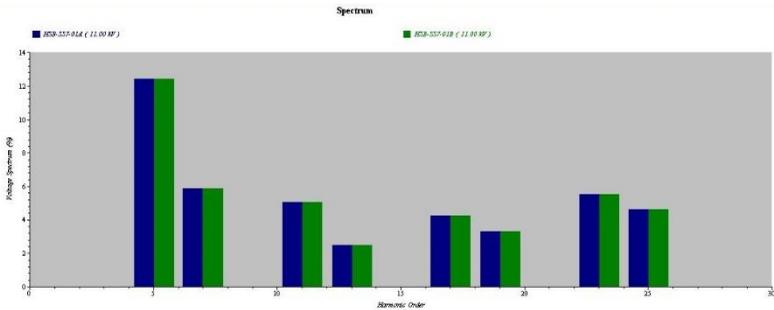
Gambar 4.4 Hasil Distorsi Harmonisa Tegangan terhadap Sinyal Sinusoidal Normal pada Bus HSB-SS6-01A dan Bus HSB-SS6-01B

Dari Gambar 4.4 dapat disimpulkan bahwa harmonisa sangatlah mempengaruhi sinyal sinusoidal yang seharusnya. Sinyal pada bus tersebut terdistorsi dengan frekuensi tinggi dari harmonisa yang timbul dan mengakibatkan terjadinya *ripple* yang cukup besar.

Sinyal seperti pada Gambar 4.4, akan sangat mengganggu bagi peralatan-peralatan yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan sinyal input. Maka dari itu, perlu ditambahkan filter pada bus tersebut untuk meredam dan menghilangkan frekuensi yang mendistorsi sinyal sumber dari sistem kelistrikan pada *plant Pakistan Deep Water Container Port* ini.

4.2.1.2 Distorsi pada Bus HSB-SS7-01A dan Bus HSB-SS7-01B

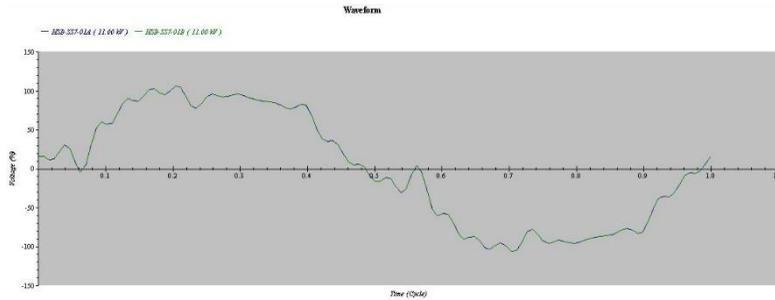
Gambar diagram serta sinyal distorsi tegangan yang terjadi pada bus HSB-SS6-01A dan bus HSB-SS6-01B di sistem kelistrikan dapat diperlihatkan oleh Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Diagram Distorsi Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS7-01A dan Bus HSB-SS7-01B

Pada bus HSB-SS7-01A dan bus HSB-SS7-01B yang disajikan pada Gambar 4.5 juga terlihat bahwa frekuensi harmonisa terbesar terjadi pada orde kelima dan dilanjutkan dengan orde ketujuh. Hal ini sama seperti yang terjadi pada bus HSB-SS6-01A dan bus HSB-SS6-01B dimana memang pada keempat bus tersebutlah terdapat motor yang dikontrol dengan VFD. Diagram pada Gambar 4.5 ini juga sesuai dengan data yang tertera pada Tabel 4.2, dimana dari data tersebut memang orde kelima yang merupakan frekuensi harmonisa tertinggi yang timbul.

Sinyal sinusoidal yang seharusnya sinusoidal murni juga dapat dipastikan akan terdistorsi pada bus ini. Untuk lebih jelasnya, bentuk sinyal sinusoidal yang terdistorsi akan disajikan pada Gambar 4.6.



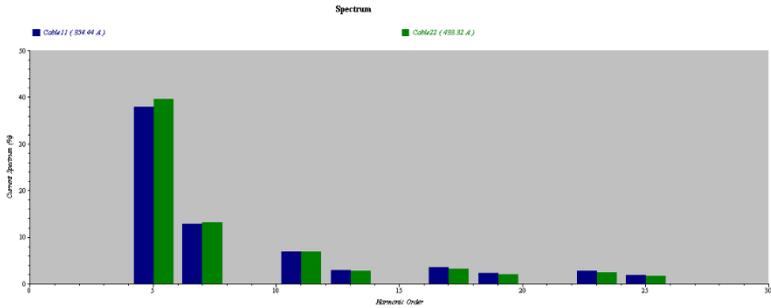
Gambar 4.6 Hasil Distorsi Harmonisa Tegangan terhadap Sinyal Sinusoidal Normal pada Bus HSB-SS7-01A dan Bus HSB-SS7-01B

Dari Gambar 4.6 dapat disimpulkan bahwa distorsi yang terjadi, ternyata sama dengan distorsi yang terjadi pada bus HSB-SS6-01A dan bus HSB-SS6-01B. Hal ini mungkin dikarenakan spesifikasi dari VFD yang digunakan pada bus HSB-SS7-01A dan bus HSB-SS7-01B sama dengan spesifikasi VFD pada bus HSB-SS6-01A dan bus HSB-SS6-01B.

4.2.2 Distorsi Harmonisa terhadap Arus

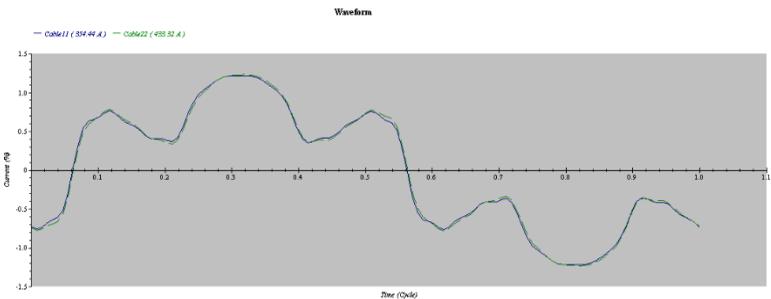
4.2.2.1 Distorsi Arus pada Cable11 dan Cable22

Untuk melihat distorsi harmonisa arus yang terdapat pada bus HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B, dapat dilihat dengan melakukan simulasi harmonisa dan memplot pada kabel dimana kabel tersebut menjadi sumber input dari bus yang bersangkutan. Dalam hal ini, kabel yang terhubung dengan bus HSB-SS6-01A dan bus HSB-SS6-01B adalah Cable11, sedangkan bus HSB-SS7-01A dan bus HSB-SS7-01B adalah Cable22. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



Gambar 4.7 Hasil Distorsi Harmonisa Arus pada Cable11 dan Cable22

Sama seperti halnya distorsi harmonisa tegangan yang terjadi, ternyata distorsi harmonisa arus yang terjadi juga mengalami nilai tertinggi pada orde kelima dan ketujuh. Berdasarkan hasil yang digambarkan oleh Gambar 4.7, dapat disimpulkan bahwa hasil distorsi sesuai pula dengan data yang disajikan pada Tabel 4.3. Untuk melihat pengaruh distorsi harmonisa yang terjadi terhadap sinyal sinusoidal arus dari sumber, dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Hasil Distorsi Harmonisa Arus terhadap Sinyal Sinusoidal Normal pada Cable11 dan Cable22

Dari Gambar 4.8 dapat disimpulkan bahwa sinyal sinusoidal dari arus sumber menjadi sangat buruk akibat distorsi harmonisa yang terjadi. *Ripple* yang terjadi pada sinyal arus sangatlah besar dan sangat mengganggu.

4.3 Perhitungan Spesifikasi Filter Harmonisa

Untuk mengatasi masalah yang terjadi, perlu dilakukan perhitungan untuk menentukan spesifikasi dari filter yang akan digunakan. Sesuai dengan judul dari Tugas Akhir ini, yaitu menggunakan metode *filtering* dengan cara *multistage*, maka akan dihitung spesifikasi filter berdasarkan orde yang diperlukan.

4.3.1 Spesifikasi Filter Orde 5 pada *Network SS6*

Berdasarkan data hasil simulasi yang telah dilakukan, didapat bahwa orde kelima merupakan orde frekuensi harmonisa yang terbesar. Oleh karena itu, perhitungan spesifikasi filter untuk orde 5 adalah sebagai berikut :

$$kVAR = 1650$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.1)$$

$$C = \frac{1650 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 43.42 \mu F \quad (4.2)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi 250)^2 \times 43.42 \times 10^{-6}} = 9.341 \times 10^{-3} H \quad (4.3)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 9.341 \times 10^{-3} = 2.9333 \Omega \quad (4.4)$$

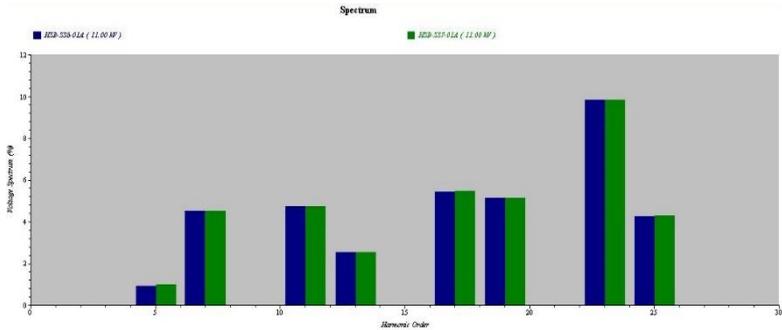
$$Q_{factor} = 30 \quad (4.5)$$

$$R = \frac{2.9333}{30} = 0.09778 \Omega \quad (4.6)$$

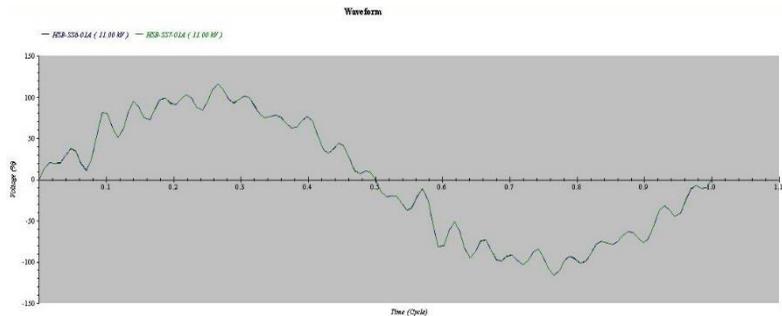
Faktor Q dalam perhitungan ini merupakan tingkat ketajaman dalam proses filtering. Besar kecilnya nilai Q mempengaruhi *bandwith* dari *filtering*. Semakin tinggi nilai Q maka *bandwith filtering* akan

semakin kecil. Karakter Q tinggi dimanfaatkan untuk melewati frekuensi yang diinginkan tanpa mengikutkan frekuensi lain.

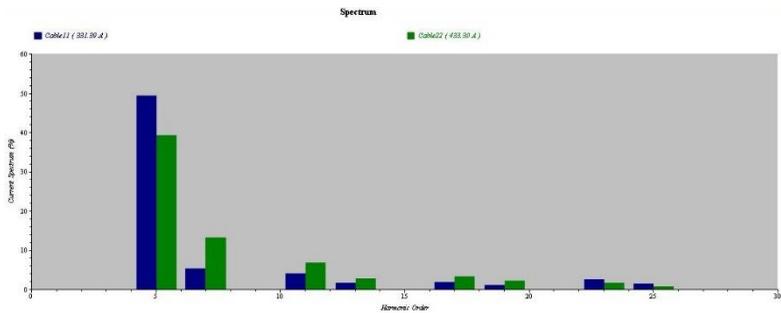
Dari hasil perhitungan diatas, filter berhasil menurunkan frekuensi harmonisa pada orde kelima, tetapi masih belum cukup untuk menurunkan nilai THD_v dan THD_i dari bus tersebut. Hasil dari *filtering* ditunjukkan oleh Gambar 4.9 - Gambar 4.12.



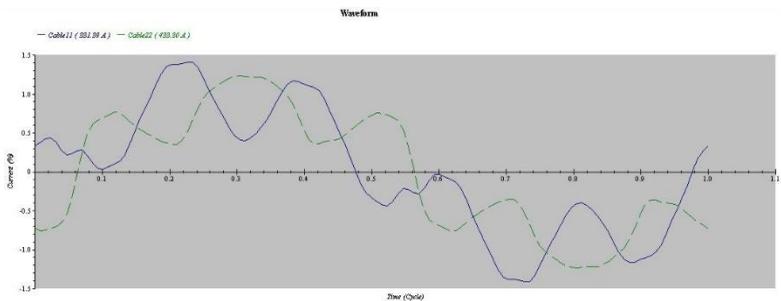
Gambar 4.9 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Pemasangan Filter Orde 5 di SS6



Gambar 4.10 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Pemasangan Filter Orde 5 di SS6



Gambar 4.11 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Pemasangan Filter Orde 5 di SS6



Gambar 4.12 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Pemasangan Filter Orde 5 di SS6

Proses *filtering* sudah bisa dirasakan oleh sistem. Terlihat bahwa gelombang sinusoidal tegangan sudah mulai berkurang tingkat *ripple*-nya, tetapi hal ini masih belum cukup untuk menurunkan THDv sesuai dengan standard yang ditentukan. Begitu juga dengan hasil gelombang dari arus sistem, masih menunjukkan hasil yang buruk. Hasil dari *filtering* ini adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

- Tegangan = 11.11 kV
- THDv = 14.86%
- Arus Cable11 = 370.6 A
- THDi = 50.04%

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

- Tegangan = 11.11 kV

THDv = 14.89%
 Arus Cable22 = 470.5 A
 THDi = 42.34%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* orde 5 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Tabel 4.4 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5 di SS6

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.989	0	0.92	4.51	4.73	2.52	5.45	5.13	9.84
HSB-SS6-01B	10.989	0	0.92	4.51	4.73	2.52	5.45	5.13	9.84
HSB-SS7-01A	10.992	0	0.99	4.52	4.73	2.52	5.45	5.13	9.86
HSB-SS7-01B	10.992	0	0.99	4.52	4.73	2.52	5.45	5.13	9.86
MV-CP-004A	10.999	0	0.96	4.48	4.70	2.51	5.43	5.11	9.85

Tabel 4.5 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5 di SS6

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	331.39	0	49.44	5.29	4.00	1.66	1.83	1.13	2.51
Cable22	433.3	0	39.34	13.13	6.85	2.72	3.23	2.15	1.68

Dari data diatas dapat disimpulkan bahwa filter orde 5 bekerja dengan baik karena bila dilihat pada Tabel 4.4, nilai dari orde 5 menurun drastis bahkan orde 7 dan 11 juga ikut terpengaruh menjadi turun. Apabila melihat orde 23, ternyata nilainya menjadi bertambah. Begitu juga melihat orde 5 pada harmonisa arus, nilai menjadi naik. Oleh karena itu, akan ditambahkan lagi filter harmonisa orde 7 karena nilai IHDv masih diatas 3%.

4.3.2 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 7 pada *Network SS6*

Proses penentuan spesifikasi dari filter dilanjutkan dengan menentukan spesifikasi filter untuk orde ketujuh. Perhitungan spesifikasi filternya adalah sebagai berikut :

$$kVAR = 150$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.7)$$

$$C = \frac{150 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 3.947 \mu F \quad (4.8)$$

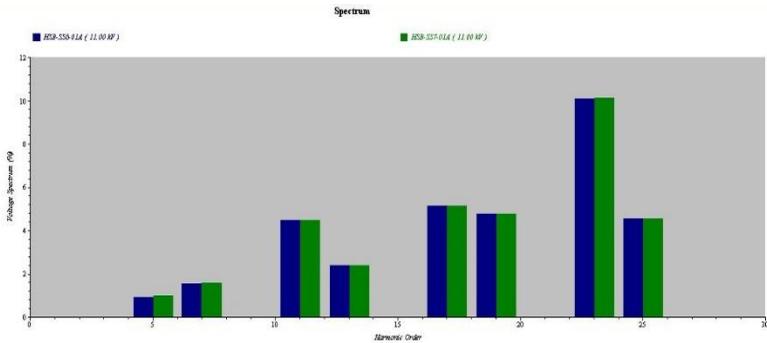
$$L = \frac{1}{(2\pi 350)^2 \times 3.947 \times 10^{-6}} = 52.4286 \times 10^{-3} H \quad (4.9)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 52.4286 \times 10^{-3} = 16.4626 \Omega \quad (4.10)$$

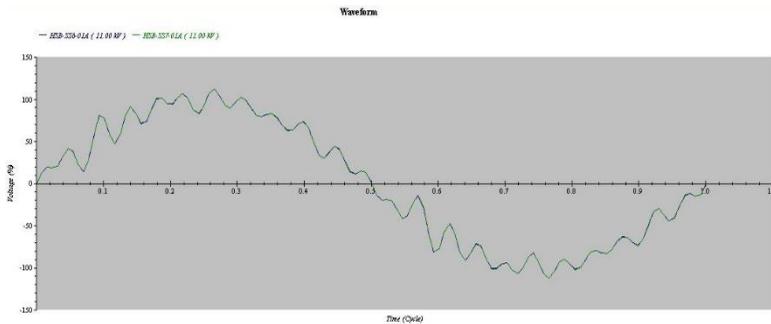
$$Q_{factor} = 30 \quad (4.11)$$

$$R = \frac{16.4626}{30} = 0.5487 \Omega \quad (4.12)$$

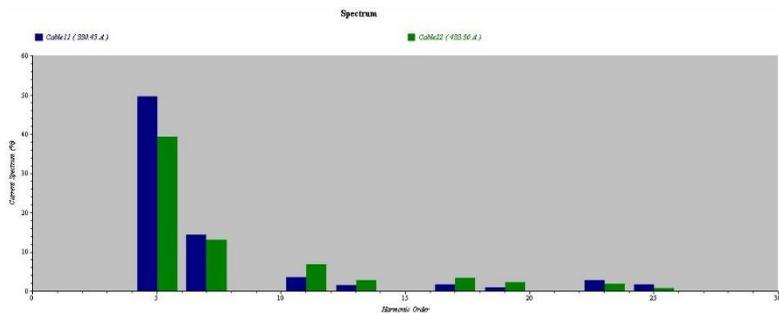
Dari hasil perhitungan diatas, proses *filtering* juga berhasil meredam frekuensi harmonisa ketujuh. Tetapi hasil belum sesuai dengan apa yang diharapkan. Hasil *filtering* akan ditunjukkan oleh Gambar 4.13 – Gambar 16.



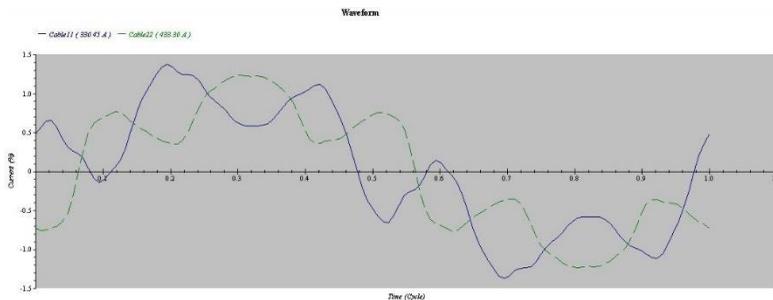
Gambar 4.13 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS6



Gambar 4.14 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS6



Gambar 4.15 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS6



Gambar 4.16 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS6

Apabila melihat dari distorsi harmonisa untuk tegangan, masih belum memperlihatkan adanya perbaikan yang signifikan, begitu juga untuk distorsi arus masih mengalami distorsi yang cukup besar. Hasil dari *filtering* adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

Tegangan = 11.1 kV
 THDv = 14.19%
 Arus Cable11 = 372.3 A
 THDi = 51.91%

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

Tegangan = 11.1 kV
 THDv = 14.23%
 Arus Cable22 = 470.5 A
 THDi = 42.30%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* orde 5 dan penambahan filter orde 7 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7.

Tabel 4.6 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS6

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.990	0	0.92	1.55	4.49	2.40	5.14	4.78	10.1

Tabel 4.6 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS6 (lanjutan)

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01B	10.990	0	0.92	1.55	4.49	2.40	5.14	4.78	10.1
HSB-SS7-01A	10.992	0	0.99	1.58	4.49	2.40	5.15	4.79	10.1
HSB-SS7-01B	10.992	0	0.99	1.58	4.49	2.40	5.15	4.79	10.1
MV-CP-004A	10.999	0	0.96	1.56	4.46	2.39	5.13	4.78	10.1

Tabel 4.7 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS6

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	330.45	0	49.60	14.40	3.41	1.44	1.56	0.98	2.78
Cable22	433.3	0	39.34	12.97	6.84	2.71	3.21	2.13	1.85

Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa filter berhasil meredam harmonisa orde 7 dan memberikan pengaruh juga untuk orde 11-19, akan tetapi masih sama seperti sebelumnya, orde 23 justru naik kembali dan apabila melihat orde 5 dan 7 pada harmonisa arus justru bertambah pula. Untuk itu akan dilakukan penambahan filter kembali, yaitu filter orde 11.

4.3.3 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 11 pada *Network* SS6

$$kVAR = 63$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 x V_{LL}^2} \quad (4.13)$$

$$C = \frac{63 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 1.658 \mu F \quad (4.14)$$

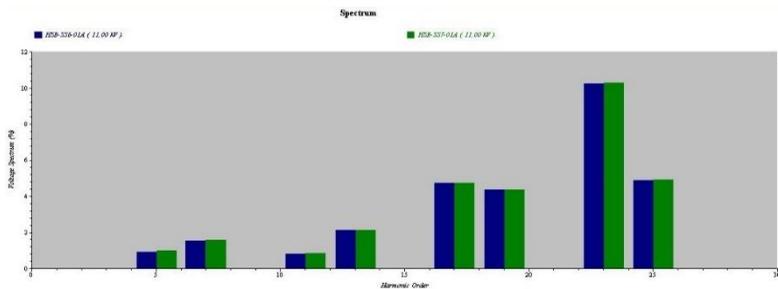
$$L = \frac{1}{(2\pi 50)^2 \times 1.658 \times 10^{-6}} = 50.55 \times 10^{-3} H \quad (4.15)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 50.55 \times 10^{-3} = 15.873 \Omega \quad (4.16)$$

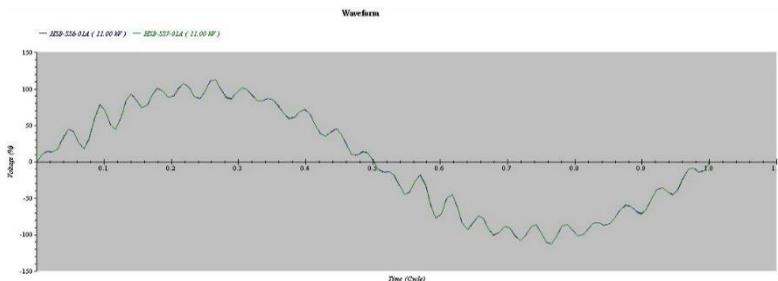
$$Q_{factor} = 30 \quad (4.17)$$

$$R = \frac{15.873}{30} = 0.5291 \Omega \quad (4.18)$$

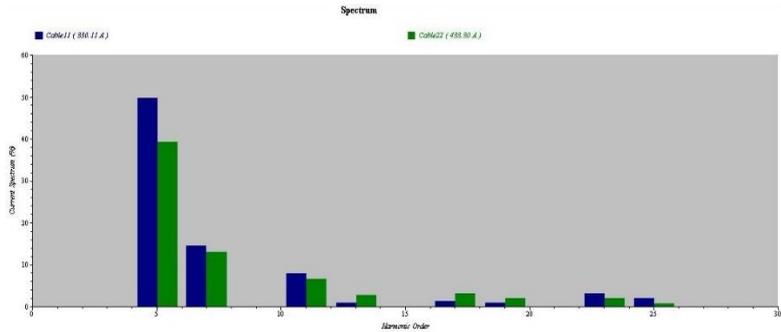
Dari hasil perhitungan diatas, proses *filtering* juga berhasil meredam frekuensi harmonisa kesebelas. Tetapi hasil masih belum sesuai dengan apa yang diharapkan. Hasil *filtering* akan ditunjukkan oleh Gambar 4.17 – Gambar 4.20.



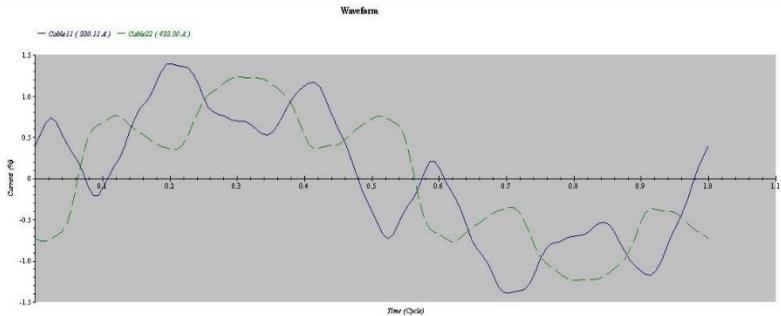
Gambar 4.17 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS6



Gambar 4.18 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS6



Gambar 4.19 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS6



Gambar 4.20 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS6

Dari perhitungan 4.13 - 4.18 dan dari gambar yang diperlihatkan, penurunan THD_v sudah mulai bisa dirasakan, tetapi penurunan tersebut juga masih tidak terlalu besar. Apabila melihat THD_i juga masih mengalami hal yang sama. Hasil dari *filtering* adalah sebagai berikut :

- **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**
 - Tegangan = 11.09 kV
 - THD_v = 13.37%
 - Arus Cable11 = 372.8 A
 - THD_i = 52.46%
- **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**
 - Tegangan = 11.09 kV
 - THD_v = 13.42%

Arus Cable22 = 470.4 A
 THDi = 42.26%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* orde 5, 7, dan penambahan orde 11 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Tabel 4.9.

Tabel 4.8 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS6

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.990	0	0.92	1.56	0.82	2.13	4.74	4.38	10.2
HSB-SS6-01B	10.990	0	0.92	1.56	0.82	2.13	4.74	4.38	10.2
HSB-SS7-01A	10.992	0	0.99	1.58	0.83	2.14	4.75	4.39	10.2
HSB-SS7-01B	10.992	0	0.99	1.58	0.83	2.14	4.75	4.39	10.2
MV-CP-004A	10.999	0	0.96	1.56	0.82	2.12	4.73	4.73	10.2

Tabel 4.9 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS6

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	330.11	0	49.65	14.46	7.84	0.97	1.24	0.84	3.08
Cable22	433.3	0	39.34	12.97	6.59	2.70	3.18	2.11	2.05

Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa filter sudah bekerja, tetapi masih sama seperti sebelumnya, apabila melihat nilai harmonisa arus pada orde yang sudah dipasang filternya ternyata meningkat. Hal ini mungkin disebabkan oleh bertambahnya nilai beban pada bus tersebut, sehingga arus yang mengalir juga bertambah. Oleh karena itu, saat ini akan terfokus pada penurunan THDv terlebih dahulu, maka akan ditambah kembali filter orde 13.

4.3.4 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 13 pada *Network SS6*

$$kVAR = 63$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 x V_{LL}^2} \quad (4.19)$$

$$C = \frac{63 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 1.658 \mu F \quad (4.20)$$

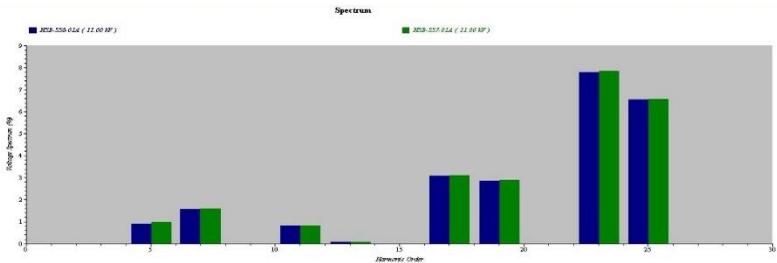
$$L = \frac{1}{(2\pi 850)^2 \times 1.658 \times 10^{-6}} = 50.55 \times 10^{-3} H \quad (4.21)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 50.55 \times 10^{-3} = 15.873 \Omega \quad (4.22)$$

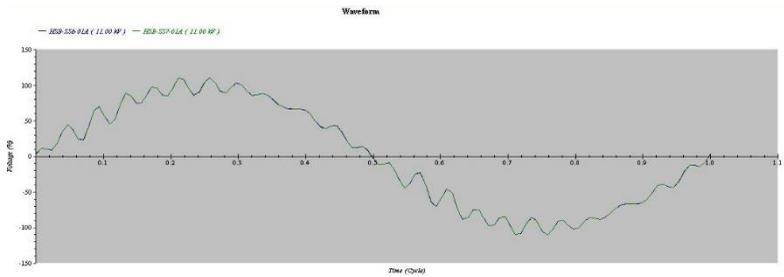
$$Q_{factor} = 30 \quad (4.23)$$

$$R = \frac{15.873}{30} = 0.5291 \Omega \quad (4.24)$$

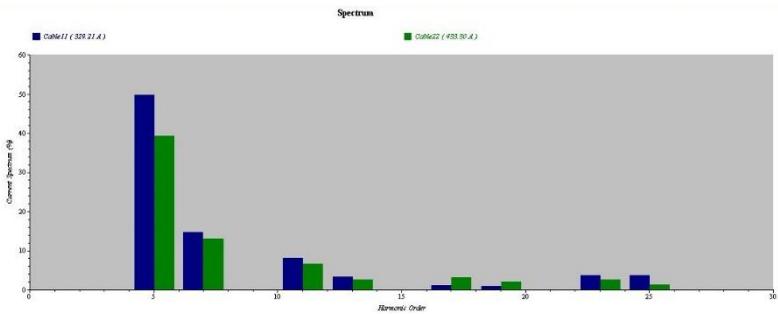
Dari perhitungan untuk spesifikasi filter orde 13, THDv ternyata mengalami penurunan, tetapi apabila melihat THDi masih mengalami nilai yang stagnan. Hasil *filtering* akan ditunjukkan oleh Gambar 4.21 – Gambar 4.24.



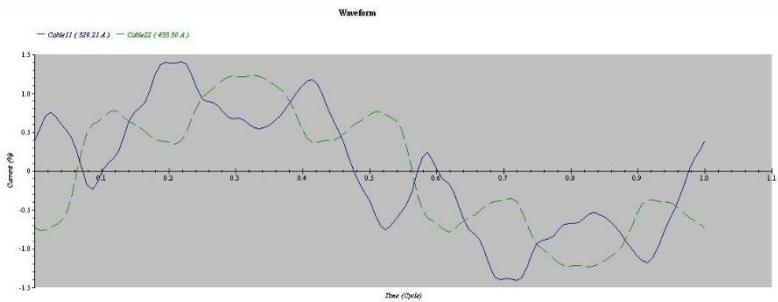
Gambar 4.21 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS6



Gambar 4.22 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS6



Gambar 4.23 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS6



Gambar 4.24 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS6

Dari gambar tersebut kita bisa melihat bahwa distorsi yang dirasakan oleh sistem masih cukup besar. Hal ini bisa terlihat dari Gambar 4.20 dan Gambar 4.22 dimana gelombang sinusoidal masih belum menunjukkan sinusoidal murni. Untuk jelasnya, hasil dari *filtering* adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

Tegangan = 11.06 kV
 THDv = 11.20%
 Arus Cable11 = 372.4 A
 THDi = 52.89%

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

Tegangan = 11.06 kV
 THDv = 11.28%
 Arus Cable22 = 470.4 A
 THDi = 42.27%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* orde 5, 7, 11 dan penambahan orde 13 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.10 dan Tabel 4.11.

Tabel 4.10 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS6

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.990	0	0.92	1.57	0.83	0.07	3.09	2.86	7.79
HSB-SS6-01B	10.990	0	0.92	1.57	0.83	0.07	3.09	2.86	7.79
HSB-SS7-01A	10.992	0	0.99	1.59	0.84	0.08	3.12	2.88	7.84
HSB-SS7-01B	10.992	0	0.99	1.59	0.84	0.08	3.12	2.88	7.84
MV-CP-004A	10.999	0	0.96	1.57	0.83	0.08	3.10	2.87	7.82

Tabel 4.11 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS6

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	329.21	0	49.80	14.62	8.01	3.27	1.04	0.94	3.62
Cable22	433.3	0	39.34	12.97	6.59	2.56	3.06	2.00	2.48

4.3.5 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 17 pada *Network* SS6

$$kVAR = 84$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.19)$$

$$C = \frac{84 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 2.21088 \mu F \quad (4.20)$$

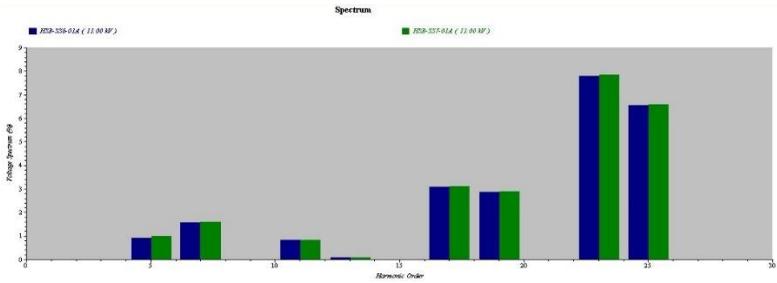
$$L = \frac{1}{(2\pi 50)^2 \times 2.21088 \times 10^{-6}} = 15.873 \times 10^{-3} H \quad (4.21)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 15.873 \times 10^{-3} = 4.98435 \Omega \quad (4.22)$$

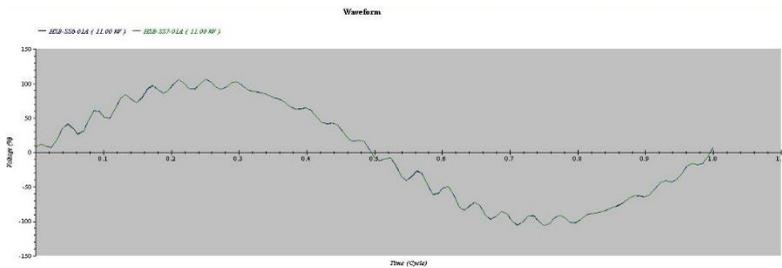
$$Q_{factor} = 50 \quad (4.23)$$

$$R = \frac{4.98435}{50} = 0.09969 \Omega \quad (4.24)$$

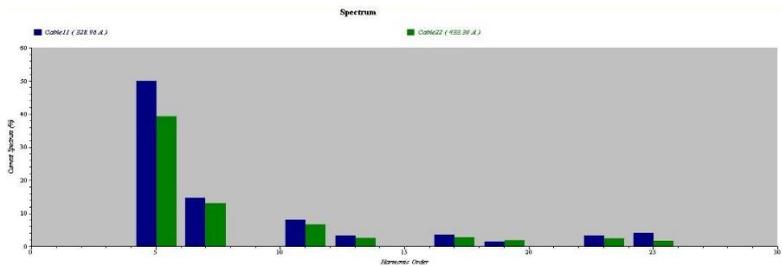
Berdasarkan perhitungan 4.19 – 4.24 dan setelah dilakukan simulasi, harmonisa pada orde 17 sudah berhasil diredam. Untuk melihat hasil dari simulasi, dapat ditunjukkan oleh Gambar 4.25 – Gambar 4.28.



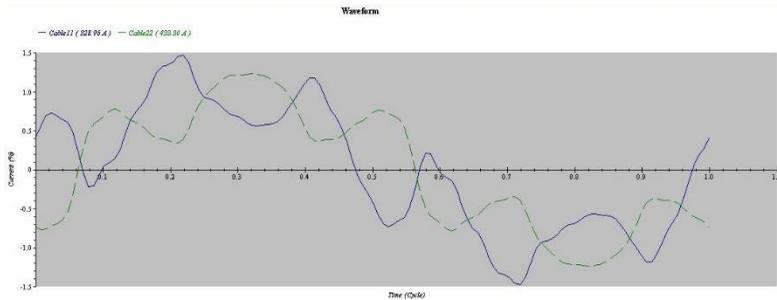
Gambar 4.25 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS6



Gambar 4.26 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS6



Gambar 4.27 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS6



Gambar 4.28 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS6

Apabila melihat Gambar 4.26, ternyata gelombang sinusoidal tegangan sudah mulai menunjukkan perbaikan tetapi masih ada *ripple* yang cukup besar saat gelombang menuju titik nol. Hasil dari *filtering* adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

- Tegangan = 11.03 kV
- THDv = 8.23%
- Arus Cable11 = 372.4 A
- THDi = 53.08%

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

- Tegangan = 11.03 kV
- THDv = 8.32%
- Arus Cable22 = 470.4 A
- THDi = 42.26%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* orde 5, 7, 11, 13 dan penambahan orde 17 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.12 dan Tabel 4.13.

Tabel 4.12 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS6

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.990	0	0.92	1.57	0.83	0.07	0.10	1.73	5.16

Tabel 4.12 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS6 (lanjutan)

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01B	10.990	0	0.92	1.57	0.83	0.07	0.10	1.73	5.16
HSB-SS7-01A	10.992	0	0.99	1.59	0.84	0.08	0.11	1.75	5.21
HSB-SS7-01B	10.992	0	0.99	1.59	0.84	0.08	0.11	1.75	5.21
MV-CP-004A	10.999	0	0.96	1.57	0.83	0.08	0.10	1.74	5.19

Tabel 4.13 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS6

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	328.96	0	49.84	14.67	8.04	3.28	3.58	1.42	3.35
Cable22	433.3	0	39.34	12.97	6.59	2.56	2.78	1.89	3.69

4.3.6 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 19 pada *Network* SS6

$$kVAR = 50$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.25)$$

$$C = \frac{50 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 1.316 \mu F \quad (4.26)$$

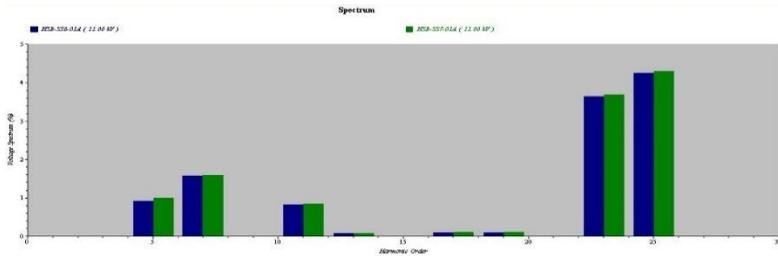
$$L = \frac{1}{(2\pi 550)^2 \times 1.316 \times 10^{-6}} = 21.349 \times 10^{-3} H \quad (4.27)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 21.349 \times 10^{-3} = 6.7036 \Omega \quad (4.28)$$

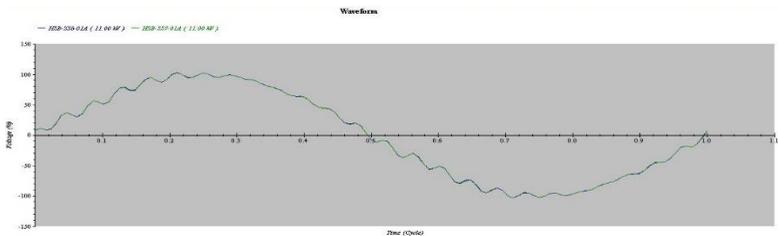
$$Q_{factor} = 30 \quad (4.29)$$

$$R = \frac{6.7036}{30} = 0.22345\Omega \quad (4.30)$$

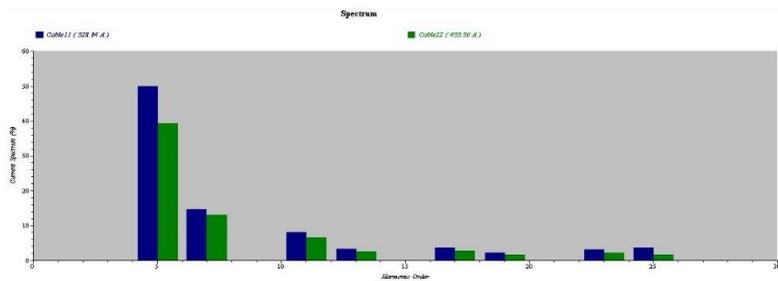
Setelah hasil perhitungan diuji dalam simulasi, harmonisa orde 19 berhasil diredam. Ternyata dari hasil peredaman tersebut, harmonisa orde 23 dan 25 masih tinggi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.29 – Gambar 4.32.



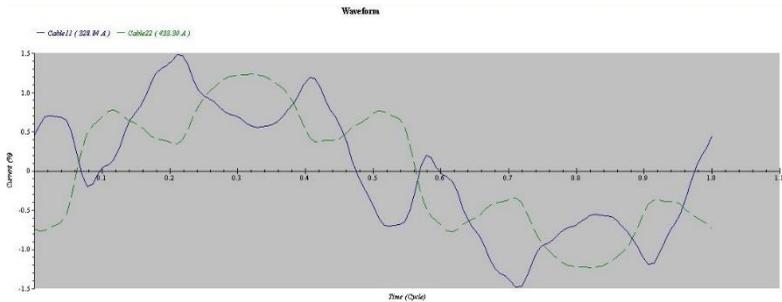
Gambar 4.29 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS6



Gambar 4.30 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS6



Gambar 4.31 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS6



Gambar 4.32 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS6

Berdasarkan Gambar 4.30 dan Gambar 4.32, masih terlihat bahwa pengaruh harmonisa masih sangat besar terhadap gelombang arus sistem. Hasil dari *filtering* adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

Tegangan = 11.01 kV
 THDv = 5.94%
 Arus Cable11 = 372.3 A
 THDi = 53.09%

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

Tegangan = 11.01 kV
 THDv = 6.03%
 Arus Cable22 = 470.4 A
 THDi = 42.24%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* orde 5, 7, 11, 13, 17 dan penambahan orde 19 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.14 dan Tabel 4.15.

Tabel 4.14 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS6

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.990	0	0.92	1.57	0.83	0.07	0.10	0.10	3.64

Tabel 4.14 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS6 (lanjutan)

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01B	10.990	0	0.92	1.57	0.83	0.07	0.10	0.10	3.64
HSB-SS7-01A	10.992	0	0.99	1.59	0.84	0.08	0.11	0.11	3.69
HSB-SS7-01B	10.992	0	0.99	1.59	0.84	0.08	0.11	0.11	3.69
MV-CP-004A	10.999	0	0.96	1.57	0.83	0.08	0.10	0.10	3.67

Tabel 4.15 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS6

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	328.84	0	49.86	14.70	8.06	3.28	3.59	2.20	3.10
Cable22	433.3	0	39.34	12.97	6.58	2.56	2.78	1.72	2.22

4.3.7 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 23 pada *Network* SS6

$$kVAR = 84$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.25)$$

$$C = \frac{84 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 2.2108 \mu F \quad (4.26)$$

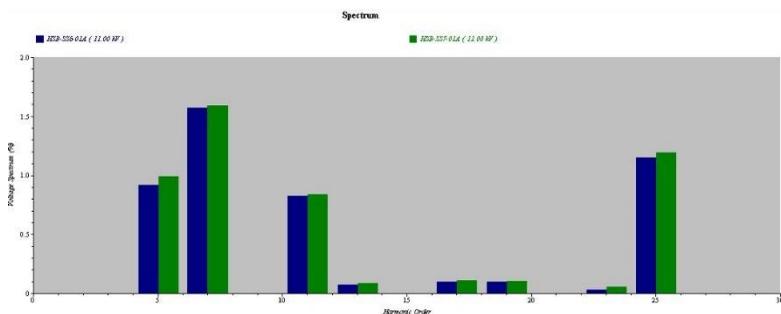
$$L = \frac{1}{(2\pi 550)^2 \times 2.218 \times 10^{-6}} = 8.672 \times 10^{-3} H \quad (4.27)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 8.672 \times 10^{-3} = 2.27302 \Omega \quad (4.28)$$

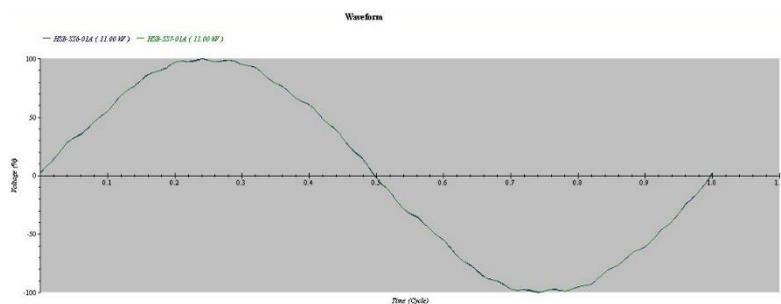
$$Q_{factor} = 50 \quad (4.29)$$

$$R = \frac{2.27302}{50} = 0.05446\Omega \quad (4.30)$$

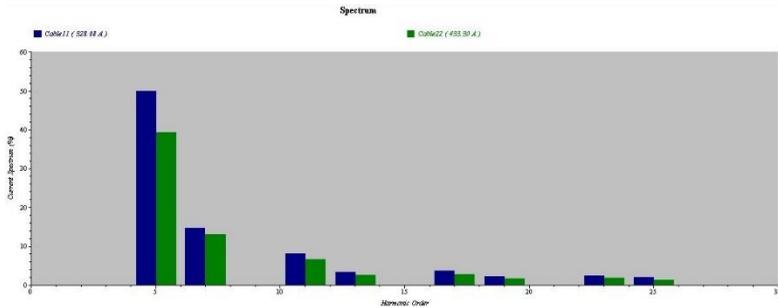
Dari hasil simulasi yang berdasarkan perhitungan 4.25 – 4.30, sudah berhasil meredam frekuensi harmonisa orde ke 23. THDv juga langsung menunjukkan penurunan yang sangat signifikan dan sudah dibawah standard yang diharuskan, tetapi THDi masih saja mengalami distorsi yang cukup besar sehingga masih jauh dari nilai standard yang diharuskan. Untuk lebih jelasnya akan ditunjukkan oleh Gambar 4.33 – Gambar 4.36.



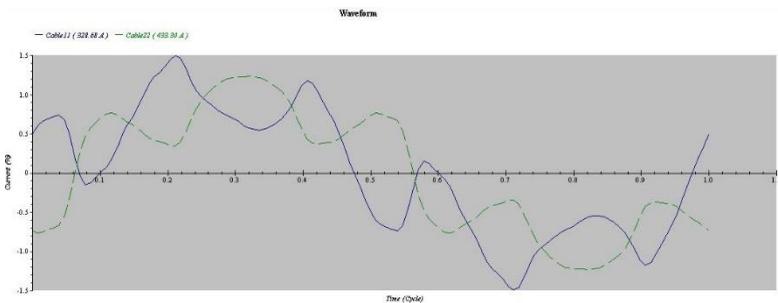
Gambar 4.33 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 23 di SS6



Gambar 4.34 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 23 di SS6



Gambar 4.35 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 23 di SS6



Gambar 4.36 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 23 di SS6

Apabila melihat gelombang tegangan pada Gambar 4.34, gelombang sinusoidal sudah memperlihatkan perbaikan yang sangat besar karena *ripple* sudah hampir tidak terlihat lagi. Berbeda dengan gelombang dari arus yang diperlihatkan oleh Gambar 4.36 dimana masih belum terlihat perbaikan yang berarti. Hasil dari proses *filtering* adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

- Tegangan = 10.99 kV
- THDv = 2.31%
- Arus Cable11 = 372.0 A
- THDi = 53.02%

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

- Tegangan = 11 kV

THDv = 2.38%
 Arus Cable22 = 470.3 A
 THDi = 42.21%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* orde 5, 7, 11, 13, 17, 19 dan penambahan orde 23 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.16 dan Tabel 4.17.

Tabel 4.16 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 23 di SS6

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.990	0	0.92	1.57	0.83	0.07	0.10	0.10	0.03
HSB-SS6-01B	10.990	0	0.92	1.57	0.83	0.07	0.10	0.10	0.03
HSB-SS7-01A	10.992	0	0.99	1.59	0.84	0.08	0.11	0.11	0.05
HSB-SS7-01B	10.992	0	0.99	1.59	0.84	0.08	0.11	0.11	0.05
MV-CP-004A	10.999	0	0.96	1.57	0.83	0.08	0.10	0.10	0.04

Tabel 4.17 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 23 di SS6

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	328.68	0	49.89	14.75	8.08	3.28	3.59	2.21	2.35
Cable22	433.3	0	39.34	12.97	6.58	2.56	2.78	1.72	1.79

Filter yang telah terpasang pada *network* SS6 sebanyak tujuh filter. Ketujuh filter tersebut ternyata berhasil menurunkan THDv sesuai dengan standard yang diinginkan, akan tetapi dilihat dari THDi masih saja belum terlihat penurunan yang berarti. Untuk mengatasi hal tersebut, akan dilakukan pemasangan filter pada *network* SS7 dan akan diuji kembali dengan mensimulasikannya.

4.3.8 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 5 pada *Network SS7*

$kVAR = 2000$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.25)$$

$$C = \frac{2000 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 52.6399 \mu F \quad (4.26)$$

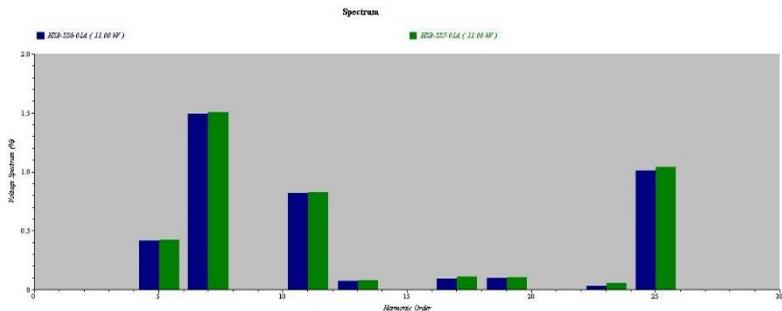
$$L = \frac{1}{(2\pi 550)^2 \times 52.6399 \times 10^{-6}} = 7.707 \times 10^{-3} H \quad (4.27)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 7.707 \times 10^{-3} = 2.42 \Omega \quad (4.28)$$

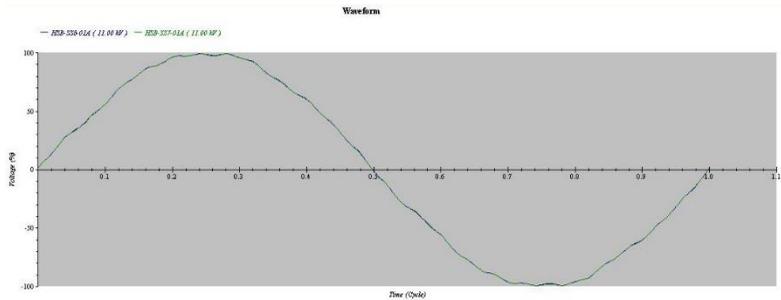
$$Q_{factor} = 30 \quad (4.29)$$

$$R = \frac{2.42}{30} = 0.08067 \Omega \quad (4.30)$$

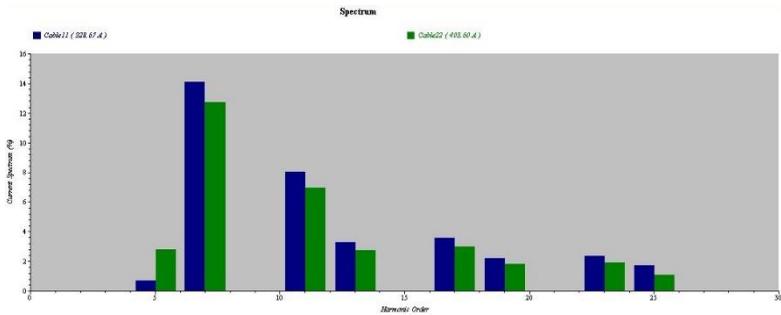
Hasil dari simulasi berhasil menurunkan THDv dan THDi tetapi THDi masih diatas standard. Untuk lebih jelasnya akan diperlihatkan oleh Gambar 4.37 – Gambar 4.40.



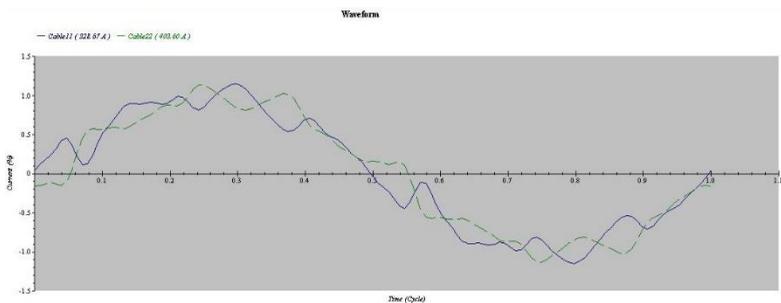
Gambar 4.37 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 5 di SS7



Gambar 4.38 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 5 di SS7



Gambar 4.39 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 5 di SS7



Gambar 4.40 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 5 di SS7

Setelah pemasangan filter orde 5 pada *network* akhirnya memperlihatkan penurunan THDi yang cukup besar. Hal ini dikarenakan sumber harmonisa sebenarnya tidak hanya pada *network* SS6 saja tetapi pada *network* SS7 juga. Oleh karena itu, pemasangan filter pada SS7 akan sangat mempengaruhi THD. Hasil dari *filtering* adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

Tegangan = 10.99 kV
 THD_v = 2.03%
 Arus Cable11 = 333.6 A
 THDi = 17.33%

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

Tegangan = 11 kV
 THD_v = 2.06%
 Arus Cable22 = 408.4 A
 THDi = 15.55%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* penambahan orde 5 pada *network* SS7 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.18 dan Tabel 4.19.

Tabel 4.18 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 5 di SS7

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.990	0	0.42	1.50	0.82	0.07	0.09	0.10	0.03
HSB-SS6-01B	10.990	0	0.42	1.50	0.82	0.07	0.09	0.10	0.03
HSB-SS7-01A	10.994	0	0.42	1.51	0.83	0.08	0.11	0.11	0.05
HSB-SS7-01B	10.994	0	0.42	1.51	0.83	0.08	0.11	0.11	0.05
MV-CP-004A	10.999	0	0.42	1.49	0.82	0.08	0.10	0.10	0.04

Tabel 4.19 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 5 di SS7

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	328.67	0	0.7	14.12	8.01	3.26	3.56	2.19	2.34
Cable22	433.3	0	2.78	12.71	6.93	2.72	2.96	1.83	1.91

Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa THDi mulai ikut terpengaruh turun pada saat filter dengan orde yang sama telah terpasang pada kedua buah *network* (SS6 dan SS7). Hal ini mungkin karena terjadinya pembagian arus penambahan beban akibat penambahan filter pada orde tertentu tersebut, maka akan berpengaruh terhadap penurunan nilai THDi dari sistem di *plant* ini. Apabila dilihat dari IHDI, maka akan ditentukan kembali spesifikasi filter untuk orde 7 yang akan dipasang pada *network* SS7 untuk menurunkan THDi pada sistem ini.

4.3.9 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 7 pada *Network* SS7

$$kVAR = 200$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.25)$$

$$C = \frac{200 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 5.26399 \mu F \quad (4.26)$$

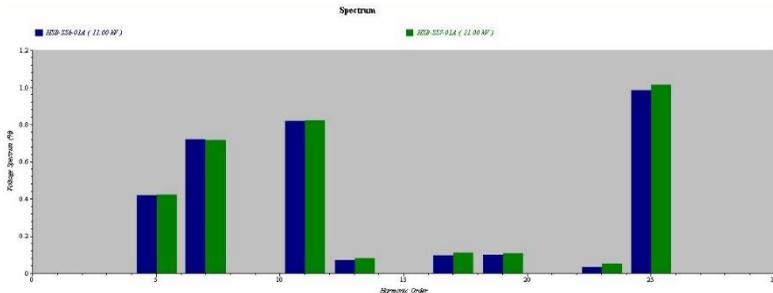
$$L = \frac{1}{(2\pi 550)^2 \times 5.26399 \times 10^{-6}} = 39.3214 \times 10^{-3} H \quad (4.27)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 39.3214 \times 10^{-3} = 12.3469 \Omega \quad (4.28)$$

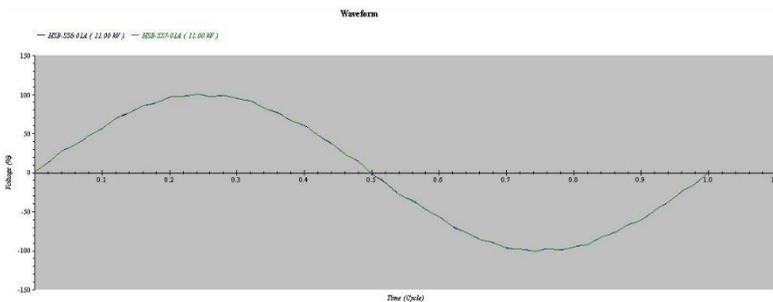
$$Q_{factor} = 30 \quad (4.29)$$

$$R = \frac{12.3469}{30} = 0.41156 \Omega \quad (4.30)$$

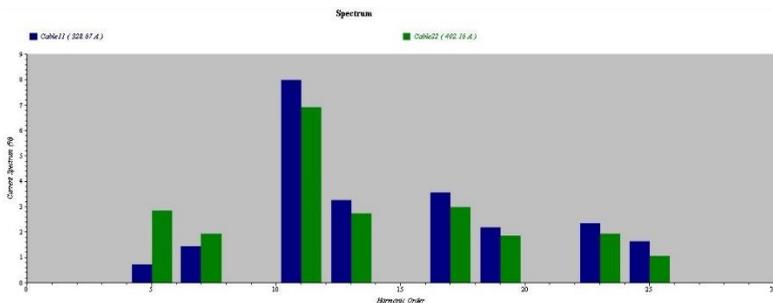
Pemasangan filter orde 7 berhasil meredam harmonisa yang timbul pada orde tersebut. THDv dan THDi juga mengalami penurunan. Hal ini akan ditunjukkan oleh Gambar 4.41 – Gambar 4.44.



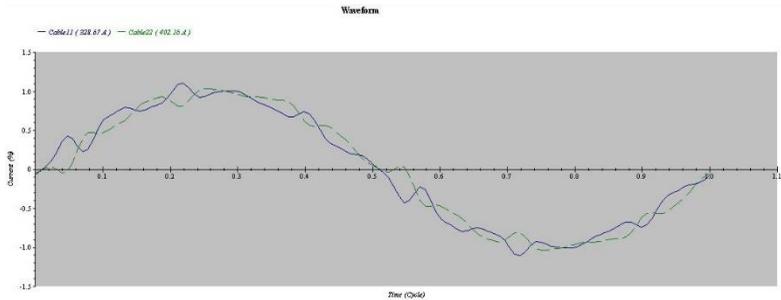
Gambar 4.41 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS7



Gambar 4.42 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS7



Gambar 4.43 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS7



Gambar 4.44 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS7

Dari Gambar 4.42 dan gambar 4.44 dapat disimpulkan bahwa gelombang tegangan dari sistem sudah baik dan gelombang arus dari sistem juga sudah mengalami perbaikan tetapi masih terdapat *ripple* yang cukup mengganggu. Hasil dari *filtering* adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

Tegangan = 10.99 kV
 THDv = 1.53%
 Arus Cable11 = 330.4 A
 THDi = **10.13%**

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

Tegangan = 11 kV
 THDv = 1.56%
 Arus Cable22 = 403.8 A
 THDi = **9.17%**

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* penambahan orde 5 dan 7 pada network SS7 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.20 dan Tabel 4.21.

Tabel 4.20 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS7

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.991	0	0.42	0.72	0.82	0.07	0.09	0.10	0.03

Tabel 4.20 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS7 (lanjutan)

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01B	10.991	0	0.42	0.72	0.82	0.07	0.09	0.10	0.03
HSB-SS7-01A	10.994	0	0.42	0.72	0.83	0.08	0.11	0.10	0.05
HSB-SS7-01B	10.994	0	0.42	0.72	0.83	0.08	0.11	0.10	0.05
MV-CP-004A	10.999	0	0.42	0.71	0.82	0.08	0.10	0.10	0.04

Tabel 4.21 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 7 di SS7

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	328.67	0	0.71	1.42	8.00	3.25	3.56	2.19	2.34
Cable22	433.3	0	2.83	1.92	6.92	2.73	2.97	1.84	1.92

Proses selanjutnya adalah meneruskan menghitung spesifikasi filter *stage* diatasnya yang masih melebihi batas IHD yang diijinkan, yaitu 3%, maka selanjutnya dihitung spesifikasi filter orde 11 untuk SS7.

4.3.10 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 11 pada *Network* SS7

$$kVAR = 84$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.25)$$

$$C = \frac{84 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 2.21088 \mu F \quad (4.26)$$

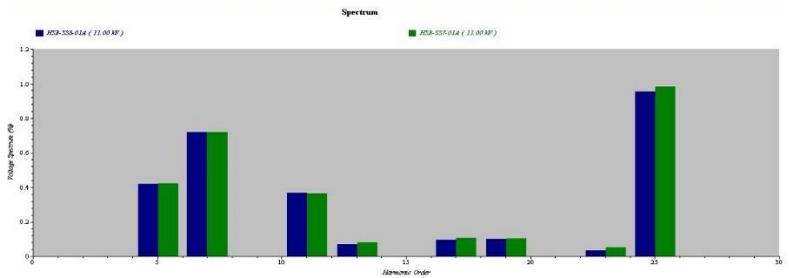
$$L = \frac{1}{(2\pi 550)^2 \times 2.21088 \times 10^{-6}} = 37.913 \times 10^{-3} H \quad (4.27)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 37.913 \times 10^{-3} = 11.9048\Omega \quad (4.28)$$

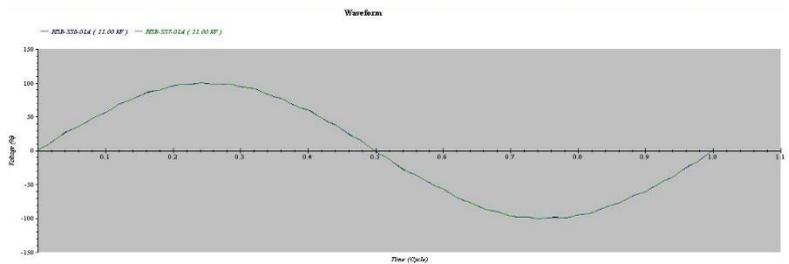
$$Q_{factor} = 30 \quad (4.29)$$

$$R = \frac{11.9048}{30} = 0.39683\Omega \quad (4.30)$$

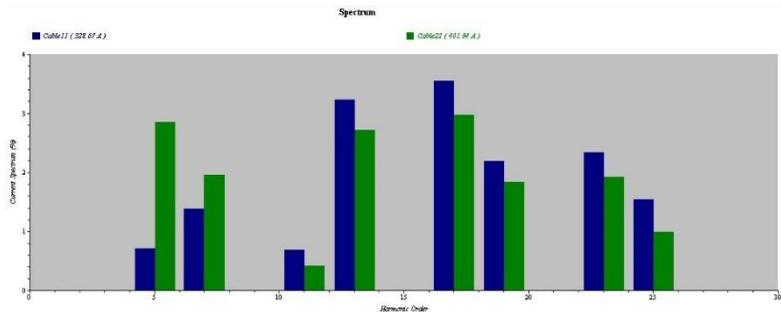
Filter orde 11 diperlukan karena terlihat pada Gambar 4.41 bahwa orde 11 juga menyumbangkan harmonisa yang lebih tinggi dari orde 5 dan 7. Setelah pemasangan filter tersebut, hasil dari *filtering* dapat diperlihatkan oleh Gambar 4.45 – Gambar 4.48.



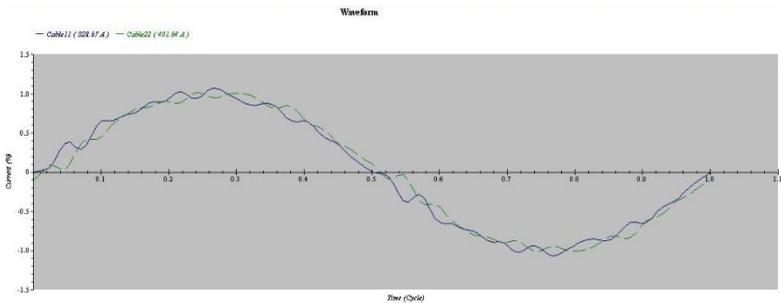
Gambar 4.45 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS7



Gambar 4.46 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS7



Gambar 4.47 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS7



Gambar 4.48 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS7

Hasil dari *filtering* orde 11 ternyata juga berhasil menurunkan THDv dan THDi pada sistem. Terlihat bahwa THDi dari sistem menurun mendekati batas yang diharuskan. Hasil dari *filtering* tersebut adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

Tegangan = 10.99 kV

THDv = 1.33%

Arus Cable11 = 329.3 A

THDi = 6.21%

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

Tegangan = 11 kV

$$\begin{aligned} \text{THD}_v &= 1.35\% \\ \text{Arus Cable22} &= 402.4 \text{ A} \\ \text{THD}_i &= 6.03\% \end{aligned}$$

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* penambahan orde 5, 7 dan 11 pada network SS7 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.22 dan Tabel 4.23.

Tabel 4.22 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS7

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.991	0	0.42	0.72	0.37	0.07	0.09	0.10	0.03
HSB-SS6-01B	10.991	0	0.42	0.72	0.37	0.07	0.09	0.10	0.03
HSB-SS7-01A	10.994	0	0.42	0.72	0.36	0.08	0.11	0.10	0.05
HSB-SS7-01B	10.994	0	0.42	0.72	0.36	0.08	0.11	0.10	0.05
MV-CP-004A	10.999	0	0.42	0.71	0.36	0.08	0.10	0.10	0.04

Tabel 4.23 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 11 di SS7

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	328.67	0	0.71	1.38	0.68	3.23	3.55	2.19	2.33
Cable22	433.3	0	2.85	1.96	0.42	2.72	2.97	1.83	1.92

4.3.11 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 13 pada *Network* SS7

$$kVAR = 150$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.31)$$

$$C = \frac{150 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 3.947 \mu F \quad (4.32)$$

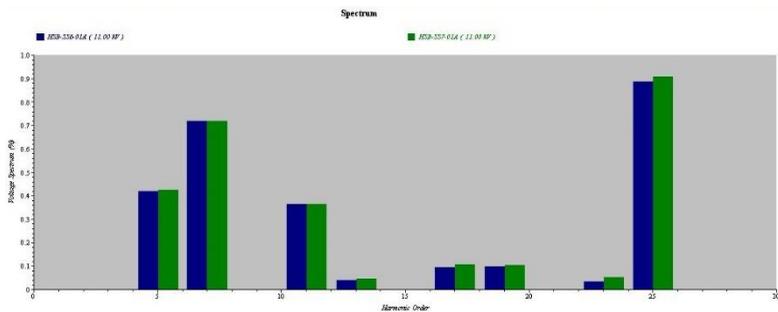
$$L = \frac{1}{(2\pi 50)^2 \times 3.947 \times 10^{-6}} = 15.2011 \times 10^{-3} H \quad (4.33)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 15.2011 \times 10^{-3} = 4.77318 \Omega \quad (4.34)$$

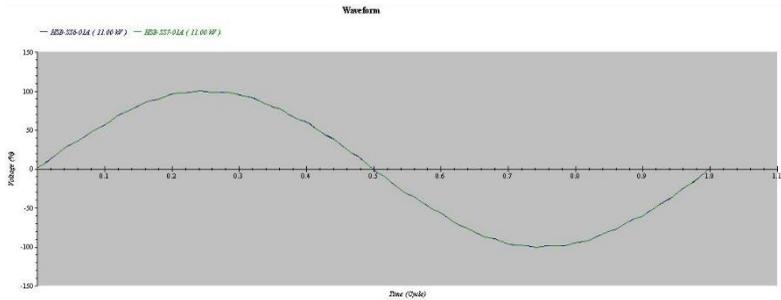
$$Q_{factor} = 30 \quad (4.35)$$

$$R = \frac{4.77318}{30} = 0.15911 \Omega \quad (4.36)$$

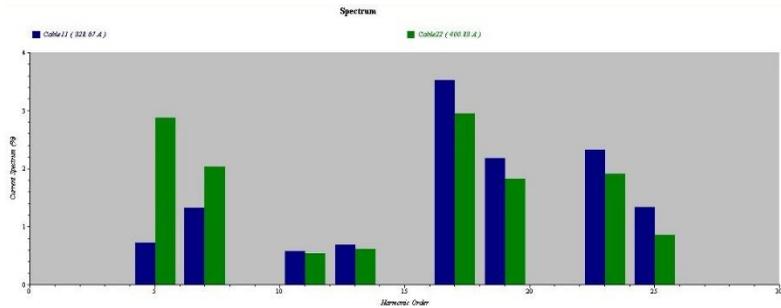
Pemasangan filter orde 13 dimaksudkan untuk mendukung filter orde 13 yang sudah terpasang sebelumnya pada *network* SS6. Hal ini dilakukan untuk mencoba menurunkan THDi pada sistem dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.49 – Gambar 4.52.



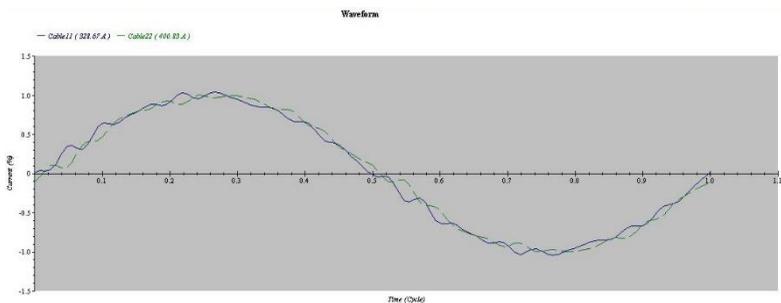
Gambar 4.49 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS7



Gambar 4.50 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS7



Gambar 4.51 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS7



Gambar 4.52 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS7

Setelah pemasangan filter orde 13 ini, bentuk gelombang arus sedikit membaik, tetapi tidak benar-benar menghilangkan *ripple* yang timbul. Apabila dilihat dari sisi THD, THDv dan THDi memang semakin membaik. Hasil *filtering* tersebut adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

Tegangan = 10.99 kV
 THDv = 1.28%
 Arus Cable11 = 329.1 A
 THDi = 5.24%

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

Tegangan = 11 kV
 THDv = 1.30%
 Arus Cable22 = 401.4 A
 THDi = 5.43%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* penambahan orde 5, 7, 11 dan 13 pada network SS7 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.24 dan Tabel 4.25.

Tabel 4.24 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS7

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.991	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.09	0.10	0.03
HSB-SS6-01B	10.991	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.09	0.10	0.03
HSB-SS7-01A	10.994	0	0.42	0.72	0.36	0.04	0.11	0.10	0.05
HSB-SS7-01B	10.994	0	0.42	0.72	0.36	0.04	0.11	0.10	0.05
MV-CP-004A	10.999	0	0.42	0.71	0.36	0.04	0.10	0.10	0.04

Tabel 4.25 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 13 di SS7

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	328.67	0	0.72	1.32	0.58	0.68	3.53	2.17	2.32
Cable22	433.3	0	2.87	2.03	0.54	0.61	2.95	1.83	1.91

4.3.12 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 17 pada *Network SS7*

$$kVAR = 84$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 x V_{LL}^2} \quad (4.37)$$

$$C = \frac{84 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 2.21088 \mu F \quad (4.38)$$

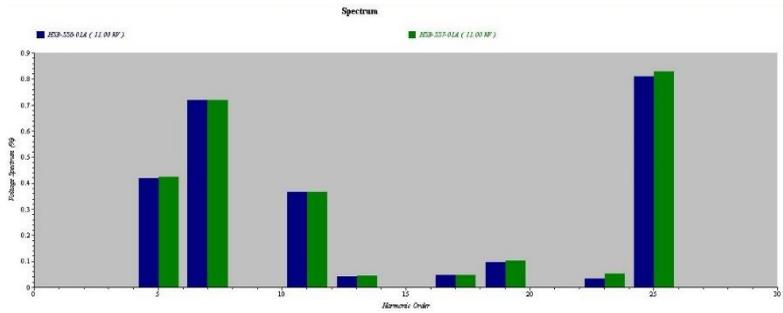
$$L = \frac{1}{(2\pi 550)^2 \times 2.21088 \times 10^{-6}} = 15.8737 \times 10^{-3} H \quad (4.39)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 15.8737 \times 10^{-3} = 4.984 \Omega \quad (4.40)$$

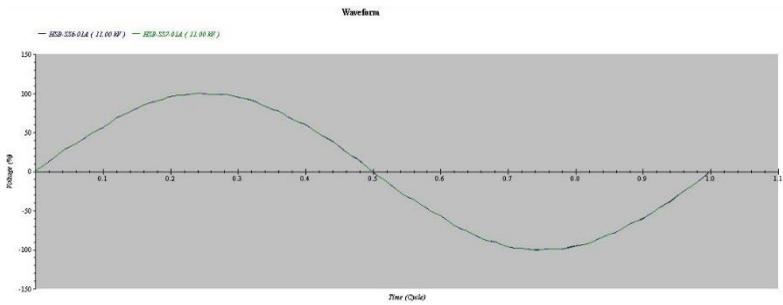
$$Q_{factor} = 50 \quad (4.41)$$

$$R = \frac{4.984}{50} = 0.09969 \Omega \quad (4.42)$$

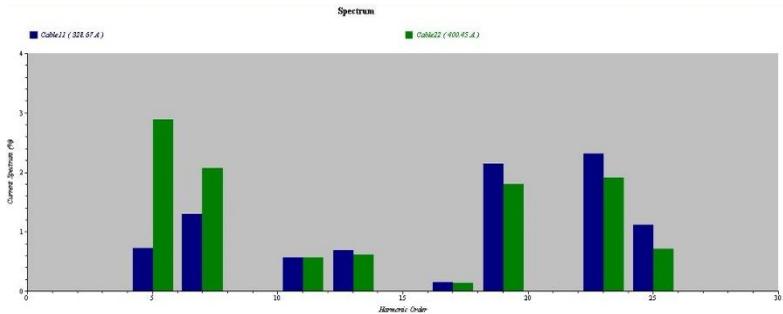
Pemasangan filter orde 17 dimaksudkan untuk meredam harmonisa yang timbul pada Cable22 dimana itu merupakan yang berpengaruh terhadap THDi. Hasil dari simulasi dapat ditunjukkan oleh Gambar 4.53 – Gambar 4.56.



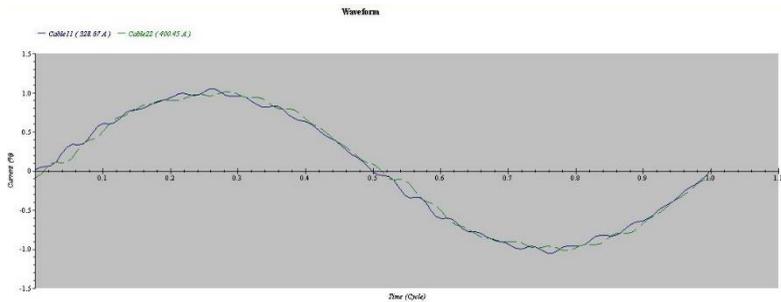
Gambar 4.53 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS7



Gambar 4.54 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS7



Gambar 4.55 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS7



Gambar 4.56 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS7

Dari simulasi tersebut dapat dipastikan bahwa pengaruh dari filter orde 17 ini cukup berpengaruh terhadap sistem karena bukan hanya THD_v yang sudah sesuai standard, tetapi THD_i juga mulai turun dibawah batas standard yang ditentukan. Hasil *filtering* tersebut adalah sebagai berikut :

➤ **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**

Tegangan = 10.99 kV
 THD_v = 1.22%
 Arus Cable11 = 328.9 A
 THD_i = 3.76%

➤ **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**

Tegangan = 11 kV
 THD_v = 1.24%
 Arus Cable22 = 400.9 A
 THD_i = 4.54%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* penambahan orde 5, 7, 11, 13 dan 17 pada network SS7 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.26 dan Tabel 4.27.

Tabel 4.26 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS7

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.991	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.10	0.03

Tabel 4.26 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS7 (lanjutan)

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01B	10.991	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.10	0.03
HSB-SS7-01A	10.994	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.10	0.05
HSB-SS7-01B	10.994	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.10	0.05
MV-CP-004A	10.999	0	0.42	0.71	0.36	0.04	0.05	0.10	0.04

Tabel 4.27 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 17 di SS7

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	328.67	0	0.72	1.30	0.56	0.69	0.15	2.14	2.31
Cable22	400.45	0	2.88	2.06	0.57	0.61	0.14	1.80	1.90

Pada dasarnya, nilai dari THD_v dan THD_i sudah mencukupi karena sudah dibawah standard 5%, tetapi apabila melihat THD_i pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B, nilai dari THD_i masih sangat mendekati ambang batas yang diperbolehkan. Oleh karena itu, akan ditambahkan dua buah filter lagi pada *network* SS7 sehingga bisa mereduksi lebih banyak lagi nilai harmonisa yang timbul pada sistem dan sistem akan benar-benar aman dari gangguan frekuensi harmonisa.

4.3.13 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 19 pada *Network* SS7

$$kVAR = 50$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.43)$$

$$C = \frac{50 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 1.316 \mu F \quad (4.44)$$

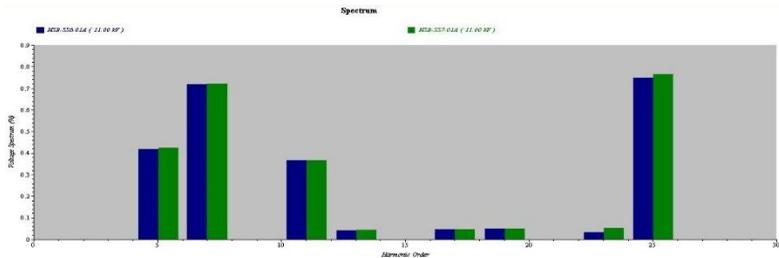
$$L = \frac{1}{(2\pi 50)^2 \times 1.316 \times 10^{-6}} = 21.349 \times 10^{-3} H \quad (4.45)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 21.349 \times 10^{-3} = 6.7036 \Omega \quad (4.46)$$

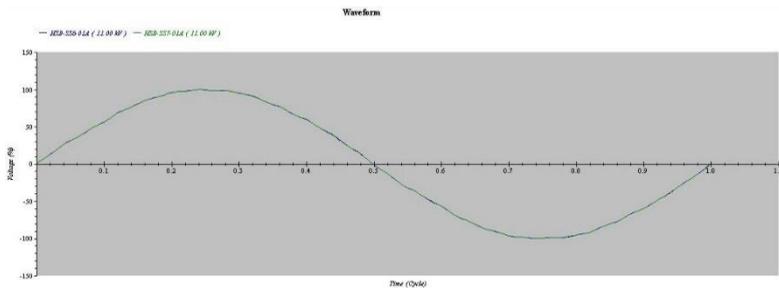
$$Q_{factor} = 30 \quad (4.47)$$

$$R = \frac{6.7036}{30} = 0.22345 \Omega \quad (4.48)$$

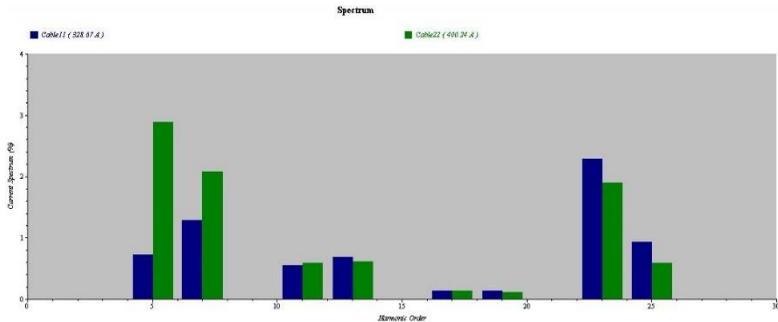
Dengan berdasar orde yang tinggi pada Cable11 dan Cable22, maka yang dipilih adalah filter orde 19. Dari hasil simulasi, pemasangan orde 19 ini berhasil membuat THDi pada sistem turun, terutama pada *network* SS7 dimana nilai THDi-nya masih kritis sebelumnya. Hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.57 – Gambar 4.60.



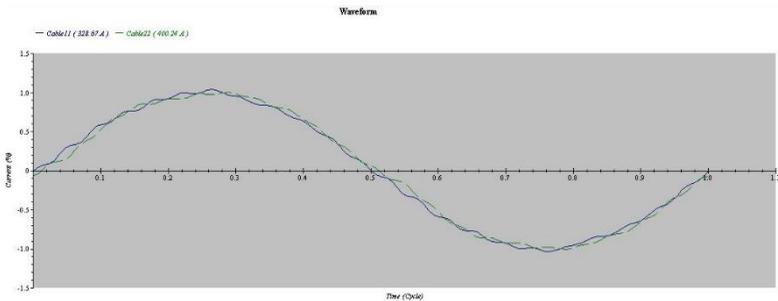
Gambar 4.57 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS7



Gambar 4.58 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS7



Gambar 4.59 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS7



Gambar 4.60 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS7

Dari hasil simulasi, THDi mengalami penurunan tetapi tidak terlalu signifikan, untuk itu nanti akan ditambah sebuah filter lagi. Hasil dari *filtering* ini adalah sebagai berikut :

- **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**
 - Tegangan = 10.99 kV
 - THDv = 1.18%
 - Arus Cable11 = 328.8 A
 - THDi = 3.02%
- **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**
 - Tegangan = 10.99 kV
 - THDv = 1.19%

$$\begin{aligned} \text{Arus Cable22} &= 400.6 \text{ A} \\ \text{THDi} &= 4.17\% \end{aligned}$$

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* penambahan orde 5, 7, 11, 13, 17 dan 19 pada network SS7 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.28 dan Tabel 4.29.

Tabel 4.28 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS7

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.991	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.05	0.03
HSB-SS6-01B	10.991	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.05	0.03
HSB-SS7-01A	10.994	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.05	0.05
HSB-SS7-01B	10.994	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.05	0.05
MV-CP-004A	10.999	0	0.42	0.71	0.36	0.04	0.05	0.05	0.04

Tabel 4.29 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Penambahan Filter Orde 19 di SS7

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	328.67	0	0.73	1.28	0.55	0.69	0.14	0.13	2.29
Cable22	400.24	0	2.89	2.08	0.59	0.61	0.14	0.11	1.89

4.3.14 Spesifikasi Penambahan Filter Orde 23 pada Network SS7

$$kVAR = 84$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.49)$$

$$C = \frac{84 \times 10^3}{(2\pi 50) \times (11)^2} = 2.21088 \mu F \quad (4.50)$$

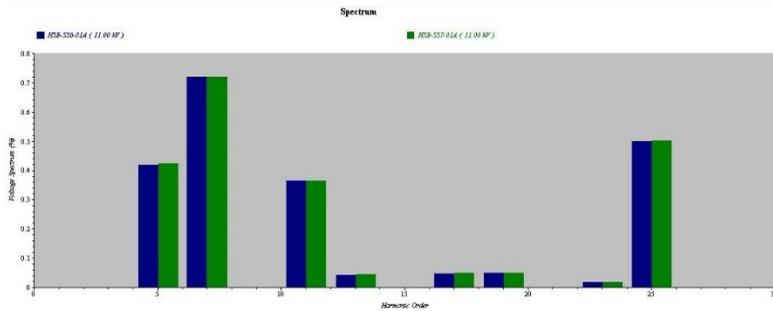
$$L = \frac{1}{(2\pi 550)^2 \times 2.21088 \times 10^{-6}} = 8.672 \times 10^{-3} H \quad (4.51)$$

$$X_L = 2\pi 50 \times 8.672 \times 10^{-3} = 2.72302\Omega \quad (4.52)$$

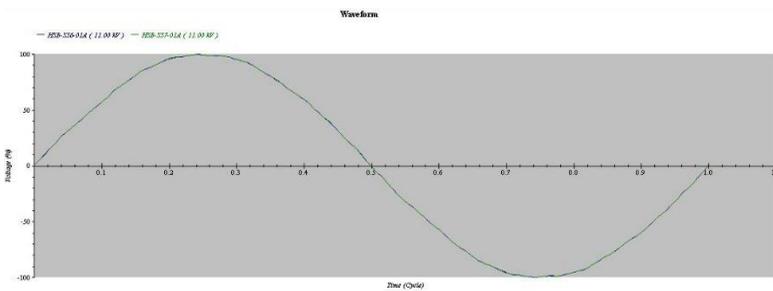
$$Q_{factor} = 50 \quad (4.53)$$

$$R = \frac{2.72302}{50} = 0.05446\Omega \quad (4.54)$$

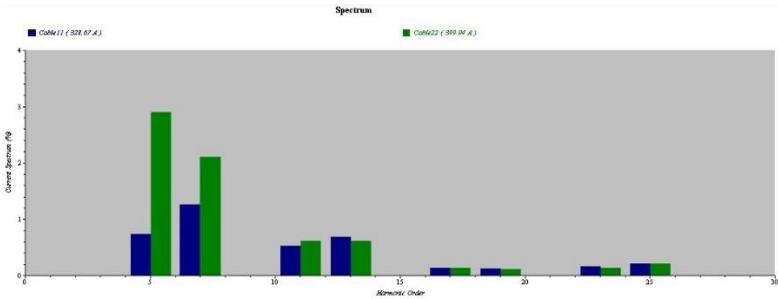
Setelah pemasangan filter orde 23 ini, THDi menjadi benar-benar turun. Gelombang sinusoidal juga sudah terlihat cukup baik. Hasil simulasi akan ditunjukkan oleh Gambar 4.61 – Gambar 4.64.



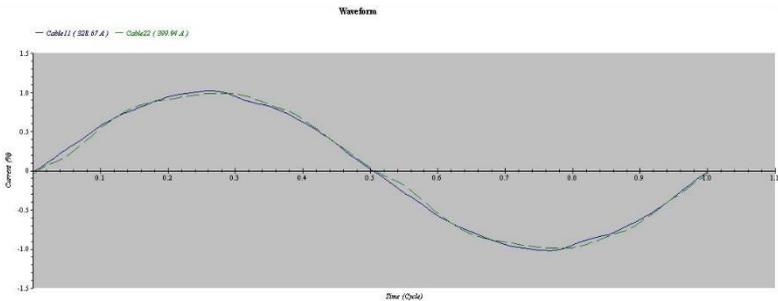
Gambar 4.61 Diagram Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 23 di SS7



Gambar 4.62 Gelombang Tegangan Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 23 di SS7



Gambar 4.63 Diagram Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 23 di SS7



Gambar 4.64 Gelombang Arus Hasil *Filtering* pada Bus HSB-SS6-01A-01B, HSB-SS7-01A-01B Setelah Penambahan Filter Orde 23 di SS7

Berdasarkan hasil yang sudah didapat ini dan dengan melihat THD_v maupun THD_i dari sistem, sistem sudah bisa dinyatakan aman dari gangguan harmonisa karena nilai THD sudah dibawah batas yang diharuskan. Dengan begitu sistem pada *plant* ini total membutuhkan filter sebanyak 14 buah filter. Hasil *filtering* terakhir dari sistem adalah sebagai berikut :

- **HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B**
 - Tegangan = 10.99 kV
 - THD_v = 1.04%
 - Arus Cable11 = 328.7 A
 - THD_i = 1.72%
- **HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B**
 - Tegangan = 10.99 kV

THD _v	= 1.04%
Arus Cable22	= 400.2 A
THD _i	= 3.70%

Untuk melihat pengaruh dari proses *filtering* penambahan orde 5, 7, 11, 13, 17, 19 dan 23 pada network SS7 ini, data dari peredaman dapat dilihat pada Tabel 4.30 dan Tabel 4.31. Dapat diambil sebagai kesimpulan bahwa ditetapkannya penggunaan 14 buah filter untuk *plant* ini.

Tabel 4.30 Data Persentase Harmonisa pada Tegangan Fundamental di Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23 di SS7

ID	Teg. Dasar (kV)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
HSB-SS6-01A	10.991	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.05	0.02
HSB-SS6-01B	10.991	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.05	0.02
HSB-SS7-01A	10.994	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.05	0.02
HSB-SS7-01B	10.994	0	0.42	0.72	0.37	0.04	0.05	0.05	0.02
MV-CP-004A	10.999	0	0.42	0.72	0.36	0.04	0.05	0.05	0.02

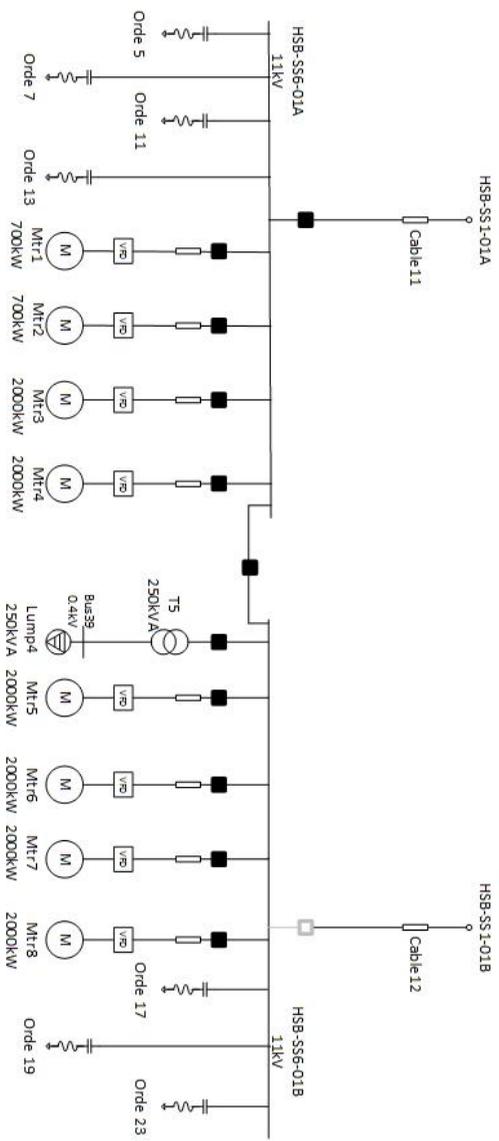
Tabel 4.31 Data Persentase Harmonisa pada Arus Fundamental di Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23 di SS7

ID	Arus Dasar (A)	Orde (%)							
		2	5	7	11	13	17	19	23
Cable11	328.67	0	0.73	1.25	0.53	0.69	0.14	0.12	0.16
Cable22	399.94	0	2.90	2.11	0.61	0.62	0.14	0.11	0.13

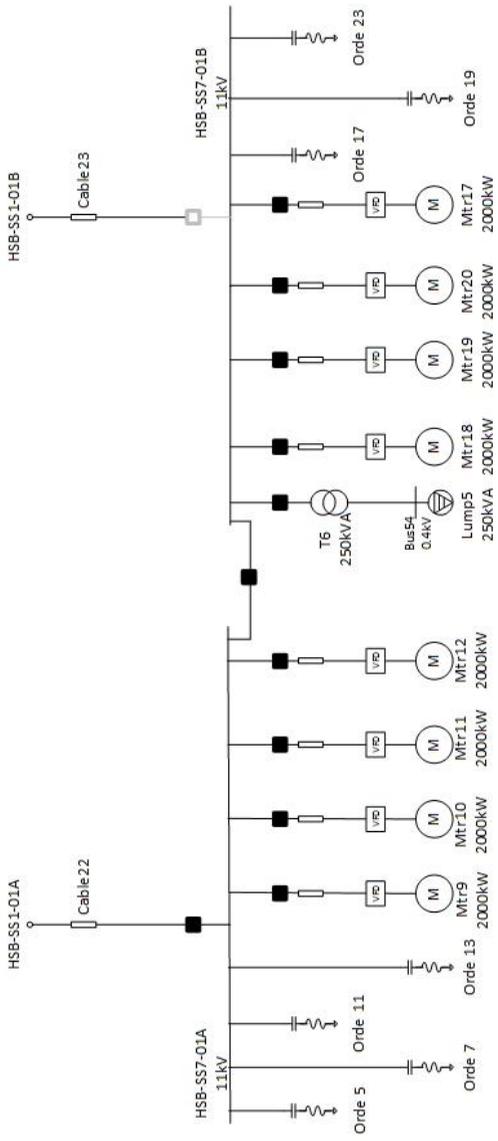
Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemasangan filter sudah cukup membantu dalam mereduksi dan meredam frekuensi harmonisa yang timbul karena dapat dilihat bahwa persentase THD_v dan THD_i yang timbul sudah dibawah standard IEEE 519-1992 Std, yaitu persentase THD harus dibawah 5% dan untuk nilai dari IHD sudah dibawah 3%. Untuk lebih jelas bagaimana penempatan filter pada bus yang ditentukan, akan diperlihatkan oleh Gambar 4.65 dan Gambar 4.66.

Apabila terjadi *maintenance* pada salah satu bus tersebut, filter harmonisa juga masih dapat mengatasi harmonisa yang timbul dan nilai THDv dan THDi tidak melebihi ambang batas yang ditentukan. Hasil dari simulasi ini juga akan diperlihatkan oleh Gambar 4.67 dan Gambar 4.68.

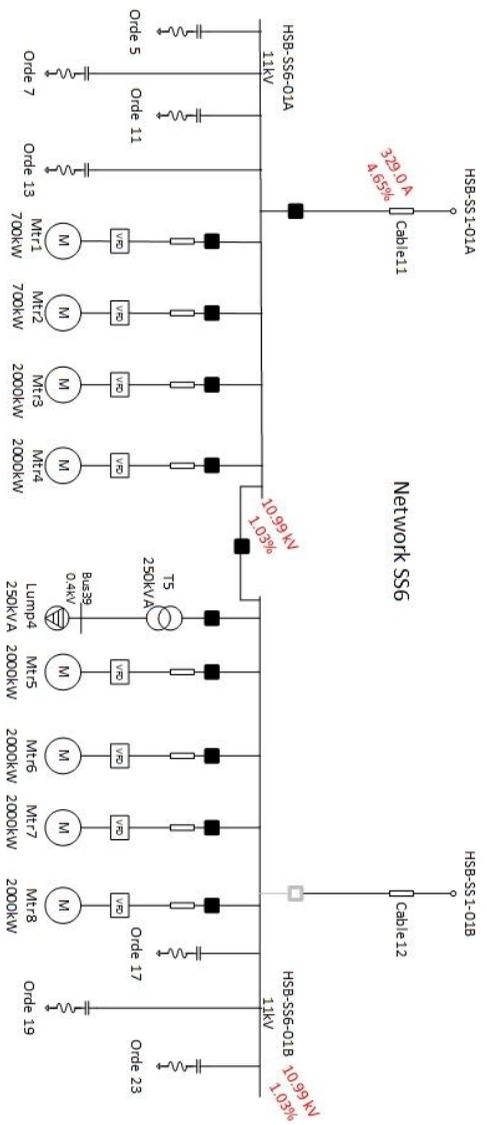
Untuk lebih jelasnya dalam pengaruh hasil filtering terhadap gangguan harmonisa yang timbul pada bus-bus lain, data akan disajikan oleh Tabel 4.32 dimana dalam table tersebut terlihat bahwa bus-bus lain juga ikut terpengaruh teredam harmonisanya akibat pemasangan filter pada bus di SS6 dan juga bus di SS7.



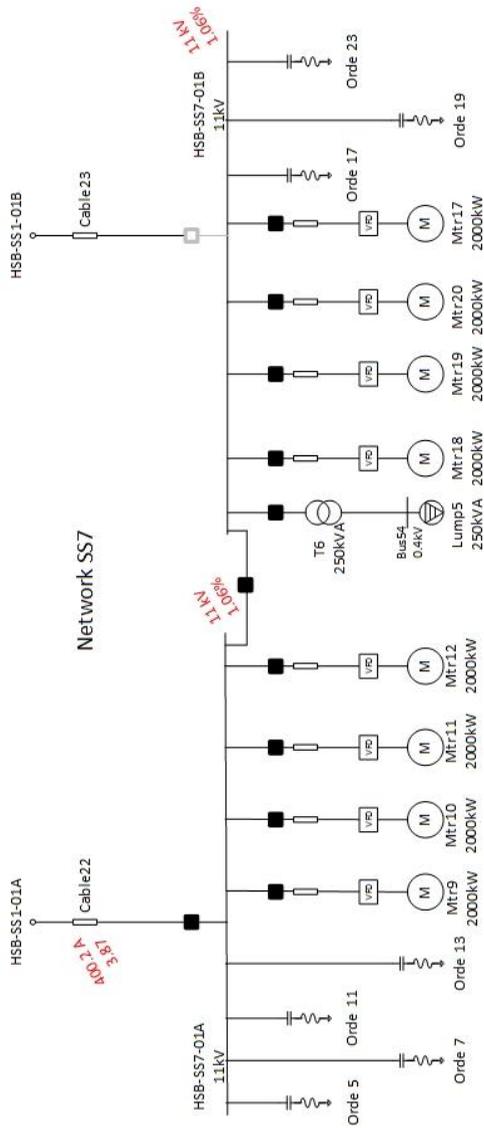
Gambar 4.65 Single Line Diagram Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B (Network SS6)



Gambar 4.66 Single Line Diagram Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B (Network SS7)



Gambar 4.67 Hasil Simulasi Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B pada Saat *Network SS7 Open*.



Gambar 4.68 Hasil Simulasi Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B pada Saat Network SS6 Open.

Tabel 4.32 Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter

From ID	To ID	kV	THD_v (%)	THD_i (%)
Bus1	HSB-SS2-01B	11	1.02	0.60
Bus2	Bus9	11	1.04	1.25
Bus3	Bus10	11	1.04	0.91
Bus4	Bus11	11	1.04	0.95
Bus5	Bus12	11	1.04	1.36
Bus6	HSB-SS2-01B	11	1.02	1.69
Bus9	Bus2	11	1.04	1.25
Bus10	Bus3	11	1.04	0.91
Bus11	Bus4	11	1.04	0.95
Bus12	Bus5	11	1.04	1.36
Bus13	MV-CP-004A	11	1.04	2.54
Bus14	Bus92	0.4	0.73	0.42
Bus15	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0.73	0
Bus16	Bus15	11	0.73	0
Bus19	HSB-SS2-01B	11	1.02	1.69
Bus21	HSB-SS2-01B	11	1.02	1.69
Bus22	HSB-SS1-01A	0.4	0.83	0.68
Bus23	HSB-SS1-01B	0.4	0.83	0.68
Bus25	HSB-SS2-01B	11	1.02	1.54
Bus26	HSB-SS2-01A	11	1.02	1.27
Bus28	Bus31	11	1.04	1.36
Bus31	Bus28	11	1.04	1.36
Bus33	HSB-SS6-01A	11	1.06	1.57
Bus34	HSB-SS6-01A	11	1.10	1.36
Bus35	HSB-SS6-01B	11	1.09	1.38
Bus36	HSB-SS6-01B	11	1.09	1.38

Tabel 4.32 Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter (lanjutan)

From ID	To ID	kV	THD_v (%)	THD_i (%)
Bus37	HSB-SS6-01B	11	1.09	1.38
Bus38	HSB-SS6-01B	11	1.09	1.38
Bus39	HSB-SS6-01B	0.4	0.84	0.68
Bus40	HSB-SS2-01A	11	1.02	1.27
Bus41	HSB-SS2-01A	11	1.02	1.27
Bus43	HSB-SS5-01	0.4	0.93	0.72
Bus44	HSB-SS7-01A	11	1.21	1.30
Bus47	HSB-SS7-01A	11	1.14	1.38
Bus49	HSB-SS7-01A	11	1.10	1.39
Bus54	HSB-SS7-01B	0.4	0.84	0.68
Bus55	HSB-SS2-01A	11	1.02	1.27
Bus56	HSB-SS7-01A	11	1.10	1.39
Bus61	HSB-SS7-01B	11	1.10	1.39
Bus62	HSB-SS7-01B	11	1.10	1.39
Bus63	HSB-SS7-01B	11	1.10	1.39
Bus64	HSB-SS7-01B	11	1.10	1.39
Bus67	Bus1	0.4	0.75	0.61
Bus68	Bus55	0.4	0.67	1.27
Bus69	Bus40	0.4	0.67	1.27
Bus71	Bus25	0.4	0.80	1.54
Bus72	Bus19	0.4	0.87	1.69
Bus73	Bus6	0.4	0.87	1.69
Bus74	Bus21	0.4	0.87	1.69
Bus75	Bus26	0.4	0.67	1.27
Bus79	HSB-SS5-01	11	1.05	1.53
Bus80	HSB-SS5-01	0.4	0.92	0.73

Tabel 4.32 Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter (lanjutan)

From ID	To ID	kV	THDv (%)	THDi (%)
Bus81	HSB-SS4-01	11	1.06	0.73
Bus83	HSB-SS27-01	11	1.05	1.31
Bus87	MCC-CP-006B	0.4	0.73	0
Bus90	HSB-SS6-01A	11	1.10	1.38
Bus91	HSB-SS6-01A	11	1.10	1.38
Bus92	Bus14	0.4	0.73	0.42
Bus97	Bus41	0.4	0.67	1.27
HSB-SS1-01A	MV-CP-004A	11	1.04	1.06
HSB-SS1-01B	HSB-SS2-02B	11	1.04	1.32
HSB-SS1-02	HSB-SS2-01B	11	1.04	1.25
HSB-SS2-01A	HSB-SS1-01A	11	1.02	1.29
HSB-SS2-01B	HSB-SS1-02	11	1.02	1.29
HSB-SS2-02A	HSB-SS1-01A	11	1.04	0
HSB-SS2-02B	HSB-SS1-01B	11	1.04	0
HSB-SS3-01	HSB-SS1-02	11	1.05	1.92
HSB-SS4-01	Bus81	11	1.06	1.06
HSB-SS5-01	HSB-SS1-01A	11	1.04	0.70
HSB-SS6-01A	HSB-SS1-01A	11	1.04	1.72
HSB-SS6-01B	Bus35	11	1.04	1.50
HSB-SS7-01A	HSB-SS1-01A	11	1.04	3.70
HSB-SS7-01B	Bus64	11	1.04	1.52
HSB-SS27-01	Bus83	11	1.06	0.83
MCC-1P-007	MCC-CP-006A	0.4	0.72	0.36
MCC-2CP-007 (ENGINE-2)	MCC-CP-006A	0.4	0.72	0.37

Tabel 4.32 Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter (lanjutan)

From ID	To ID	kV	THDv (%)	THDi (%)
MCC-3CP-007 (ENGINE-3)	MCC-CP-006A	0.4	0.72	0.37
MCC-CP-006A	MCC-1P-007	0.4	0.73	0.36
MCC-CP-006B	Bus87	0.4	0.73	0
MCC-CP-006 BUS C	Bus15	0.4	0.73	0
MCC-CP-008	MCC-CP-006A	0.4	0.73	0.37
MV-CP-004A	Bus13	11	1.04	2.54
Cable61~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0.73	0
Cable62~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0.73	0
Cable63~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0.73	0
Cable12~	HSB-SS1-01B	11	1.04	0
Cable23~	HSB-SS1-01B	11	1.04	0

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan yang telah dilakukan dalam menentukan spesifikasi filter harmonisa yang bisa digunakan pada *plant Pakistan Deep Water Container Port*, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Perhitungan dari masing-masing filter sudah tepat karena setiap filter tersebut mampu meredam frekuensi harmonisa pada setiap orde yang ditentukan dan hal ini membantu dalam menurunkan nilai dari THD_v serta THD_i yang timbul pada sistem. Nilai THD tersebut juga sudah sesuai standard IEEE 519-1992 Std dimana persentase THD yang diperbolehkan adalah maksimal 5%, khususnya pada bus HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B yang merupakan sumber harmoinsa pada sistem tersebut.
2. Pemasangan filter pada bus di *network* SS6 hanya akan menurunkan nilai THD_v saja, maka untuk menurunkan THD_i, perlu dipasang filter orde yang sama pada bus di *network* SS7. Hal ini mungkin bisa terjadi akibat pembagian arus terhadap kedua bus tersebut.
3. Perhitungan filter juga sudah tepat apabila terjadi pemutusan atau *maintenance* pada salah satu *network* SS6 atau SS7, karena apabila salah satu dari *network* tersebut diputus (*open*) maka THD_v dan THD_i juga tetap masih dibawah standard yang ditentukan.
4. Dalam menentukan nilai kVAR pada spesifikasi filter ternyata harus mempertimbangkan nilai kVAR dari generator sumber juga karena apabila nilai kVAR pada filter terlalu besar (dalam kasus ini maksimal kVAR adalah 4800 kVAR), akan mengakibatkan salah satu atau bahkan semua generator menjadi *under excited* dan dampak terburuknya adalah akan menurunkan faktor daya secara drastis bahkan bisa membuat sistem mengalami *blackout* apabila hal tersebut terjadi.
5. Pemasangan filter sudah tepat dipasang pada bus yang memang merupakan sumber harmonisa, karena dari pemasangan filter pada

bus tersebut otomatis juga meredam harmonisa yang timbul pada bus lainnya.

6. Dalam proses menurunkan THD ternyata hal yang perlu diperhatikan ialah orde-orde harmonik yang tinggi pada bus (untuk THD_v) dan juga pada kabel suplai ke bus (untuk THD_i). Apabila hanya berfokus pada bus saja, belum tentu THD_i akan ikut turun juga.

5.2 Saran

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, saran yang dapat diberikan untuk kedepannya adalah sebagai berikut :

1. Penentuan spesifikasi filter pasif yang digunakan pada Tugas Akhir ini, bisa juga menjadi referensi atau pertimbangan bagi perusahaan yang bersangkutan.
2. Berdasarkan hasil simulasi, sebenarnya filter bisa dikurangi dua buah, tetapi nilai THD_i masih sangat dekat dengan batas. Maka untuk mencari nilai ekonomis perlu dilakukan studi lebih lanjut.
3. Bagi mahasiswa yang akan meneliti tentang pemasangan filter harmonisa, Tugas Akhir ini bisa digunakan sebagai pembanding karena pada Tugas Akhir ini hanya menggunakan filter pasif berjenis *single-tuned*.

