

ANALISIS PENGARUH INTEGRASI ENERGI BARU TERBARUKAN TERHADAP RESONANSI HARMONISA PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

¹ Muhammad Iqbal , ² Abraham Lomi , ³ Awan Uji Krismanto

Teknik Elektro S1, Institut Teknologi Nasional, Malang , Indonesia

¹muhiqfaza12@gmail.com, ²abraham@lecturer.itn.ac.id, ³awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Perkembangan teknologi energi terbarukan dan peralatan elektronika daya sangatlah pesat sehingga menuntut ilmu pengetahuan pada bidang ini sangatlah dibutuhkan. Penggabungan antara energi terbarukan dengan jaringan listrik pada saat ini kian marak, hal ini lah yang melatarbelakangi penulis untuk meneliti dan membahas tentang judul ini. Resonansi harmonisa adalah sebuah fenomena yang disebabkan oleh getaran-getaran dari harmonisa akibat pertukaran energi antara elemen kapasitif dan elemen induktif. Resonansi harmonisa dengan skala besar dapat menyebabkan kegagalan sistem apabila tidak segera ditangani. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah penelitian yang dapat melihat dampak resonansi harmonisa dari integrasi energi terbarukan pada jaringan kelistrikan. Penelitian ini menggunakan metode Fast Fourier Transform (FFT) dan metode Impedance Measurement yang terdapat pada software Matlab Simulink 2019.

Kata Kunci: Resonansi Harmonisa, Energi Terbarukan, Matlab Simulink.

I. PENDAHULUAN

Pada era modern listrik menjadi komoditas primer pada saat ini. Banyak barang maupun alat untuk mempermudah manusia dalam kehidupan sehari-hari yang menggunakan listrik sebagai sumber energinya. Seiring berkembangnya teknologi kebutuhan listrik semakin meningkat setiap harinya. Saat ini pembangkitan listrik yang menggunakan bahan bakar fosil mengalami masalah menipisnya ketersediaan bahan bakar fosil dan buruknya pengaruh polusi dari gas buang pembakaran terhadap lingkungan. Hal inilah yang melatar belakangi para peneliti

untuk mengembangkan pembangkitan listrik menggunakan renewable energi.

Pada saat ini semakin banyak beban non linier seiring berkembangnya kemajuan teknologi. Karena mudah dan praktisnya peralatan beban non linier, hal inilah alasan semakin banyaknya beban non linier dalam kehidupan sehari-hari. Di sisi lain, kebanyakan dari beban non linier pada umumnya berasal dari bahan – bahan semikonduktor dan elemen elektronika daya yang dapat menimbulkan harmonisa pada sistem tenaga listrik.[1]

Harmonisa merupakan fenomena listrik hasil dampak dari beban non linier. Adanya harmonisa disebabkan dari banyaknya penggunaan peralatan elektronika daya ataupun beban non linier pada sistem tenaga listrik. Contoh dari beban non linier antara lain adalah inverter dan konverter.[2][3]

Pada penelitian ini akan dianalisa pengaruh dari integrasi wind turbine dan PV sistem terhadap resonansi harmonisa pada sistem tenaga listrik menggunakan software Matlab Simulink 2019a

Dari paparan Latar belakang diatas rumusan masalah yang perlu diteliti adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh integrasi energi baru terbarukan terhadap resonansi harmonisa pada system tenaga listrik.
2. Bagaimana respon perubahan nilai kapasitor terhadap resonansi harmonisa setelah dilakukan integrasi energi terbarukan pada sistem.

Adapun tujuan penelitian ini adalah meningkatkan performa system yang dipresentasikan sebagai berikut :

1. Untuk menganalisis respon harmonisa pada system bus saat diintegrasikan dengan energi terbarukan.
2. Untuk menganalisis respon perubahan nilai kapasitor terhadap resonansi harmonisa setelah dilakukan integrasi energi terbarukan pada sistem

II. KAJIAN PUSTAKA

1. Dasar Teori

A. Harmonisa

Harmonisa dapat didefinisikan sebagai sinyal atau gelombang dengan frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar. Selain membawa frekuensi fundamental, sinyal keluaran mungkin berisi harmonisa pada frekuensi 2f, 3f, 4f, dan seterusnya. Dalam kondisi ini, sinyal bukanlah bentuk gelombang sinusoidal murni tetapi terdistorsi dan muncul dalam berbagai bentuk, seperti gelombang segitiga, persegi, dan gigi gergaji. Bentuk gelombang tersebut tidak berbentuk sinusoidal karena adanya harmonik ganjil dan genap.[1][3]

THD adalah singkatan dari Total Harmonic Distortion biasanya menunjukkan jumlah distorsi dalam sinyal daya, dan merupakan rasio antara daya yang terkandung dalam harmonisa dengan daya sinyal utama, yang dinyatakan sebagai:[1][4]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} M_h^2}}{M_1} \times 100\%$$

Dimana :

M₁ adalah harmonik fundamental

M_h adalah harmonik komponen ke-h dari M

Berikut adalah tabel standar distorsi harmonik menurut IEEE-519 [5][4]

Tabel 1 Standar Gangguan Harmonisa yang terdapat pada Tegangan

Distorsi Harmonik Tegangan dalam %			
Tegangan Sistem	<69 kv	69 – 138 kv	>138 kv
THD	5.0	2.5	1.5

Tabel 2 Standar Gangguan Harmonisa yang terdapat pada Arus

Distorsi Harmonik Arus dalam %	
IL/Isc	THD
<20	5.0
20 - 50	8.0
50 - 100	12.0
100 - 1000	15.0
THD = Total Harmonic Distortion	
Isc = Current Short Circuit Maximum	
IL = Current Load Maximum	

B. Resonansi Harmonisa

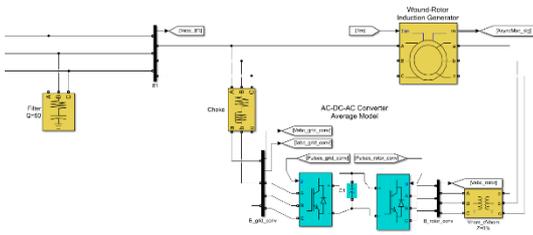
Resonansi harmonisa disebabkan oleh pertukaran energi antara elemen kapasitif dan elemen induktif dalam suatu sistem. Resonansi harmonisa adalah salah satu akibat utama harmonisa dalam sistem tenaga. Banyak masalah peralatan terkait harmonisa dapat disebabkan oleh fenomena tersebut. [6][7]

Perbedaan antara harmonisa dan resonansi terletak pada jumlah dari osilasinya. Harmonisa adalah osilasi sederhana yang berbentuk sinusoidal pada frekuensi tunggal. Harmonisa memiliki frekuensi lebih tinggi dari frekuensi fundamental dan memiliki kelipatan dari frekuensi fundamental, contohnya adalah 2f, 3f, dan seterusnya. Harmonisa memiliki amplitudo lebih kecil dari frekuensi fundamentalnya. [8]

Sedangkan resonansi harmonisa adalah osilasi kompleks yang terdiri dari gabungan beberapa harmonisa. Perbedaan lainnya adalah resonansi harmonisa mencakup efek amplitudo damping sedangkan harmonisa tidak. Damping adalah pengaruh di dalam atau pada sistem osilasi yang memiliki efek mengurangi atau meredam sehingga mencegah terjadinya osilasinya. Dalam sistem fisik, redaman dihasilkan oleh proses yang menghilangkan energi yang tersimpan dalam osilasi. [9]–[11]

C. Wind Turbine

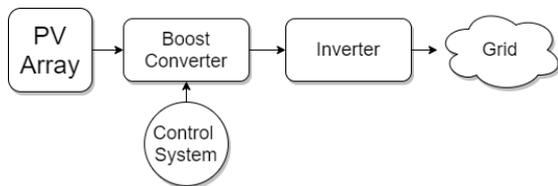
Wind Turbine ini menggunakan example pada software Matlab Simulink yaitu Double Fed Induction Generator (DFIG) yang terdiri belitan rotor yang terhubung ke PWM berbasis AC/DC/AC IGBT, sedangkan pada belitan stator terhubung langsung tersambung ke jaringan.[12], [13] Teknologi DFIG memungkinkan untuk memanen energi secara maksimal dari wind turbine untuk kecepatan angin rendah dengan cara mengoptimalkan kecepatan turbin, sekaligus meminimalkan tekanan mekanis pada turbin selama hembusan angin. [14]



Gambar 1. DFIG Wind Turbine Model

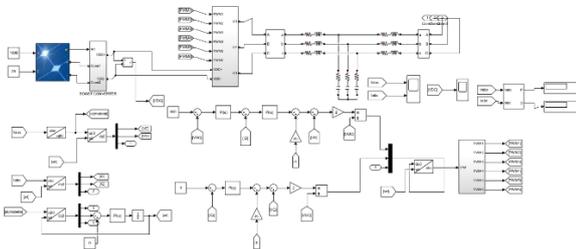
D. PV Sistem Model

Sistem PV yang diteliti pada analisa ini adalah sistem On-grid dimana PV langsung mensuplai daya ke jaringan tanpa dilakukan penyimpanan pada baterai. Sistem ini terdiri dari gabungan beberapa sel PV dalam satu grup terintegrasi, semua berorientasi dalam satu bidang untuk mendapatkan daya yang dibutuhkan. Untuk mengatur keluaran daya dari susunan PV, diperlukan boost converter untuk mengontrol tegangan dc variabel ke sistem inverter. Kemudian dibutuhkan komponen elektronika daya yang bernama inverter, prinsip dasar dari inverter PV adalah mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC melalui proses switching yang dapat dikontrol dengan bantuan dari gelombang persegi yang dihasilkan oleh PWM.[15][16][17]



Gambar 2. Bagan 1 Blok Diagram PV sistem

berikut adalah gambar dari sistem PV yang digunakan pada analisis ini.

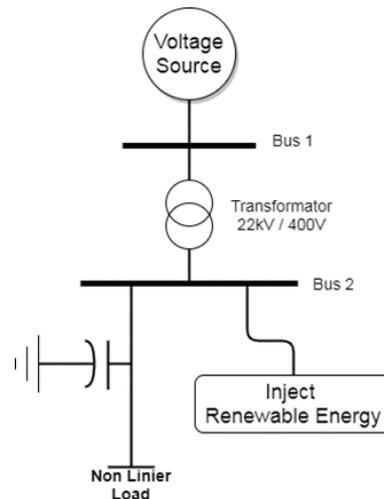


Gambar 3. PV Sistem Model

E. Sistem Jaringan

Single line diagram sistem ini menggunakan 22 kV dan 400 V pada Busnya. Sumber AC menyuplai daya melalui transformator yang kemudian disalurkan pada beban. Pada Bus 2 dilakukan penginjeksian Sistem Energi Terbarukan.

Beban penghasil harmonik pada gambar ini adalah Inverter AC-DC-AC yang juga dihubungkan ke bus tegangan rendah. [18]



Gambar 4. Bagan 2 Sistem Jaringan

Untuk informasi spesifiknya dapat dilihat melalui tabel dibawah ini :

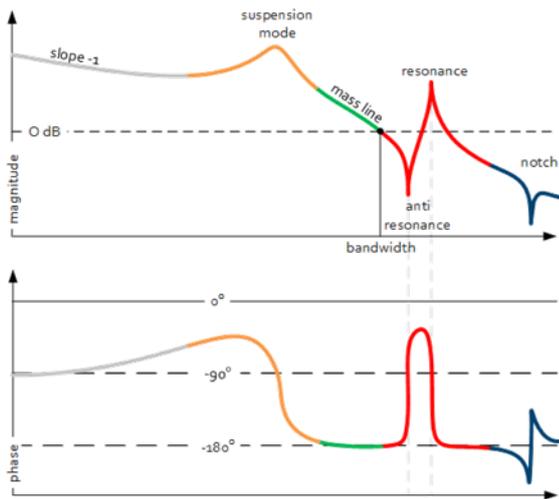
Tabel 3 Parameter Sistem Jaringan

	Parameter	Value
1) AC Voltage Source	Nominal Voltage (kV)	22
	Short Circuit MVA (MVA)	322.31
2) 2-Winding Transformer	Transformer size (kVA)	2000
	Nominal Voltage (kV)	22 / 0.4
	Winding Connection	Delta/Wye Grounded
	No Load Loss (kW)	3.3
3) Low Voltage Capacitor	Load Loss (kW)	24
	Size (kVar)	600
4) PV	Nominal Voltage (kV)	0.4
	Size (kVA)	100
5) Wind Turbine	Nominal Voltage (kV)	0.4
	Size (kVA)	100
6) Non Linear Load	Size (kVA)	500
	Nominal Voltage (kV)	0.4
	Power Factor	0.8

F. Bode Plot Analysis

Bode Plot Analisis adalah metode yang digunakan untuk melihat respon dari sistem melalui domain frekuensi. Jadi sistem akan di scanning frekuensinya kemudian akan

dimunculkan dalam bentuk grafik magnitudo dan fase seperti contoh dibawah ini. [19]



Gambar 5.. Contoh Bode Plot Analisis

Dalam menganalisis Bode Plot diperlukan dua komponen yang digunakan untuk menganalisis yaitu Gain Margin dan Phase Margin. Gain Margin adalah nominal magnitudo yang didapatkan pada saat grafik fase menyentuh 180°. Phase Margin adalah besaran fase yang didapatkan pada saat grafik magnitudo menyentuh 0 dB. Sebuah sistem bisa dikatakan stabil apabila pada saat grafik fase menyentuh 180°, Gain Marginnya tidak melebihi dari 0 dB magnitudo. Kemudian pada saat grafik magnitudo menyentuh 0 dB, Phase Marginnya tidak menyentuh angka 180°. [9]–[11]

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini difokuskan untuk meneliti pengaruh resonansi harmonisa terhadap sistem tenaga listrik akibat adanya integrasi energi baru terbarukan kedalam sistem tersebut dan pengaruh perubahan nominal kapasitor terhadap nilai resonansi harmonisa. Metode pengumpulan data penelitian ini adalah:

1. Kajian Literatur
2. Perancangan sistem PV 100 kW
3. Perancangan system wind turbine 100 kW
4. Pengumpulan data dan gambar single line diagram sistem kelistrikan
5. Memodelkan sistem PV system dan wind turbine menggunakan software Matlab Simulink
6. Menjalankan Simulasi untuk mengetahui Resonansi Harmonisa sebelum dan sesudah penginjeksian PV system dan wind turbine.

7. Menganalisa pengaruh pengubahan nominal kapasitor setelah terjadi pemasangan PV sistem dan wind turbine
8. Selesai.

A. Pengujian Sistem

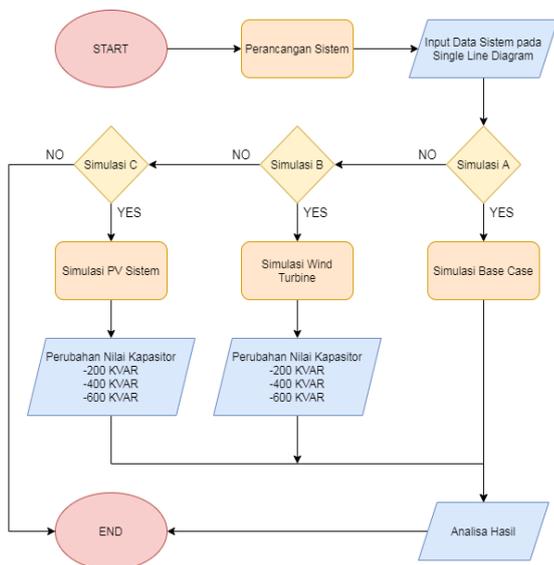
Tujuan dari penelitian sistem ini adalah sebagai media analisa bagaimana pengaruh sistem sebelum dan sesudah diinjeksi dengan PV system dan Wind Turbine. Studi kasus yang dianalisa pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 4 Studi Kasus Penelitian

Studi Kasus	Nominal
1) Simulasi sistem sebelum di injeksi Energi terbarukan	-
2) Simulasi system setelah di injeksi Wind Turbine (kW)	100
3) Simulasi sistem setelah di injeksi PV (kW)	100
4) Pengubahan nilai kapasitor setelah terinjeksi Wind Turbine (kVAR)	a) 200 b) 400 c) 600
5) Pengubahan nilai kapasitor setelah terinjeksi PV Sistem (kVAR)	a) 200 b) 400 c) 600

B. Flowchart Penelitian

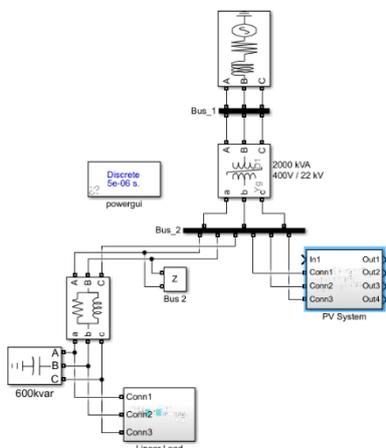
Alur dari penelitian ini dapat digambarkan melalui diagram alir dibawah sebagai berikut :



Gambar 6. Bagan 2 Flowchart Penelitian

C. Single Line Diagram

Sistem kelistrikan yang digunakan pada sistem ini digambarkan pada software Matlab Simulink 2019a untuk disimulasikan.



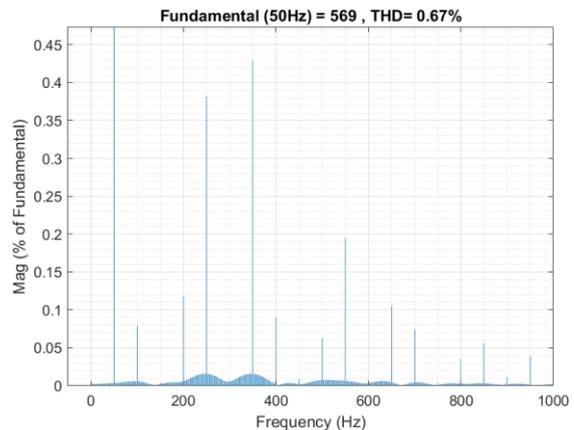
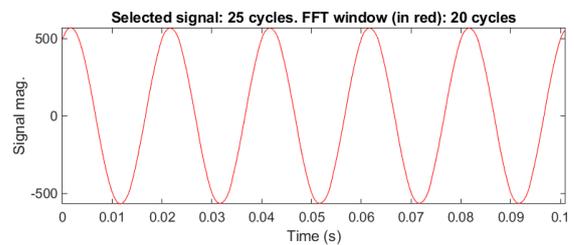
Gambar 7. Single Line Diagram

Proses simulasi pada software Matlab Simulink menggunakan metode Fast Fourier Transform (FFT Analysis) dan metode Impedance Measurement. Pada penelitian ini sample data yang diambil berasal dari Bus 2.

3. Hasil dan Pembahasan

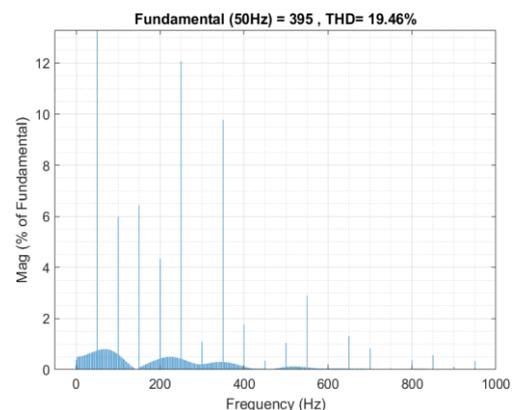
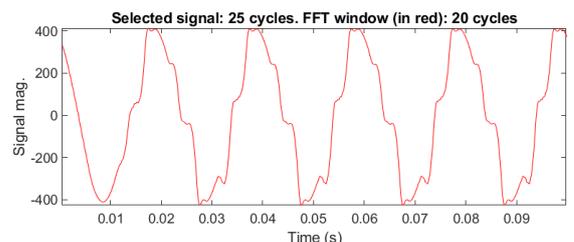
A. Analisis Sebelum Injeksi Energi Baru Terbarukan

Kita memasuki studi kasus yang pertama, yaitu mensimulasikan sistem pada saat sebelum terinjeksi energi baru terbarukan. Besaran kapasitor yang digunakan pada studi kasus yang pertama ini sebesar 200 KVAR.



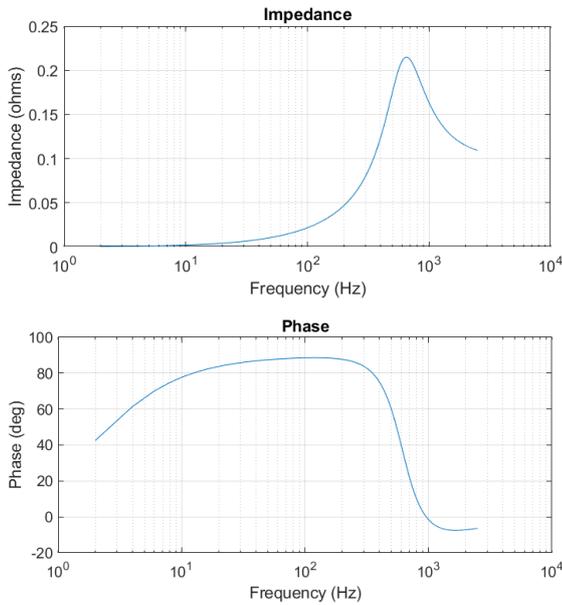
Gambar 8. THD Voltage

Pada analisis menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT Analysis), THD (Total *Harmonic Distortion*) pada tegangan sebesar 0,67% dengan gelombang magnitude peak 566 Volt. Pada grafik gelombang masih terlihat sinusoidal tanpa adanya gangguan distorsi harmonisa. THD pada tegangan bisa dikategorikan aman karena masih dibawah 5% menurut standarisasi tegangan distorsi harmonisa dengan sistem <69 kV.



Gambar 9. THD Current

Begitu pula dengan arus, THD (Total Harmonic Distortion) pada arus sebesar 19,46% dengan gelombang magnitude peak 417 Ampere. Pada grafik terlihat adanya distorsi harmonisa. THD pada arus bisa dikategorikan tidak aman karena melebihi 15% menurut standarisasi arus distorsi harmonisa dengan sistem 100-1000 Ampere.



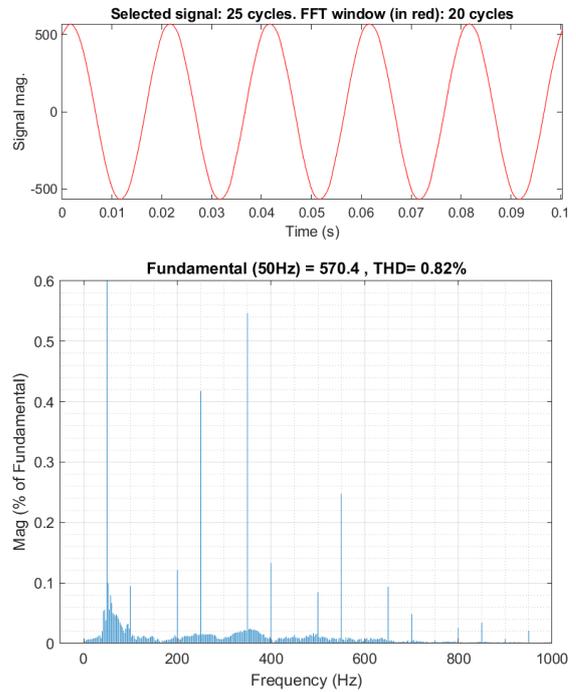
Gambar 10.. Bode Plot Analisis

Pada analisis menggunakan metode *Impedance Measurement* (Bode Plot Analisis) menggunakan batasan scanning [0:2:15000]. Grafik *impedance* menunjukkan adanya resonansi karena nilai output lebih besar daripada nilai input. Kita bisa melihat pada grafik impedance di frekuensi=2 nominal impedance sebesar 0,00062676 kemudian pada frekuensi=650 grafik impedance mengalami titik ketinggian puncak menjadi 0,21493 namun setelah itu grafik turun perlahan sehingga pada frekuensi 15000 nominal impedance menjadi 0,10022.

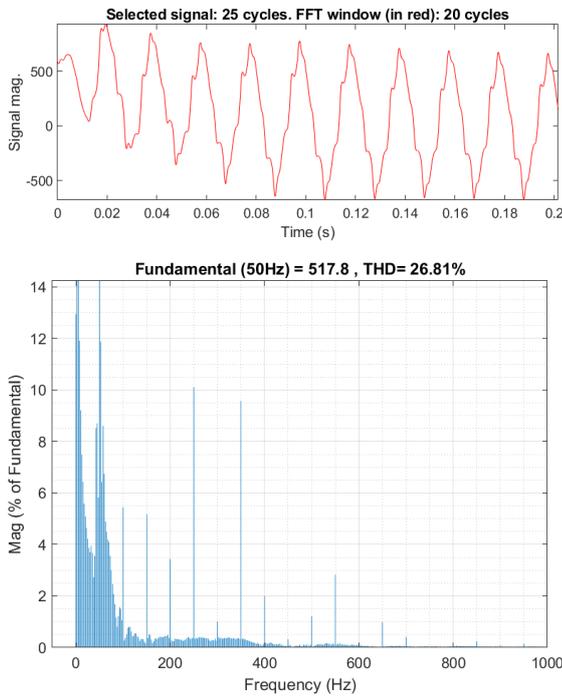
Grafik Phase dimulai pada frekuensi=2 dengan nominal 42,5334° kemudian pada frekuensi=120 grafik phase mengalami titik ketinggian puncak menjadi 88,5803° setelah itu grafik mengalami penurunan paling bawah pada frekuensi=1662 menjadi -7,4838° dan setelah terjadi penurunan, grafik mengalami sedikit kenaikan sehingga pada frekuensi=15000 nominal phase menjadi -1,2464°. Nilai Phase Margin pada analisis ini sebesar 42,5334° karena pada saat grafik impedance menyentuh angka 0 apabila ditarik garis lurus kebawah menuju grafik phase maka akan bertemu pada titik 42,5334°. Nilai Gain Margin pada analisis ini bernilai tak terhingga, karena pada grafik impedance tidak pernah menyentuh angka 180°. Analisis bode plot pada studi kasus ini resonansi dari sistem masih bisa dikategorikan aman karena grafik phase tidak menyentuh 180°.

B. Analisis Setelah Injeksi Wind Turbine 200 KVAR

Studi kasus yang kedua adalah untuk mengetahui respon system setelah mengalami injeksi Wind Turbine terhadap sistem jaringan listrik. Besaran kapasitor yang digunakan pada studi kasus yang kedua ini sebesar 200 KVAR.

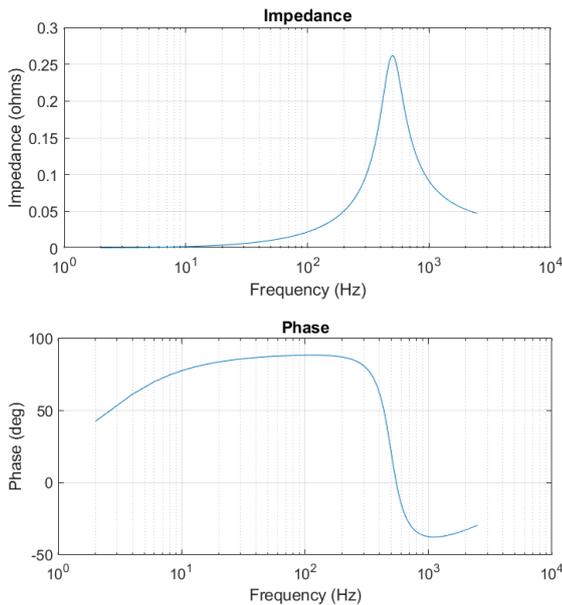


Pada analisis menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT Analysis), THD (Total Harmonic Distortion) pada tegangan sebesar 0,82% dengan gelombang magnitude peak 566 Volt. Pada grafik gelombang masih terlihat sinusoidal tanpa adanya gangguan distorsi harmonisa. THD pada tegangan bisa dikategorikan aman karena masih dibawah 5% menurut standarisasi tegangan distorsi harmonisa dengan sistem <69 kV.



Gambar 12. THD Current

Pada arus THD (Total Harmonic Distortion) sebesar 26,81% dengan gelombang magnitude peak 623,5 Ampere. Pada grafik terlihat adanya distorsi harmonisa. THD pada arus bisa dikategorikan tidak aman karena melebihi 15% menurut standarisasi arus distorsi harmonisa dengan sistem 100-1000 Ampere.



Gambar 13. Bode Plot Analisis

Pada analisis menggunakan metode *Impedance Measurement* (Bode Plot Analisis) menggunakan batasan

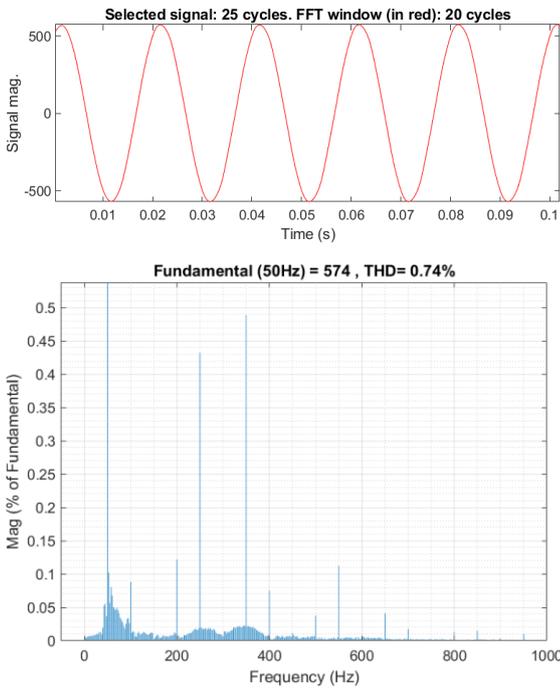
scanning [0:2:15000]. Grafik impedance menunjukkan adanya resonansi karena nilai output lebih besar daripada nilai input. Kita bisa melihat pada grafik impedance di frekuensi=2 nominal impedance sebesar 0,00062676 kemudian pada frekuensi=500 grafik impedance mengalami titik ketinggian puncak menjadi 0,26184 namun setelah itu grafik turun perlahan sehingga pada frekuensi 15000 nominal impedance menjadi 0,035193.

Grafik Phase dimulai pada frekuensi=2 dengan nominal 42,5339° kemudian pada frekuensi=112 grafik phase mengalami titik ketinggian puncak menjadi 88,4866° setelah itu grafik mengalami penurunan paling bawah pada frekuensi=1118 menjadi -37,5613° dan setelah terjadi penurunan, grafik mengalami sedikit kenaikan sehingga pada frekuensi=15000 nominal phase menjadi -6,5852°.

Nilai Phase Margin pada analisis ini sebesar 42,5339° karena pada saat grafik impedance menyentuh angka 0 apabila ditarik garis lurus kebawah menuju grafik phase maka akan bertemu pada titik 42,5339°. Nilai Gain Margin pada analisis ini bernilai tak terhingga, karena pada grafik impedance tidak pernah menyentuh angka 180°. Analisis bode plot pada studi kasus ini resonansi dari sistem masih bisa dikategorikan aman karena grafik phase tidak menyentuh 180°.

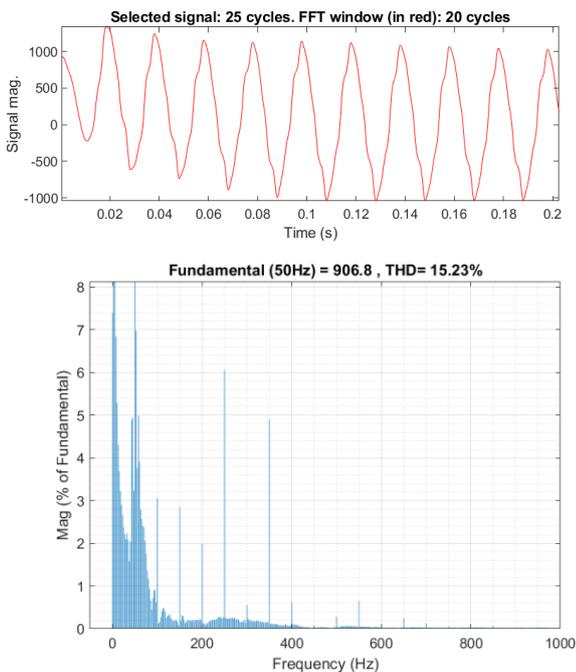
C Analisis Setelah Injeksi Wind Turbine 400 KVAR

Studi kasus yang ketiga adalah untuk mengetahui respon system setelah mengalami injeksi Wind Turbine terhadap system jaringan listrik. Besaran kapasitor yang digunakan pada studi kasus yang kedua ini sebesar 400 KVAR.



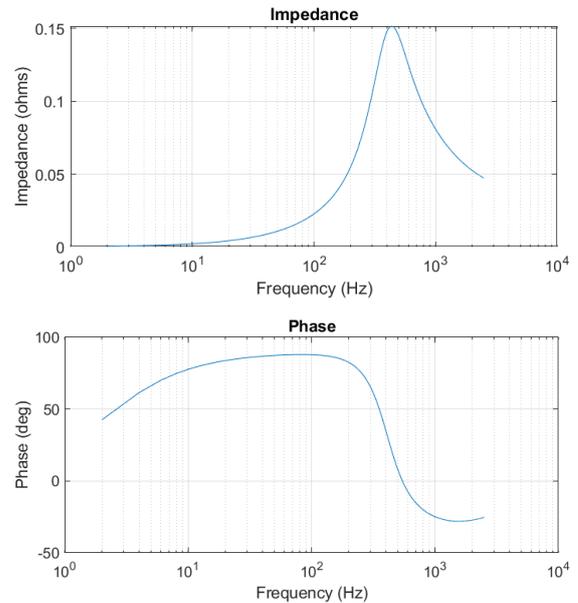
Gambar 14. THD Voltage

Pada analisis menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT Analysis), THD (Total Harmonic Distortion) pada tegangan sebesar 0,74% dengan gelombang magnitude peak 572Volt. Pada grafik gelombang masih terlihat sinusoidal tanpa adanya gangguan distorsi harmonisa. THD pada tegangan bisa dikategorikan aman karena masih dibawah 5% menurut standarisasi tegangan distorsi harmonisa dengan sistem <69 kV.



Gambar 15. THD Current

Pada arus THD (Total Harmonic Distortion) sebesar 15,23% dengan gelombang magnitude peak 975 Ampere. Pada grafik terlihat adanya distorsi harmonisa. THD pada arus bisa dikategorikan tidak aman karena melebihi 15% menurut standarisasi arus distorsi harmonisa dengan sistem 100-1000 Ampere.



Gambar 16. Bode Plot Analisis

Pada analisis menggunakan metode *Impedance Measurement* (Bode Plot Analisis) menggunakan batasan scanning [0:2:15000]. Grafik impedance menunjukkan adanya resonansi karena nilai output lebih besar daripada nilai input. Kita bisa melihat pada grafik impedance di frekuensi=2 nominal impedance sebesar 0,00062677 kemudian pada frekuensi=436 grafik impedance mengalami titik ketinggian puncak menjadi 0,15136 namun setelah itu grafik turun perlahan sehingga pada frekuensi 15000 nominal impedance menjadi 0,035203.

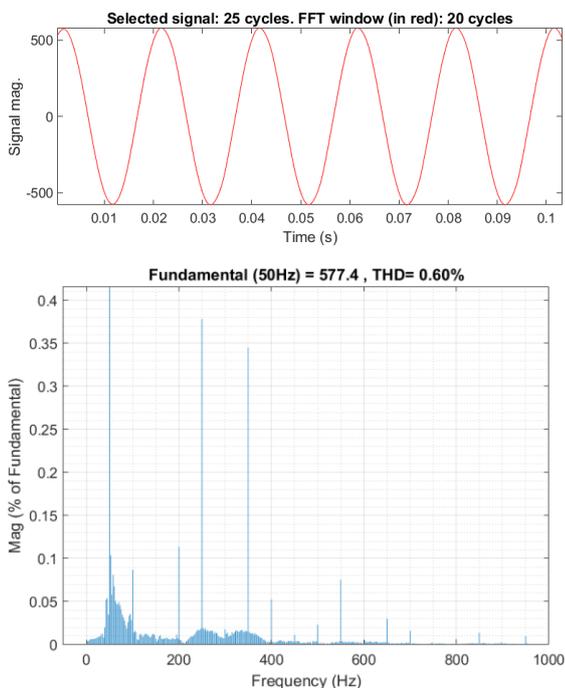
Grafik Phase dimulai pada frekuensi=2 dengan nominal 42,5333° kemudian pada frekuensi=82 grafik phase mengalami titik ketinggian puncak menjadi 87,9593° setelah itu grafik mengalami penurunan paling bawah pada frekuensi=1554 menjadi -28,0458° dan setelah terjadi penurunan, grafik mengalami sedikit kenaikan sehingga pada frekuensi=15000 nominal phase menjadi -6,0486°.

Nilai Phase Margin pada analisis ini sebesar 42,5333° karena pada saat grafik impedance menyentuh angka 0 apabila ditarik garis lurus kebawah menuju grafik phase maka akan bertemu pada titik 42,5333°. Nilai Gain Margin pada analisis ini bernilai tak terhingga, karena pada grafik impedance tidak pernah menyentuh angka 180°. Analisis

bode plot pada studi kasus ini resonansi dari sistem masih bisa dikategorikan aman karena grafik phase tidak menyentuh 180°.

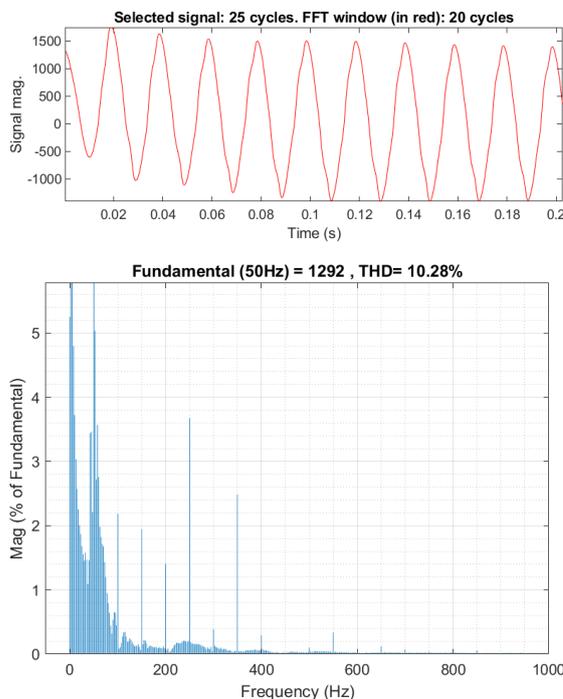
D. Analisis Setelah Injeksi Wind Turbine 600 KVAR

Studi kasus yang keempat adalah untuk mengetahui respon system setelah mengalami injeksi Wind Turbine terhadap system jaringan listrik. Besaran kapasitor yang digunakan pada studi kasus yang kedua ini sebesar 600 KVAR.



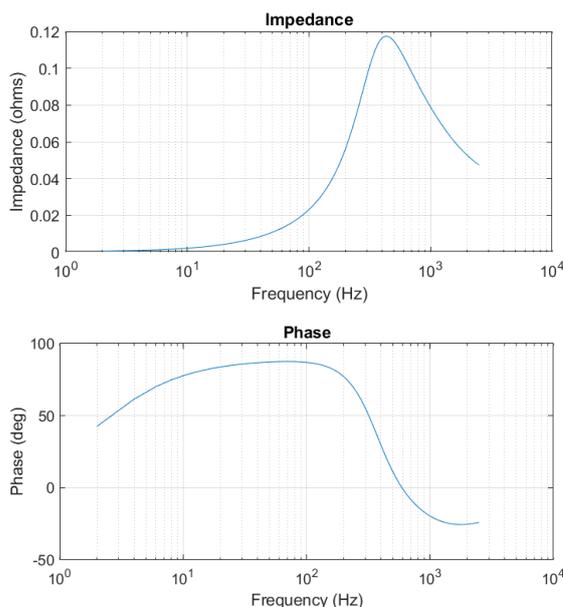
Gambar 17. THD Voltage

Pada analisis menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT Analysis), THD (Total Harmonic Distortion) pada tegangan sebesar 0,60% dengan gelombang magnitude peak 577 Volt. Pada grafik gelombang masih terlihat sinusoidal tanpa adanya gangguan distorsi harmonisa. THD pada tegangan bisa dikategorikan aman karena masih dibawah 5% menurut standarisasi tegangan distorsi harmonisa dengan sistem <69 kV.



Gambar 18. THD Current

Pada arus THD (Total Harmonic Distortion) sebesar 10,28% dengan gelombang magnitude peak 1330 Ampere. Pada grafik terlihat adanya distorsi harmonisa. THD pada arus bisa dikategorikan aman karena kurang dari 15% menurut standarisasi arus distorsi harmonisa dengan sistem 100-1000 Ampere.



Gambar 19. Bode Plot Analysis

Pada analisis menggunakan metode *Impedance Measurement* (Bode Plot Analysis) menggunakan batasan

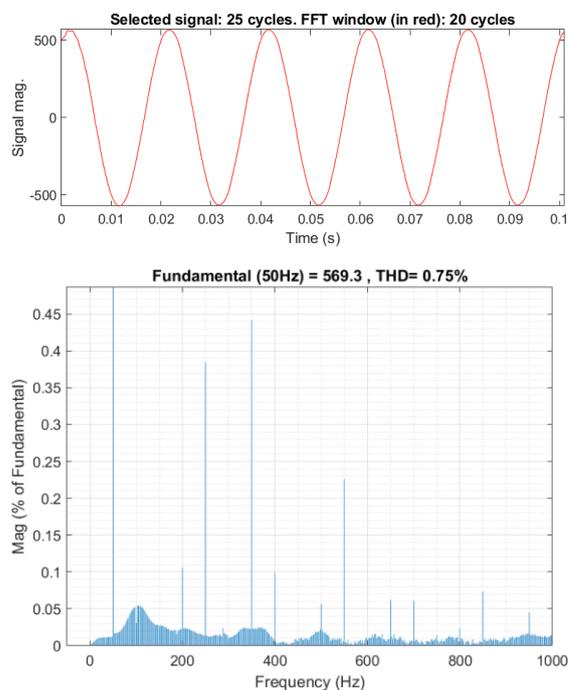
scanning [0:2:15000]. Grafik impedance menunjukkan adanya resonansi karena nilai output lebih besar daripada nilai input. Kita bisa melihat pada grafik impedance di frekuensi=2 nominal impedance sebesar 0,00062678 kemudian pada frekuensi=434 grafik impedance mengalami titik ketinggian puncak menjadi 0,11744 namun setelah itu grafik turun perlahan sehingga pada frekuensi 15000 nominal impedance menjadi 0,03521.

Grafik Phase dimulai pada frekuensi=2 dengan nominal 42,5326° kemudian pada frekuensi=70 grafik phase mengalami titik ketinggian puncak menjadi 87,5433° setelah itu grafik mengalami penurunan paling bawah pada frekuensi=1780 menjadi -25,4908° dan setelah terjadi penurunan, grafik mengalami sedikit kenaikan sehingga pada frekuensi=15000 nominal phase menjadi -5,8697°.

Nilai Phase Margin pada analisis ini sebesar 42,5326° karena pada saat grafik impedance menyentuh angka 0 apabila ditarik garis lurus kebawah menuju grafik phase maka akan bertemu pada titik 42,5326°. Nilai Gain Margin pada analisis ini bernilai tak terhingga, karena pada grafik impedance tidak pernah menyentuh angka 180°. Analisis bode plot pada studi kasus ini resonansi dari sistem masih bisa dikategorikan aman karena grafik phase tidak menyentuh 180°

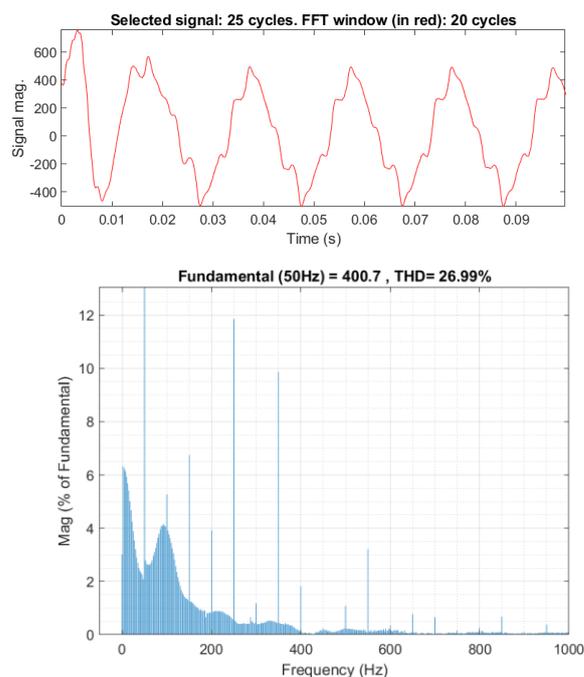
E. Analisis Setelah injeksi PV sistem 200 KVAR

Studi kasus yang kelima adalah untuk mengetahui respon sistem setelah mengalami injeksi PV sistem terhadap jaringan. Besaran kapasitor yang digunakan pada studi kasus yang ketiga ini sebesar 200 KVAR.



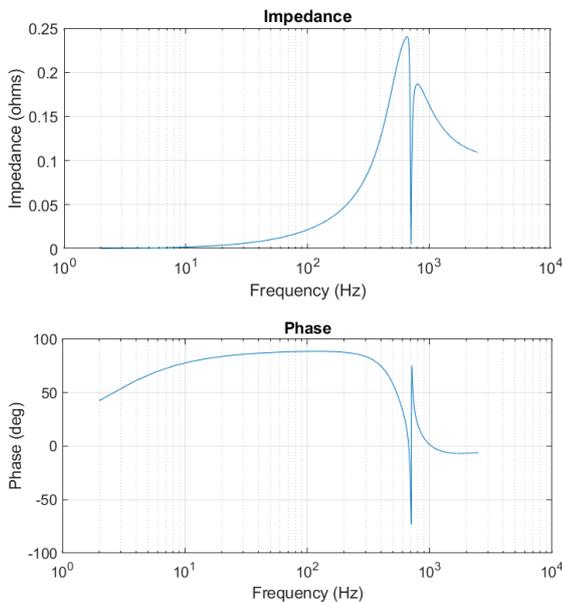
Gambar 20. THD Voltage

Pada analisis menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT Analysis), THD (Total Harmonic Distortion) pada tegangan sebesar 0,75% dengan gelombang magnitude peak 566 Volt. Pada grafik gelombang masih terlihat sinusoidal tanpa adanya gangguan distorsi harmonisa. THD pada tegangan bisa dikategorikan aman karena masih dibawah 5% menurut standarisasi tegangan distorsi harmonisa dengan sistem <69 kV.



Gambar 21. THD Current

Pada arus THD (Total Harmonic Distortion) sebesar 26,99% dengan gelombang magnitude peak 623,5 Ampere. Pada grafik terlihat adanya distorsi harmonisa. THD pada arus bisa dikategorikan tidak aman karena melebihi 15% menurut standarisasi arus distorsi harmonisa dengan sistem 100-1000 Ampere.



Gambar 22. Bode Plot Analisis

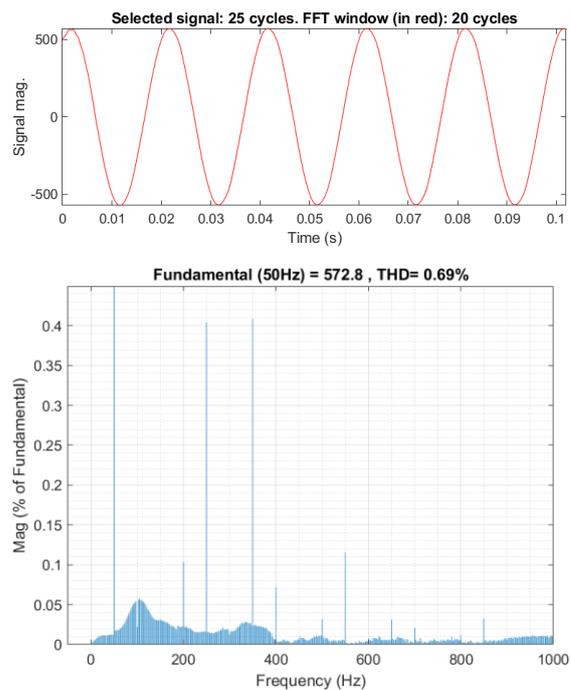
Pada analisis menggunakan metode *Impedance Measurement* (Bode Plot Analisis) menggunakan batasan scanning [0:2:15000]. Grafik impedance menunjukkan adanya resonansi karena nilai output lebih besar daripada nilai input. Kita bisa melihat pada grafik impedance di frekuensi=2 nominal impedance sebesar 0,00062678 kemudian pada frekuensi=662 grafik impedance mengalami titik ketinggian puncak menjadi 0,2405 namun setelah itu grafik turun secara drastis menuju titik terbawah pada frekuensi=712 menjadi 0,0050328 kemudian grafik mengalami kenaikan secara drastis pada frekuensi=800 menjadi 0,18672 setelah terjadi penurunan dan kenaikan grafik secara drastis, grafik perlahan turun dan stabil pada frekuensi 15000 dengan nominal impedance menjadi 0,10023.

Grafik Phase dimulai pada frekuensi=2 dengan nominal 42,5344° kemudian pada frekuensi=120 grafik phase mengalami titik ketinggian puncak menjadi 88,5788° setelah itu grafik mengalami penurunan titik paling bawah pada frekuensi=710 menjadi -73,1463° kemudian grafik mengalami kenaikan secara drastis pada frekuensi=714 dengan nominal 75,1561° dan setelah itu grafik mengalami penurunan perlahan dan stabil pada frekuensi=15000 dengan nominal phase menjadi -1,1853°.

Nilai Phase Margin pada analisis ini sebesar 42,5344° karena pada saat grafik impedance menyentuh angka 0 apabila ditarik garis lurus kebawah menuju grafik phase maka akan bertemu pada titik 42,5344°. Nilai Gain Margin pada analisis ini bernilai tak terhingga, karena pada grafik impedance tidak pernah menyentuh angka 180°. Analisis bode plot pada studi kasus ini resonansi dari sistem masih bisa dikategorikan aman karena grafik phase tidak menyentuh 180°.

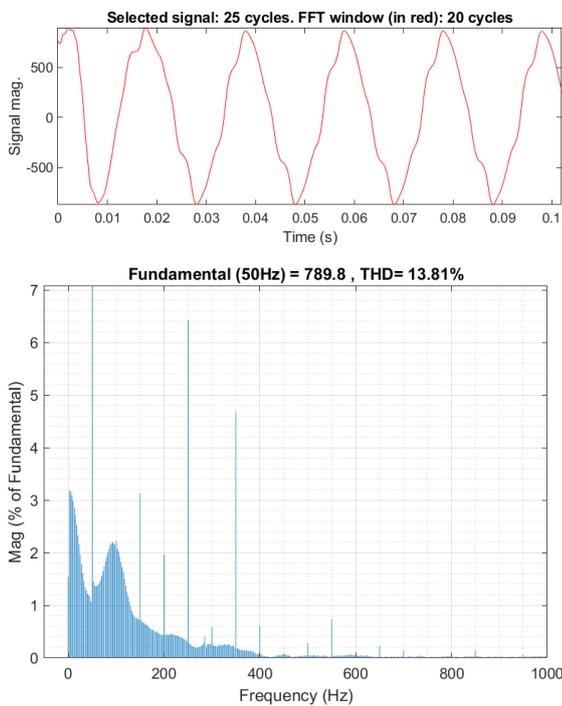
F. Analisis Pengurangan Besaran Kapasitor menjadi 400 kVAR

Studi kasus yang keenam ini adalah untuk mengetahui respon sistem setelah mengalami injeksi PV dan pengurangan besaran dari kapasitor menjadi 400 kVAR



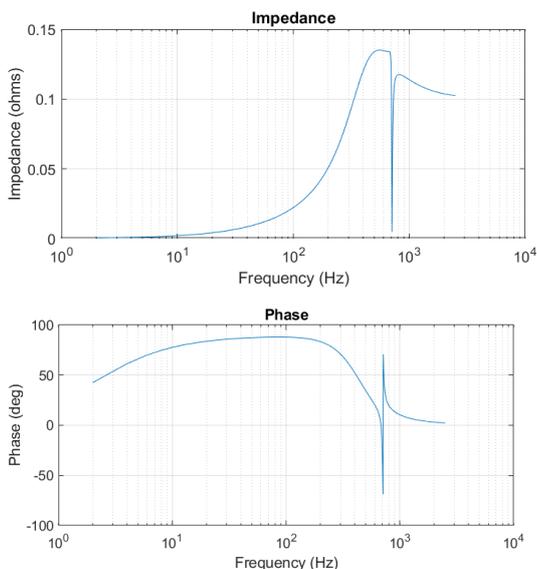
Gambar 23. THD Voltage

Pada analisis menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT Analysis), THD (Total Harmonic Distortion) pada tegangan sebesar 0,69% dengan gelombang magnitude peak 571 Volt. Pada grafik gelombang masih terlihat sinusoidal tanpa adanya gangguan distorsi harmonisa. THD pada tegangan bisa dikategorikan aman karena masih dibawah 5% menurut standarisasi tegangan distorsi harmonisa dengan sistem <69 kV.



Gambar 24. THD Current

Pada arus THD (Total Harmonic Distortion) sebesar 13,81% dengan gelombang magnitude peak 975,5 Ampere. Pada grafik terlihat adanya distorsi harmonisa namun sedikit berkurang jika dibandingkan dengan percobaan sebelumnya sehingga gelombang mendekati sinusoidal. THD pada arus bisa dikategorikan aman masih dibawah 15% menurut standarisasi arus distorsi harmonisa dengan sistem 100-1000 Ampere.



Gambar 25. Bode Plot Analisis

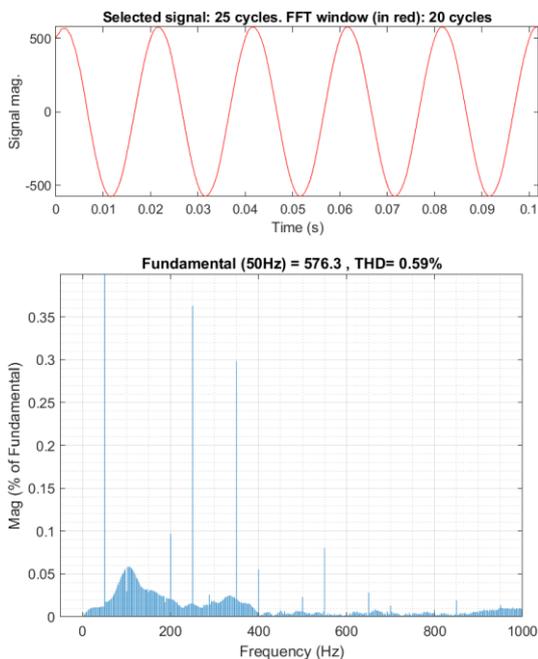
Pada analisis menggunakan metode *Impedance Measurement* (Bode Plot Analisis) menggunakan batasan scanning [0:2:15000]. Grafik impedance menunjukkan adanya resonansi karena nilai output lebih besar daripada nilai input. Kita bisa melihat pada grafik impedance di frekuensi=2 nominal impedance sebesar 0,00062677 kemudian pada frekuensi=548 grafik impedance mengalami titik ketinggian puncak menjadi 0,1503 namun setelah itu grafik turun secara drastis menuju titik terbawah pada frekuensi=712 menjadi 0,0049577 kemudian grafik mengalami kenaikan secara drastis pada frekuensi=812 menjadi 0,11753 setelah terjadi penurunan dan kenaikan grafik secara drastis, grafik perlahan turun dan stabil pada frekuensi 15000 dengan nominal impedance menjadi 0,10003.

Grafik Phase dimulai pada frekuensi=2 dengan nominal 42,5347° kemudian pada frekuensi=86 grafik phase mengalami titik ketinggian puncak menjadi 88,0071° setelah itu grafik mengalami penurunan titik paling bawah pada frekuensi=710 menjadi -68,9241° kemudian grafik mengalami kenaikan secara drastis pada frekuensi=714 dengan nominal 70,9425° dan setelah itu grafik mengalami penurunan perlahan dan stabil pada frekuensi=15000 dengan nominal phase menjadi 0,33775°.

Nilai Phase Margin pada analisis ini sebesar 42,5347° karena pada saat grafik impedance menyentuh angka 0 apabila ditarik garis lurus kebawah menuju grafik phase maka akan bertemu pada titik 42,5347°. Nilai Gain Margin pada analisis ini bernilai tak terhingga, karena pada grafik impedance tidak pernah menyentuh angka 180°. Analisis bode plot pada studi kasus ini resonansi dari sistem masih bisa dikategorikan aman karena grafik phase tidak menyentuh 180°.

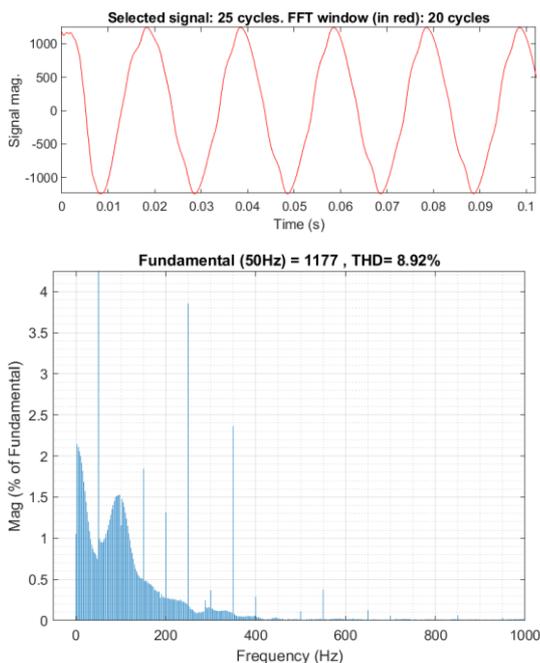
G. Analisis Pengurangan Besaran Kapasitor Menjadi 600 kVAR.

Studi kasus yang terakhir ini adalah untuk mengetahui respon sistem setelah mengalami injeksi PV dan pengurangan besaran dari kapasitor menjadi 600 kVAR.



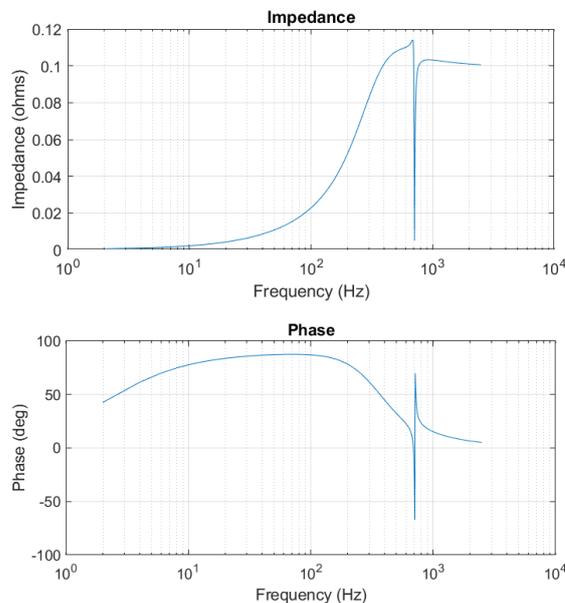
Gambar 26. THD Voltage

Pada analisis menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT Analysis), THD (Total Harmonic Distortion) pada tegangan sebesar 0,59% dengan gelombang magnitude peak 577 Volt. Pada grafik gelombang masih terlihat sinusoidal tanpa adanya gangguan distorsi harmonisa. THD pada tegangan bisa dikategorikan aman karena masih dibawah 5% menurut standarisasi tegangan distorsi harmonisa dengan sistem <69 kV.



Gambar 27. THD Current

Pada arus THD (Total Harmonic Distortion) sebesar 8,92% dengan gelombang magnitude peak 1.330 Ampere. Pada grafik terlihat adanya distorsi harmonisa namun sedikit berkurang jika dibandingkan dengan percobaan sebelumnya sehingga gelombang mendekati sinusoidal. THD pada arus bisa dikategorikan aman masih dibawah 15% menurut standarisasi arus distorsi harmonisa dengan sistem 100-1000 Ampere.



Gambar 28. Bode Plot Analisis

Pada analisis menggunakan metode *Impedance Measurement* (Bode Plot Analisis) menggunakan batasan scanning [0:2:15000]. Grafik impedance menunjukkan adanya resonansi karena nilai output lebih besar daripada nilai input. Kita bisa melihat pada grafik impedance di frekuensi=2 nominal impedance sebesar 0,00062677 kemudian pada frekuensi=686 grafik impedance mengalami titik ketinggian puncak menjadi 0,11409 namun setelah itu grafik turun secara drastis menuju titik terbawah pada frekuensi=712 menjadi 0,0049206 kemudian grafik mengalami kenaikan secara drastis pada frekuensi=928 menjadi 0,10328 setelah terjadi penurunan dan kenaikan grafik secara drastis, grafik perlahan turun dan stabil pada frekuensi 15000 dengan nominal impedance menjadi 0,099983.

Grafik Phase dimulai pada frekuensi=2 dengan nominal 42,533° kemudian pada frekuensi=72 grafik phase mengalami titik ketinggian puncak menjadi 87,5746° setelah itu grafik mengalami penurunan titik paling bawah pada frekuensi=710 menjadi -67,0215° kemudian grafik mengalami kenaikan secara drastis pada frekuensi=714 dengan nominal 69,8455° dan setelah itu grafik mengalami

penurunan perlahan dan stabil pada frekuensi=15000 dengan nominal phase menjadi 0,84604°.

Nilai Phase Margin pada analisis ini sebesar 42,533° karena pada saat grafik impedance menyentuh angka 0 apabila ditarik garis lurus kebawah menuju grafik phase maka akan bertemu pada titik 42,533°. Nilai Gain Margin pada analisis ini bernilai tak terhingga, karena pada grafik impedance tidak pernah menyentuh angka 180°. Analisis bode plot pada studi kasus ini resonansi dari sistem masih bisa dikategorikan aman karena grafik phase tidak menyentuh 180°.

III. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan lewat simulasi pada penelitian ini, maka penulis dapat menarik kesimpulan bahwa ketika sistem belum terinjeksi oleh energi terbarukan sudah terdapat resonansi harmonisa. Pada saat setelah terinjeksi oleh wind turbine dengan nilai kapasitor 200kVAR resonansi harmonisa pada sistem semakin membesar akan tetapi setelah penambahan nilai kapasitor menjadi 400kVAR dan 600kVAR, resonansi harmonisa pada sistem semakin menurun. Hal yang sama juga terjadi pada saat setelah terinjeksi oleh PV sistem dengan nilai kapasitor 200kVAR, sistem mengalami resonansi harmonisa namun pada saat setelah terjadi penambahan nilai kapasitor menjadi 400kVAR dan 600kVAR resonansi harmonisa dari sistem semakin menurun.

Penambahan nilai kapasitor juga ikut berpengaruh dalam mengurangi THD Tegangan dan THD Arus. Terbukti karena pada saat menggunakan kapasitor 200kVAR THD pada sistem terlihat tinggi, kemudian setelah penambahan kapasitor menjadi 400kVAR dan 600kVAR nilai THD berkurang seiring dengan penambahan nominal kapasitor tersebut. Pada penelitian ini semakin besar nilai kapasitor maka semakin kecil pula nilai THD pada sistem.

IV. DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. DERMAWAN AND R. L. RAHMAN, "PENGUKURAN ENERGI LISTRIK PADA KWH METER," *J. ELEKTRUM*, VOL. 15, NO. 2, PP. 7–16, 2018.
- [2] F. Arnolfianto, "Aplikasi low pass filter untuk mereduksi harmonisa pada photovoltaic skala kecil," 2019.
- [3] L. Alhafadhi and J. Teh, "Advances in reduction of total harmonic distortion in solar photovoltaic systems: A literature review," *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 4, pp. 2455–2470, 2020, doi: 10.1002/er.5075.
- [4] IEEE, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. 1992.
- [5] A. Harmonisa And P. Sistem, "Microgrid Menggunakan Etap Harmonic Analysis Of Ac-Dc Hybrid Microgrid With," 2017.
- [6] W. Xu, Z. Huang, Y. Cui, And H. Wang, "Harmonic Resonance Mode Analysis," *Ieee Trans. Power Deliv.*, Vol. 20, No. 2I, Pp. 1182–1190, 2005, Doi: 10.1109/TPWRD.2004.834856.
- [7] M. Pielahn, K. Mudunkotuwa, and D. Muthumuni, "Modeling Solar Converters for Harmonic and Resonance Studies," *Int. J. Smart Grid Sustain. Energy Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 10–13, 2019, doi: 10.36040/ijsgset.v1i1.181.
- [8] S. S. Rangarajan, E. R. Collins, and J. C. Fox, "Harmonic resonance repercussions of PV and associated distributed generators on distribution systems," 2017 North Am. Power Symp. NAPS 2017, 2017, doi: 10.1109/NAPS.2017.8107350.
- [9] I. A. Adejumobi, O. I. Adebisi, and J. E. Amatu, "Harmonics mitigation on industrial loads using series and parallel resonant filters," *Niger. J. Technol.*, vol. 36, no. 2, p. 611, 2017, doi: 10.4314/njt.v36i2.37.
- [10] R. K. Antar, A. A. Saleh, and M. A. Ibrahim, "Harmonics Resonance Effect Solution in Industrial Systems using Active Static Compensation Circuit," 2nd Int. Conf. Electr. Commun. Comput. Power Control Eng. ICECCPCE 2019, pp. 153–158, 2019, doi: 10.1109/ICECCPCE46549.2019.203765.
- [11] A. Fouad, M. Elshahed, M. Sayed, and M. Gilany, "Harmonic resonance overvoltage due to main transformer energization in large wind farms, Zafarana, Egypt," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 10, no. 4, pp. 731–743, 2019, doi: 10.1016/j.asej.2019.04.002.
- [12] A. Harumwidiah and A. Kurniawan, "Simulasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Doubly Fed Induction Generator (DFIG) dengan Back-To-Back Converter," *J. Nas. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 2, p. 252, 2016, doi: 10.25077/jnte.v5n2.269.2016.

V. BIODATA PENULIS



Muhammad Iqbal lahir di Malang, 12 Mei 1998 merupakan anak bungsu dari 2 bersaudara pasangan Achmad Suaidi dan Dayati. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di MI KH. Hasyim Asy'ari pada tahun 2004-2010 dilanjutkan dengan pendidikan tingkat menengah di SMPN 16 Malang pada tahun 2010-2013 dan SMKN 8 Malang pada tahun 2013-2016. Penulis memulai pendidikan di Institut Teknologi Nasional Malang pada tahun 2017 dengan mengambil jurusan Teknik Elektro S-1 dan peminatan Energi Listrik, penulis aktif dalam kegiatan Organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITN Malang, Asisten Laboratorium Sistem Simulasi Tenaga Elektrik ITN Malang, dan Forum Komunikasi Himpunan Mahasiswa Elektro Indonesia Wilayah XI.

Email: muhiqfaza12@gmail.com

- [13] T. W. O. Putri, A. Yogiarto, and I. Hajar, "Model Doubly Fed Induction Generator (DFIG) untuk Analisis Performa Kontrol pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin," *Energi & Kelistrikan*, vol. 12, no. 2, pp. 179–185, 2020, doi: 10.33322/energi.v12i2.1095.
- [14] M. A. SNYDER, "Development of Simplified Models of Doubly-Fed Induction Generators," no. xxxx, p. 94, 2012, [Online]. Available: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/166648.pdf>.
- [15] H. Hu, Q. Shi, Z. He, J. He, and S. Gao, "Potential harmonic resonance impacts of PV inverter filters on distribution systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 151–161, 2015, doi: 10.1109/TSTE.2014.2352931.
- [16] S. Pawar, "Harmonic Analysis of High Penetration Pv System on Grid," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 6, no. 6, pp. 401–408, 2019, [Online]. Available: www.ijirae.com.
- [17] H. Setiadi, A. U. Krismanto, and N. Mithulanathan, "Enabling BES in large PV plant for stability enhancement of power systems with high RES," 2017 *IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia Smart Grid Smart Community, ISGT-Asia 2017*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2017.8378383.
- [18] "Harmonic Resonance Assessment in," no. November, pp. 21–24, 2004.
- [19] "Precision point," *Surveyor*, no. 5374, p. 22, 1996.
- [20] Simulator, Tech. "2 Stage 3 Phase Grid connected solar inverter – MATLAB Simulation" Youtube, uploaded by Tech Simulator, 23 Sep. 2020, www.youtube.com/watch?v=Rp-eQi8JEOo&t=968s. Accessed 07 November 2020.