

ELIMINASI HARMONISA PADA *DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR* MENGGUNAKAN FILTER PASIF

Muhammad Farhan¹⁾, Istiyo Winarno²⁾

^{1,2)} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah Surabaya
muhammad.farhan486@yahoo.com¹⁾, istiyo.winarno@hangtuah.ac.id²⁾
Jln. Arief Rachman Hakim No. 150, Kota Surabaya 60111, Jawa Timur

ABSTRAK

Saat ini berbagai cara untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan seperti angin, matahari, pasang surut, hidro, dan lain-lain untuk menggantikan energi fosil menjadi perhatian khusus. Energi angin merupakan yang paling umum digunakan. Karena *Doubly-Fed Induction Generator* (DFIG) mengubah tegangan dari AC ke DC lalu diubah kembali ke AC dengan menggunakan *Rotor Side Converter* (RSC) dan *Grid Side Converter* (GSC) yang mana saat kecepatan berubah secara signifikan akan menyebabkan masalah seperti jatuh tegangan, timbulnya distorsi harmonik, tegangan tidak stabil, dan lain-lain. Dengan menggunakan filter pasif dapat mengurangi harmonisa sekecil mungkin hingga bentuk gelombangnya semakin mendekati sinusoidal. Pada penelitian ini untuk mengurangi harmonisa yang timbul pada sistem DFIG menggunakan filter pasif jenis *passive single tuned* (LC). Menunjukkan kondisi I_{THD} lebih baik setelah menggunakan filter pasif tipe *single tuned*. Analisa besar *total harmonic distortion* (THD) dilakukan dengan 5 skema penggunaan kecepatan angin yang berbeda-beda dengan rata-rata THD pada 5 kecepatan angin yang meningkat saat sebelum menggunakan filter pasif tipe *single tuned* 15.35% THDi, dan sesudah menggunakan filter pasif tipe *single tuned* 1.40% THDi. Besar rata-rata total eliminasi menghasilkan 11.63%.

Kata kunci: Filter Pasif, *Single Tuned*, *Doubly-Fed Induction Generator* (DFIG), *Total Harmonic Distortion* (THD)

ABSTRACT

Currently, various ways to utilize renewable energy sources such as wind, solar, tidal, hydro, and others to replace fossil energy are of particular concern. Wind energy is the most commonly used. Because the Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) converts the voltage from AC to DC and then converts it back to AC using a Rotor Side Converter (RSC) and a Grid Side Converter (GSC) which when the speed changes significantly it will cause problems such as voltage drops, the emergence of harmonic distortion, unstable voltage, etc. By using a passive filter, you can reduce the harmonics as small as possible until the waveform is closer to sinusoidal. In this study, to reduce the harmonics that arise in the DFIG system, a single tuned filter (LC) passive filter is used. Shows better conditions after using a single tuned passive filter. Analysis of the total harmonic distortion (THD) was carried out with 5 schemes using different wind speeds with an average THD at 5 increasing wind speeds before using a single tuned passive filter of 15.35% THDi, and after using a single tuned passive filter. 1.40% THDi. The average size of the total eliminations resulted in 11.63%.

Keywords: Passive Filter, Single Tuned, Doubly-Fed Induction Generator (DFIG), Total Harmonic Distortion (THD)

1. PENDAHULUAN

Saat ini berbagai cara untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan seperti angin, matahari, pasang surut, hidro, dan lain-lain untuk menggantikan energi fosil menjadi perhatian khusus [1]. Energi angin merupakan yang paling umum digunakan dan lebih berpotensi dari energi terbarukan yang lainnya karena tersedia dalam jumlah yang melimpah, tidak ada habisnya, tersedia di alam, tidak menimbulkan polusi dan didistribusikan secara luas. *Doubly-Fed Induction Generator* (DFIG) adalah salah satu mesin induksi yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan energi listrik pada sistem konversi energi angin. Terdapat beberapa kelebihan dalam menggunakan *Doubly-Fed Induction Generator* (DFIG) seperti biaya konverter yang rendah, mengurangi rugi-rugi *switching*, dan meningkatkan efisiensi.

Penggunaan dua buah perangkat konverter yang dikenal dengan konverter frekuensi membuat DFIG lebih efisien dan itulah mengapa mesin induksi jenis ini digunakan pada sistem konversi energi angin. Namun, terlepas dari efisiennya mesin induksi ini, masih terdapat masalah yang ditimbulkan. Masalah utamanya adalah perubahan kecepatan. Hal ini terjadi karena DFIG mengkonversi tegangan AC / DC / AC dengan menggunakan dua buah perangkat konverter yang dikenal dengan *Rotor Side Converter* (RSC) dan *Grid Side Converter* (GSC). Perubahan kecepatan yang signifikan menyebabkan masalah seperti jatuh tegangan, timbulnya distorsi harmonik, tegangan tidak stabil, dan lain-lain. Pada sistem konversi energi angin, konverter frekuensi sangat membantu dalam mengoptimalkan penyaluran energi listrik meskipun terdapat beberapa kekurangan. Pada penelitian yang dilakukan oleh [2] dijelaskan bahwa pada DFIG, konverter frekuensi adalah salah satu sumber utama yang menyebabkan timbulnya harmonisa pada *grid*.

Untuk mengurangi besarnya distorsi harmonik pada DFIG maka digunakanlah filter pasif, yang mana dengan penambahan filter

pasif pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber-sumber harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa keseluruhan jaringan

dapat di eliminasi sekecil mungkin sehingga bentuk gelombangnya semakin mendekati sinusoidal. Maka dari itu pada penelitian ini menggunakan filter pasif jenis *single tuned filter* (LC) untuk mengurangi harmonisa yang timbul pada sistem DFIG, sehingga dihasilkan bahwa besar THD pada DFIG akibat konverter frekuensi dengan menggunakan filter *passive single tuned* sebagai pemilah sinyal listrik berdasarkan pada frekuensi dari sinyal tersebut berhasil di eliminasi dan sesuai dengan standar yang ditetapkan IEEE 519-2014.

2. DASAR TEORI

1.1. Doubly-Fed Induction Generator

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat digunakan untuk menghasilkan listrik. Meskipun tingkat energi yang dihasilkan bervariasi dengan kecepatan angin, energi angin hampir selalu tersedia. Untuk mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi listrik, diperlukan turbin angin untuk mengubah energi angin menjadi energi mekanik, yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Total daya yang ditangkap oleh turbin angin merupakan fungsi dari kecepatan angin dan luas bilah turbin.

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V_w^3 \quad (1)$$

dengan:

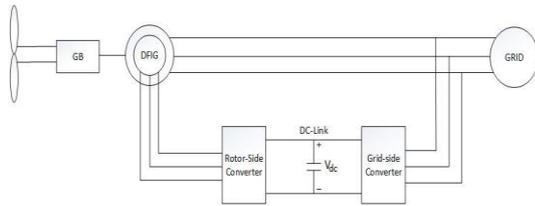
P_{wt} = Daya input turbin angin, berupa daya mekanik (Watt)

R = Diameter turbin (m)

ρ = Kerapatan udara

(Kg/m²) V_w = Kecepatan udara

(m/s)



Gambar 2.1 Topologi Pembangkit Tenaga Angin

DFIG terdiri dari motor induksi yang digunakan sebagai generator untuk menghasilkan energi listrik dengan mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin dengan daya pengenal yang lebih tinggi. Struktur DFIG terdiri dari mesin induksi rotor belitan yang beroperasi sebagai generator. Tujuan penggunaan motor induksi rotor yang berkelok-kelok karena pada DFIG bagian rotor dari motor induksi terhubung ke konverter, sehingga pengaturan daya dapat dilakukan dari bagian rotor tersebut.

Tabel 2 Nilai Dasar Pada Motor

Nilai-Nilai Dasar	
Tegangan	$V_b = V_n$
Daya	$S_b = S_n$
Arus	$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} v_b}$
Impedansi	$Z_b = \frac{V_b^2}{S_n}$
Kecepatan	$\omega_b = 2\pi f_n$
Torsi	$T_b = \frac{S_b}{\omega_b / p}$
Fluks	$\psi_b = \frac{V_b}{\omega_b}$
Torsi	$T_b = \frac{S_b}{\omega_b^3 / p}$

1.2. Energi Listrik

Energi merupakan kemampuan untuk melakukan kerja [3], energi merupakan kerja tersimpan. Pengertian ini tidaklah jauh beda dengan ilmu fisika yaitu sebagai kemampuan melakukan usaha. Hukum kekekalan energi

menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat pula dimusnahkan. Energi hanya dapat diubah dari suatu bentuk ke bentuk energi yang lain.

Demikianlah pula energi listrik yang merupakan hasil perubahan energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik. Keberadaan energi listrik ini dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin. Adapun kegunaan energi listrik dalam kehidupan sehari-hari merupakan penerangan, pemanas, motor-motor listrik dan lain-lain. Energi yang digunakan alat listrik merupakan laju penggunaan energi (daya) dikalikan dengan waktu selama alat tersebut digunakan. Bila daya diukur dalam watt jam, maka:

$$W = P \times t \quad (4)$$

Dengan:

P = daya dalam watt

t = Waktu dalam jam

W = Energi dalam watt jam

Watt jam (wattt hour = Wh) merupakan energi yang dikeluarkan jika 1 watt digunakan selama 1 jam.

1.3. Akibat Yang Ditimbulkan Harmonik

Pengaruh harmonik pada peralatan tenaga listrik secara umum terbagi

menjadi tiga, yaitu:

1. Nilai rms baik tegangan maupun arus meningkat.
2. Nilai puncak (*peak value*) tegangan dan arus meningkat.
3. Frekuensi sistem menurun.

Masing-masing elemen membangkitkan distorsi yang spesifik. Nilai rms lebih besar dapat menyebabkan pemanasan lebih dan nilai puncak lebih besar yang dapat membuat alat ukur terganggu kinerjanya sehingga memberikan indikasi yang salah. Frekuensi mempengaruhi impedansi kabel dan dengan

frekuensi 400 Hz atau lebih maka akan sulit untuk mengatasi jatuh tegangan. Fenomena resonansi dapat terjadi pada frekuensi tertentu dan dapat menyebabkan arus meningkat.

Secara khusus efek yang ditimbulkan harmonik pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi:

- a. Efek negatif jangka pendek
 1. Tegangan harmonik dapat mengganggu pengendalian yang digunakan pada sistem elektronik.
 2. Harmonik dapat menyebabkan kesalahan pada peralatan pengukuran listrik yang menggunakan prinsip induksi magnetik.

Efek yang bersifat kontinu dan yang dapat mengakibatkan pemanasan.

1. Pemanasan kapasitor

Kapasitor sensitif terhadap perubahan beban maka ketika terjadi harmonik akan menyebabkan rugi-rugi meningkat. Ketika terjadi harmonik, beban semakin reaktif sehingga kapasitor harus mencatu lebih banyak daya reaktif kepada sistem.

2. Pemanasan pada mesin-mesin listrik

Akibat harmonik pada mesin adalah bertambahnya rugi-rugi pada mesin. Hal ini diakibatkan oleh meningkatnya rugi-rugi pada stator dan perbedaan kecepatan yang diakibatkan oleh medan yang dihasilkan oleh harmonik dengan rotor. Arus harmonik juga menimbulkan panas lebih dan apabila mesin terus-menerus dioperasikan pada kondisi ini akan mengurangi umur dan merusak mesin.

3. Transformator

Transformator distribusi yang mencatu daya beban non linear akan menimbulkan arus harmonik kelipatan tiga ganjil. Harmonik ini akan menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fasa. Akibatnya terjadi peningkatan temperatur pada kawat netral. Dampak lanjutannya, akan terjadi sirkulasi

arus urutan nol pada belitan delta sehingga temperatur meningkat. Hal ini akan mengakibatkan penurunan efisiensi transformator dan dapat mengakibatkan kerusakan. Rugi-rugi yang terjadi pada transformator adalah rugi-rugi inti dan rugi-rugi belitan. Rugi-rugi inti karena fluks yang dibangkitkan di dalam inti bila transformator dieksitasi. Rugi-rugi belitan yang terdiri dari I^2R dan *stray losses* dibangkitkan oleh arus yang mengalir melalui transformator. Akibat dari harmonik lain ialah interferensi frekuensi pada sistem telekomunikasi karena biasanya sistem komunikasi letaknya berdekatan dengan sistem tenaga listrik. Sistem pengamanan seperti *relay* dapat berkurang kemampuannya untuk merasakan gangguan ketika terjadi harmonik karena sifat *relay* itu sendiri yang sensitif terhadap perubahan frekuensi dan arus.

1.4. Harmonik

Harmonik merupakan bentuk tegangan ataupun arus sinusoidal yang memiliki kelipatan frekuensi dari bilangan bulat frekuensi fundamentalnya 50Hz, 60Hz. Harmonik merupakan jenis gangguan yang ada pada sistem kelistrikan akibat karakteristik beban non-linier yang mengakibatkan harmonik pada tegangan dan arus [4].

Besar harmonik diukur dalam besaran THD dalam persen (%). THD merupakan akar kuadrat rata-rata (rms) dari harmonik fundamentalnya, dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \quad (5)$$

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (6)$$

Dimana V_n merupakan tegangan *Root Mean Square* (RMS) frekuensi tunggal pada orde harmonik ke-n, N merupakan orde harmonik maksimum yang di ukur, dan V_1 tegangan rms dari frekuensi fundamental.

1.5.Orde Harmonik

Orde dari harmonik merupakan perbandingan frekuensi harmonik dengan frekuensi dasar [5], dimana:

$$n = \frac{f_n}{F} \quad (7)$$

Keterangan: n = orde harmonik
 f_n = frekuensi harmonik ke-n
 F = frekuensi dasar

Sesuai dengan definisi di atas maka orde harmonik frekuensi dasar F adalah 1. Artinya orde ke-1 bukan harmonik melainkan orde ke-2 sampai orde ke n .

a. Reduksi Harmonik

Salah satu upaya untuk mereduksi harmonik yang muncul, adalah dengan menggunakan *filter*. Ada dua jenis *filter* yang dapat digunakan, yaitu filter aktif dan filter pasif. Namun jika dilihat dari tinjauan ekonomi, filter pasif relatif lebih murah jika dibandingkan dengan filter aktif [6]. Filter pasif yang digunakan untuk mereduksi kandungan harmonik pada sistem terdiri dari kombinasi komponen R , L , dan C .

Secara garis besar filter pasif dapat dipasang pada sistem secara seri dan paralel. Pada umumnya paling banyak digunakan adalah model single tuned filter karena lebih ekonomis dan dipasang secara paralel dengan sistem, dengan demikian arus harmonik dialihkan melalui filter tersebut. Menurut [7], keuntungan menggunakan filter yang dipasang secara paralel antara lain adalah:

1. Menggunakan impedansi yang rendah untuk pengaturan frekuensi.
2. Sebagai pertimbangan hanyalah arus harmonik dan tidak memikul arus beban penuh karena hanya memikul tegangan fasa.
3. Meningkatkan faktor daya.

Sedangkan konfigurasi filter yang dipasang secara seri pada sistem paling sering

digunakan untuk satu fasa dengan tujuan mengurangi harmonik ke 3, untuk komponen harmonik yang lain juga bisa digunakan tergantung dengan pengaturannya. Menurut [7] juga, keuntungan menggunakan filter seri diantaranya adalah:

1. Menggunakan impedansi yang tinggi untuk memblok arus harmonik masuk ke sistem.
2. Tidak mendatangkan harmonik dari sumber yang lain.
3. Meningkatkan faktor daya.

1.6. Efek Harmonik

Pada suatu sistem tenaga listrik, efek yang ditimbulkan oleh harmonik antara lain :

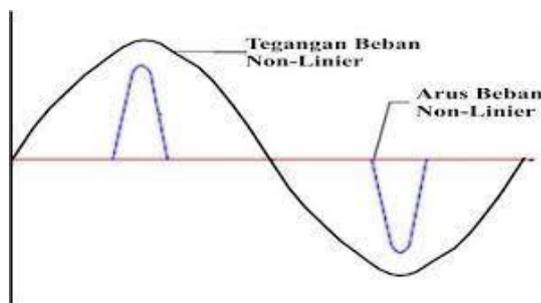
1. Perubahan bentuk gelombang tegangan dan arus
Pada saat tidak ada harmonik, gelombang tegangan dan arus berbentuk sinusoidal murni. Setelah adanya harmonik, bentuk gelombang tersebut akan terdistorsi.
2. Rugi-rugi panas pada kawat netral dan transformator
Harmonik yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik menyebabkan kenaikan arus sehingga rugi-rugi panas meningkat.
3. Tambahan torsi pada kWh meter jenis elektromekanis
Kwh meter jenis ini menggunakan piringan induksi berputar. Putaran piringan akan lebih cepat atau terjadi kesalahan ukur kWh meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar,
4. Interferensi frekuensi pada sistem telekomunikasi Kabel untuk keperluan telekomunikasi ditempatkan berdekatan dengan kawat netral. Harmonik pada kawat netral dapat memberikan induksi harmonik yang mengganggu sistem telekomunikasi.
5. Pengurangan kapasitas sistem

Harmonik yang akan menimbulkan panas berlebih pada saluran akan membuat transformator dan peralatan distribusi lainnya tidak dapat menanggung beroperasi pada beban penuh.

6. Kegagalan fungsi kerja rele proteksi Rele proteksi dapat bekerja dibawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenal. Rele yang dapat terhindar dari gangguan harmonik pada umumnya adalah rele yang mempunyai respon terhadap arus rms sebenarnya (true-rms current) atau kenaikan temperatur karena arus lebih.

1.7. Perhitungan Gangguan

Distorsi harmonik disebabkan oleh peralatan yang memiliki beban non linear pada sistem tenaga listrik. Peralatan yang memiliki beban non linear merupakan kondisi dimana arus tidak proporsional dengan gelombang tegangannya. Pada Gambar 2.2 mengilustrasikan konsep distorsi harmonik dimana apabila suatu rangkaian yang memiliki resistor non linear diberikan tegangan sinusoidal sempurna, maka arus resultannya akan terdistorsi. Meningkatkan tegangan beberapa persen akan meningkatkan arus dua kali lipat dan menghasilkan gelombang yang berbeda. Ini merupakan sumber dari distorsi harmonik pada sistem tenaga listrik secara umum [5].



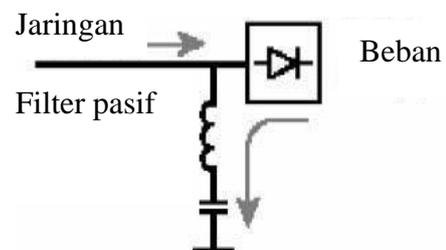
Gambar 2.4 Distorsi arus akibat beban non linear [5].

a. Filter Harmonisa

Tujuan utama dari filter harmonisa adalah untuk mengurangi amplitudo satu frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus. Dengan penambahan filter harmonisa pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber-sumber harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa keseluruhan jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu filter harmonisa pada frekuensi fundamental dapat mengkompensasi daya reaktif dan dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem [8].

b. Filter Pasif

Penggunaan filter pasif merupakan metode penyelesaian yang efektif dan ekonomis untuk masalah harmonisa. Filter pasif sebagian besar didesain untuk memberikan bagian khusus untuk mengalihkan arus harmonisa yang tidak diinginkan dalam sistem tenaga. Filter pasif banyak digunakan untuk mengkompensasi kerugian daya reaktif akibat adanya harmonisa pada sistem tenaga. Rangkaian filter pasif terdiri dari komponen R, L, dan C. Komponen utama yang terdapat pada filter pasif adalah kapasitor dan induktor. Kapasitor dihubungkan seri untuk memperoleh rating tegangan dan KVAR yang diinginkan. Sedangkan induktor digunakan dalam rangkaian filter dirancang mampu menahan selubung frekuensi tinggi yaitu efek kulit (*skin effect*) [9].

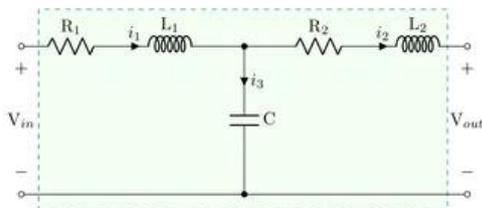


Gambar 2.5 Filter Pasif

1.8. Filter LCL

Filter LCL dapat mereduksi harmonisa arus karena arus harmonisa akan mengalir pada reaktansi yang lebih rendah. Dengan pemasangan C, arus dengan frekuensi tinggi akan mengalir melalui kapasitor karena kapasitor memiliki impedansi yang rendah pada frekuensi tinggi. Agar tegangan beban bebas harmonisa, dipasang filter C yang paralel dengan beban. Dengan menggunakan filter C ini semua riak arus dengan frekuensi tinggi akan mengalir melewati kapasitor bukan ke beban. Filter L biasanya dipasang secara seri terhadap beban. Dengan menggunakan filter L, arus yang mengalir melalui L akan sulit berubah berbanding lurus dengan besarnya L.

Pada Gambar 2.4 tampak bahwa sebuah filter LCL terbuat dari resistor (R_f) dan induktor (L_f) pada sisi beban, resistor (R) dan induktor (L) pada sisi jaringan, dan kapasitor C_f (teredam dengan resistor R_d).



Gambar 2.6 Filter LCL

1.9. Langkah – langkah menghitung filter pasif single tuned.

Perencanaan desain filter pasif:

1. Menentukan kebutuhan kapasitor sebagai perbaikan faktor daya, dengan memasukkan nilai dari pengukuran. Di asumsikan bahwa faktor daya di perbaiki menjadi 0,95. Untuk menghitung kapasitas kapasitor (Q_c) yang di butuhkan di hitung menggunakan persamaan berikut : $Q_c = (\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$

2. Dalam proses identifikasi sebelumnya telah di tentukan nilai orde harmonik yang akan di filter yaitu pada orde 3 dan penyetulan di turunkan sedikit dibawahnya, hal ini dilakukan sebagai toleransi komponen filter untuk mencegah resonansi yang terjadi pada sistem, sehingga diketahui sebagai berikut : $3 - (5\% \times 3) = 2,85$

3. Perhitungan nilai kapasitor (C) :

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c} \quad (8)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot X_c} \quad (9)$$

Dengan :

Q_c = besarnya kompensasi daya reaktif yang diperlukan

V = tegangan sistem yang di gunakan (220v)

f = frekuensi fundamental (60Hz)

4. Menentukan nilai induktor yang dicari berdasarkan prinsip resonansi pada orde tuningnya.

$$X_l = \frac{X_c}{n^2} \quad (10)$$

$$L = \frac{X_l}{2\pi f} \quad (11)$$

Dengan n = orde harmonik yang di tuning

5. Menghitung nilai resistansi (R) untuk faktor kualitas yang di perlukan (Q) nilai Q yaitu 50.

$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (12)$$

$$X_n = \sqrt{X_l X_c} \quad (13)$$

Dengan X_n = Karakteristik Reaktansi

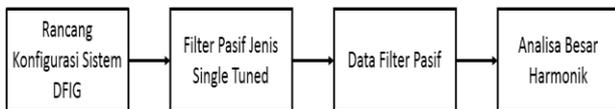
Sebelum membahas lebih lanjut, maka perlu diketahui terlebih dahulu beberapa istilah yang penting mengenai harmonik.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi nilai *total harmonic distortion*

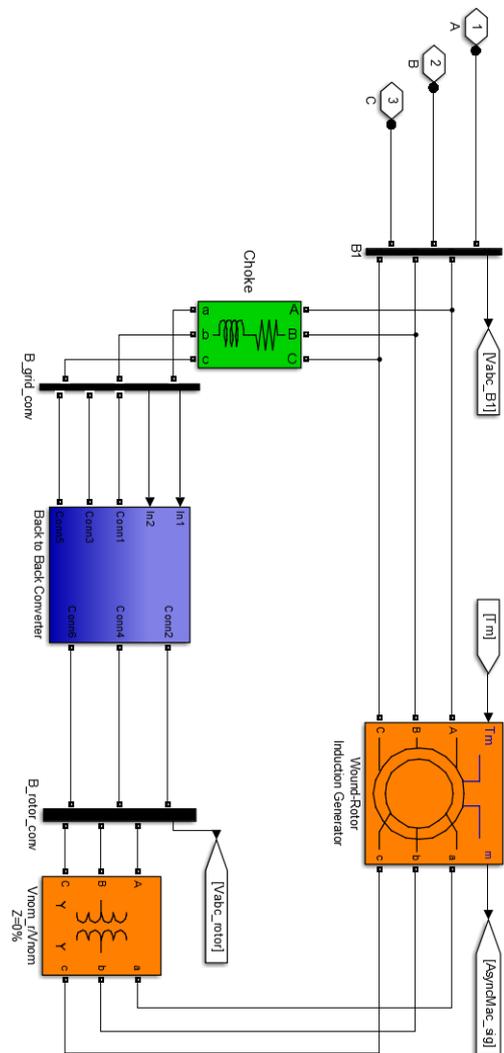
(THD) pada DFIG akibat penggunaan konverter frekuensi. Dengan menggunakan filter pasif jenis *passive single tuned* (LCL) sebagai pemilah sinyal listrik berdasarkan pada frekuensi dari sinyal tersebut. Pada tahapan-tahapan dalam proses penelitian ini difungsikan sebagai pedoman dalam mengambil data-data parameter yang diperlukan. Adapun tahapan dan proses penelitian seperti pada Gambar 3.1 sebagai berikut:

1. Merancang konfigurasi sistem DFIG pada Simulink di *software* Matlab R2013a.
2. Filter yang digunakan jenis *single tuned filter*.
3. Memasukan data filter pasif pada DFIG, seperti tegangan, frekuensi, daya, dan power faktor.
4. Analisa besar spektrum harmonik dan besar nilai THD yang ada pada DFIG.



Gambar 3.1 Diagram blok proses penelitian

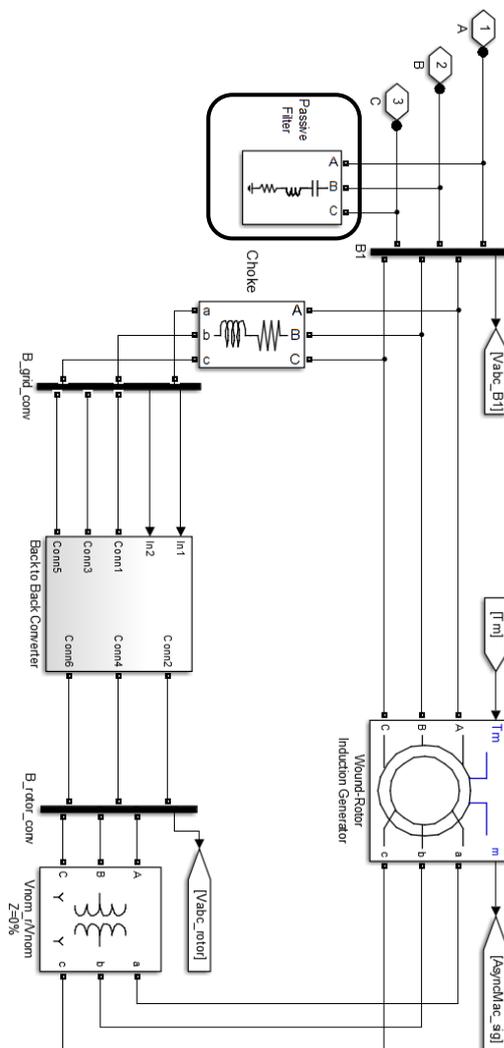
Pada penelitian ini menggunakan blok diagram pemodelan Double Fed Induction Generator yang di tunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Blok diagram sistem

Konstruksi sistem DFIG terdiri dari turbin angin, mesin induksi, dan *back to back converter*. DFIG (*Double Fed Induction Generator*) terdiri dari rotor 3 phase dan stator 3 phase. Rotor mengumpan sinyal AC 3 phase untuk menginduksi arus AC pada belitan rotor, saat turbin angin berputar rotor akan ikut berputar sehingga menghasilkan medan magnet. Ketika kecepatan rotor sebanding dengan sinyal frekuensi AC menyebabkan induksi arus AC pada stator, fluks yang dihasilkan pada medan magnet akan mempercepat rotasi rotor, serta frekuensi AC yang dihasilkan akan sesuai. Dalam mengkonversi suatu energi kinetik menjadi energi listrik dapat menggunakan turbin angin yang dapat dikonversikan melalui

generator. Selain itu, pada DFIG membutuhkan konverter untuk menstabilkan tegangan pada keluarannya. *Back to back converter* akan digunakan pada sistem DFIG ini. *Back to back converter* tersebut terpisah menjadi dua yaitu konverter pada sisi bagian jaringan (*grid-side converter*) dan konverter pada sisi bagian rotor (*rotor-side converter*). Penelitian ini akan fokus pada *grid side control* yang dimana *grid side control* adalah konverter yang dimana tersambung di sisi bagian jaringan. Fungsi konverter disini untuk menjaga nilai suatu tegangan DC tetap konstan dan bisa menyuplai tegangan pada sisi grid.



Gambar 3.3 Rangkaian filter pasif jenis *single tuned filter* pada Simulink

3.1. Perhitungan Desain Filter Pasif Single Tuned (LC)

Filter pasif *Single Tuned (LC)* yang mana hanya mengeliminasi satu orde *harmonic* saja. Selain dapat mereduksi harmonisa filter pasif jenis *single tuned filter* dapat juga untuk memperbaiki faktor daya karena adanya kapasitor. Filter *passive single tuned* yaitu filter yang terdiri dari dari 2 komponen yaitu induktor dan kapasitor yang disusun secara seri dan di tempatkan paralel pada beban. Parameter-parameter yang digunakan dalam mendesain filter *passive single tuned* adalah :

1. Nilai daya aktif (P) : 1,5 MW
2. Nilai daya semu (S) : 1,66 MVA
3. Nilai Tegangan nominal (V): 575V
4. Faktor daya awal : 0,90
5. Faktor daya yang diinginkan : 0,95

3.2. Desain Filter Pasif Single Tuned (LC)

1. Langkah awal adalah menentukan nilai faktor daya (PF)
 Dari pengukuran faktor daya awal yang di dapat adalah sebesar 0,90 , dan faktor daya akhir adalah 0,95

$$\text{Faktor Daya Awal} : 0,90 = 25,84^\circ$$

$$\text{Faktor Daya Akhir} : 0,95 = 18,19^\circ$$

2. Langkah kedua adalah menentukan daya reaktif.

$$QC = 1,5 (\tan\phi_{awal} - \tan\phi_{akhir})$$

$$= 1,5 (0,48 - 0,33)$$

$$= 1500000 (0,15)$$

$$= 225.000 \text{ VAR}$$

$$= 225 \text{ kVAR}$$

3. Langkah ketiga adalah menentukan frekuensi yang akan dituning, untuk faktor keamanan filter di tuning 5% dibawah orde

aslinya , pada skripsi ini orde ke 3 yang akan di reduksi = $3 - (5\% \times 3) = 2,85$

4. Langkah keempat menentukan nilai kapasitor

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c} = \frac{575^2}{225} = 1,4 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 1,47} = 224,9 \text{ uf}$$

5. Langkah kelima adalah menentukan nilai induktor

$$X_L = \frac{X_c}{N^2} = \frac{1,47}{2,85^2} = 0,174 \text{ ohm}$$

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f} = \frac{0,160}{2 \cdot 3,14 \cdot 60} = 0,56 \text{ mh}$$

Didapat nilai nilai perhitungan komponen untuk perancangan filter pasif pada Tabel 2 berikut :

Tabel 3 Hasil Perhitungan Filter Pasif Sigle Tuned

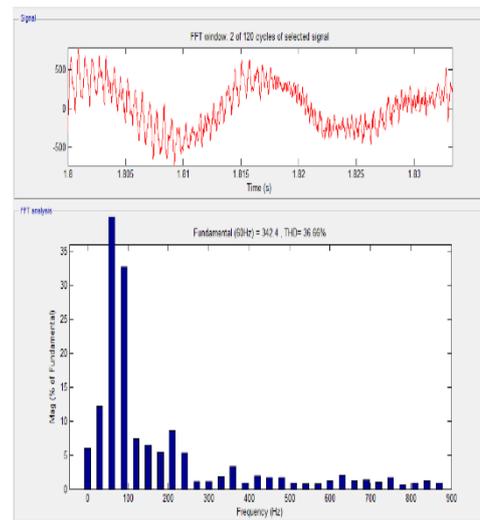
Spesifikasi	Nilai
L	0,56 mH
X_L	1,74
C	224,9 uF
X_C	1,4
QVAR	225 kVAR
Rating Tegangan	0,575 KV

4. SIMULASI DAN ANALISA

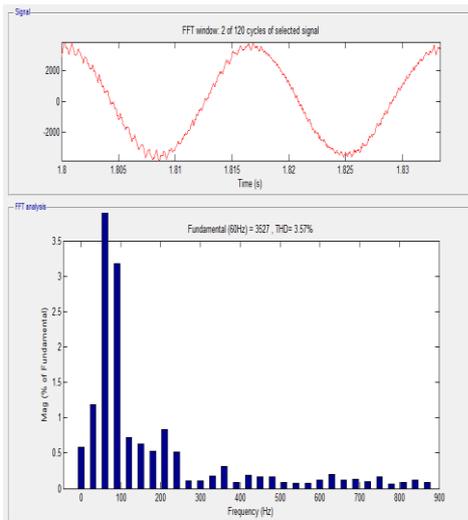
Setelah dilakukan pembuatan rangkaian mulai dari sistem DFIG sampai dengan desain filter pasif, kemudian dilakukan simulasi untuk mendapatkan hasil besar THD pada sistem DFIG. Analisa dilakukan dengan lima skema penggunaan kecepatan angin yang berbeda-beda. Kecepatan angin pada kondisi awal adalah 3,8 m/s, kemudian meningkat menjadi 7,7 m/s, kemudian meningkat lagi menjadi 7,8 m/s, lalu meningkat lagi menjadi 8,1 m/s, hingga mencapai pada kecepatan maksimum yaitu 8,2 m/s.

4.1. Kecepatan Angin 3,8 m/s

Nilai THD didapatkan dari *FFT Analysis Powergui* pada *scope* yang terhubung pada titik PCC *grid* sebelum menggunakan filter pasif. Pada gambar 4.1 menunjukkan gelombang arus sebelum penambahan filter, sumbu vertikal menunjukkan nilai arus dalam satuan ampere dan sumbu horizontal menunjukkan orde waktu simulasi dalam detik. Sedangkan pada kolom diagram blok sumbu vertikal menunjukkan nilai *total harmonic distorsi* terhadap frekuensi pada sumbu horizontal Sedangkan gambar 4.2 dapat diamati bahwa sumbu vertikal menunjukkan nilai arus dalam satuan ampere dan sumbu horizontal menunjukkan orde waktu simulasi dalam detik.



Gambar 4.1 THDi pada titik PCC grid tanpa filter pasif



Gambar 4.2 THDi pada titik PCC grid dengan filter pasif

Tabel 4.1 Besar THD pada titik PCC grid DFIG (Skema 1)

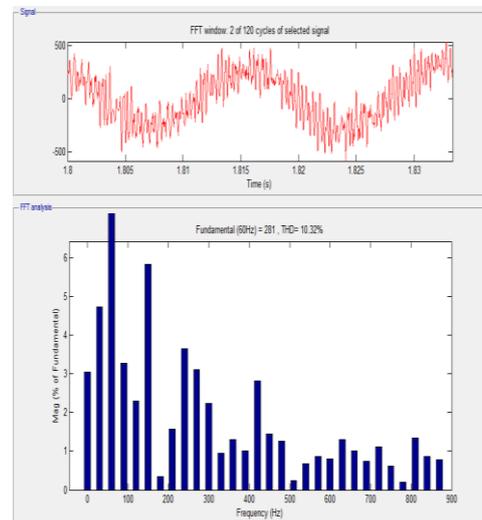
Kecepatan Angin	THD arus dalam persen (%)		
	Tanpa Filter	Dengan Filter	Total Eliminasi
3,8 m/s	36.66%	3.57%	33.09%

Dari hasil analisa besar THD pada titik grid terlihat hasil THDi saat sebelum menggunakan filter pasif lebih rendah, namun besar nilai arus pada Grid sesudah menggunakan filter pasif lebih baik 3527 amper daripada sebelum menggunakan filter pasif dengan arus 342.4 ampeer, hal ini menunjukkan setelah menggunakan filter pasif mendapatkan hasil yang lebih baik sebesar 3.57%.

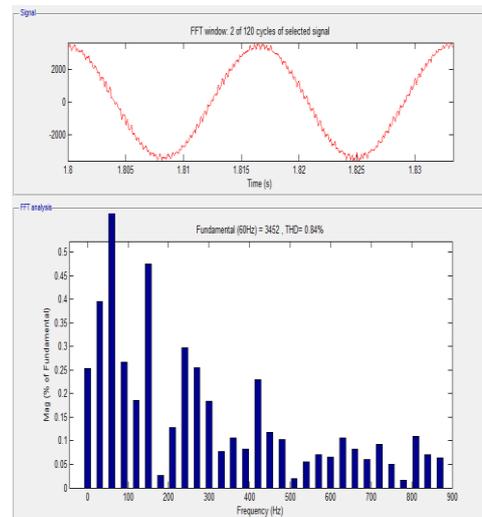
4.2. Kecepatan Angin 7,7 m/s

Pada skema 2 ini merupakan hasil running *spectrum* harmonisa dan bentuk gelombang dari THD arus pada DFIG dapat dilihat pada Gambar 4.3 bahwa terjadinya cacat terhadap bentuk gelombang arus yang diakibatkan penggunaan konverter frekuensi pada generator tersebut. Simulasi setelah dipasang filter pada titik PCC grid secara

keseluruhan memperlihatkan bahwa terjadi penurunan arus harmonik. Pada Gambar 4.8 memperlihatkan spektrum harmonik arus pada titik PCC grid.



Gambar 4.3 THDi pada titik PCC grid tanpa filter pasif



Gambar 4.4 THDi pada titik PCC grid dengan filter pasif

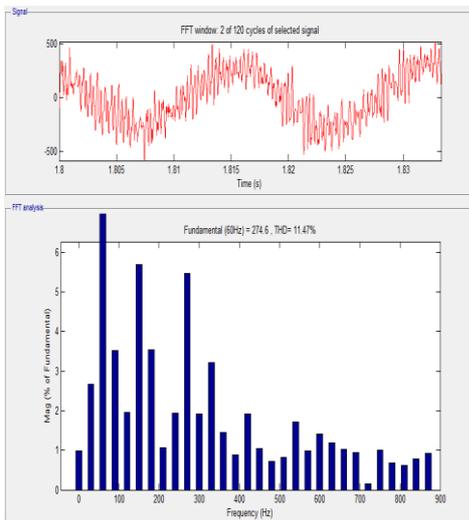
Tabel 4.2 Besar THD pada titik PCC grid DFIG (Skema 2)

Kecepatan Angin	THD arus dalam persen (%)		
	Tanpa Filter	Dengan Filter	Total Eliminasi
7,7 m/s	10.32%	0.84%	9.48%

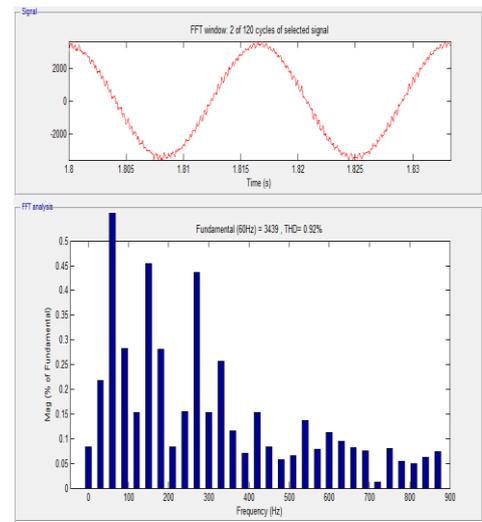
Pemasangan Filter bertujuan untuk mengurangi atau meredam komponen harmonik pada orde ke-3 ke atas. Berdasarkan hasil simulasi setelah dipasang filter pada titik PCC grid secara keseluruhan memperlihatkan bahwa terjadi penurunan arus harmonik.

4.3. Kecepatan Angin 7,8 m/s

Penggunaan konverter frekuensi pada DFIG menyebabkan nilai distorsi harmonik berada di atas *standard*. Terlihat gelombang arus pada titik PCC grid masih cukup tinggi belum menyerupai sinusoidal murni dan muncul ripple yang menandakan terjadi harmonik. Maka bentuk gelombang sinusoidal mengalami cacat gelombang atau terdistorsi, pada Gambar 4.5 spektrum frekuensi terdapat harmonik, dan mengalami kenaikan nilai THD_1 yang cukup besar yaitu 11.47%. Setelah dilakukan pemasangan *single tuned filter* pada titik PCC grid didapati bahwa nilai distorsi harmonik mengalami penurunan nilai THD_1 sebesar 10.55% yaitu dari 11.47% turun menjadi 0.92%, dan sudah memenuhi *standard* seperti pada Gambar 4.6.



Gambar 4.5 THDi pada titik PCC grid tanpa filter pasif



Gambar 4.6 THDi pada titik PCC grid dengan filter pasif

Tabel 4.3 Besar THD pada titik PCC grid DFIG (Skema 3)

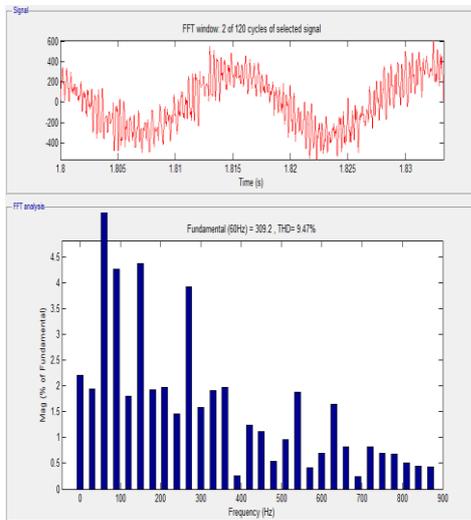
Kecepatan Angin	THD arus dalam persen (%)		
	Tanpa Filter	Dengan Filter	Total Eliminasi
7,8 m/s	11.47%	0.92%	10.55%

Setelah dilakukan pemasangan *single tuned filter* pada titik PCC grid didapati bahwa nilai distorsi harmonik mengalami penurunan dan sudah memenuhi *standard*. Tabel 4.7 menunjukkan data harmonik arus mengalami penurunan nilai THD_1 sebesar 10.55% yaitu dari 11.47% turun menjadi 0.92%. Nilai THD yang cukup tinggi ini dapat menyebabkan efek-efek negatif seperti pemanasan, *losses*, operasi peralatan yang tidak *reliable*, *netral overloading*, penurunan umur dari peralatan dan lain-lain. Untuk mencegah efek-efek negatif tersebut, maka perlu digunakan filter pasif untuk mengeliminasi harmonik arus tersebut.

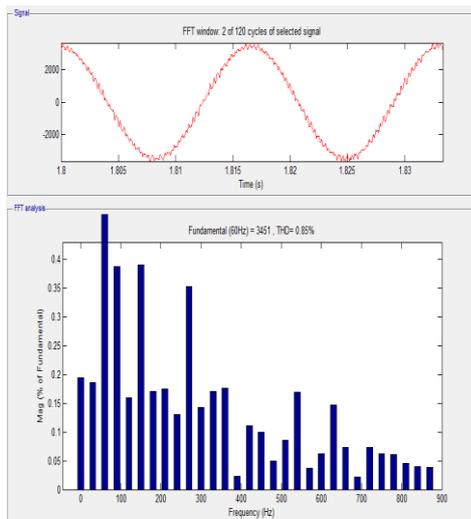
4.4. Kecepatan Angin 8,1 m/s

Berikut adalah spektrum dan gelombang arus harmonik pada saat distorsi arus mencapai nilai maksimum, yaitu 9.47 % pada kecepatan

angin 8,1 m/s dan sesudah menggunakan filter pasif THDi sebesar 0.85%.



Gambar 4.7 THDi pada titik PCC grid tanpa filter pasif



Gambar 4.8 THDi pada titik PCC grid dengan filter pasif

Tabel 4.4 Besar THD pada titik PCC grid DFIG (Skema 4)

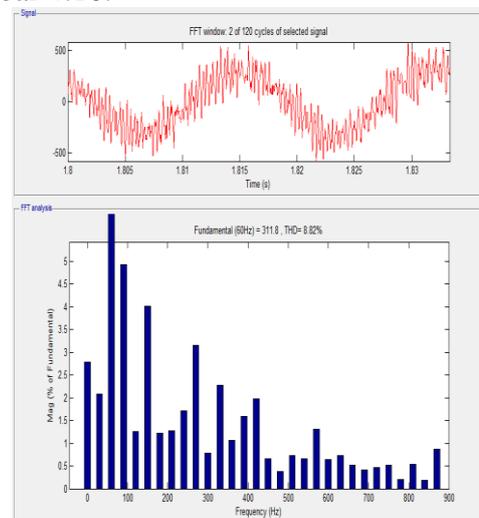
Kecepatan Angin	THD arus dalam persen (%)		
	Tanpa Filter	Dengan Filter	Total Eliminasi
8,1 m/s	9.47%	0.85%	8.62%

Spektrum harmonik arus memperlihatkan harmonik yang cukup besar terjadi pada saat

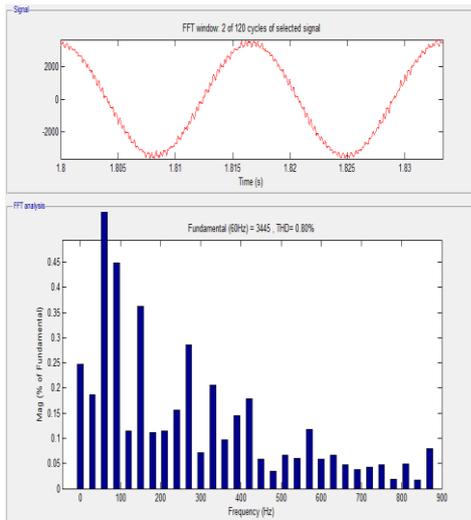
sebelum dipasang filter. Ini menandakan distorsi harmonik masih mendominasi pada titik PCC grid. Besar harmonik arus pada Gambar 4.7 telah melewati standar IEEE 519 2014 seperti yang terdapat pada landasan teori. Besar THDi titik PCC grid adalah 9.47%. Dimana untuk harmonik arusnya berada diatas batas toleransi ($\leq 5\%$). Dengan kondisi tersebut, maka diperlukan filter pasif untuk meeliminasi harmonik arus pada titik PCC grid.

4.5. Kecepatan Angin 8,2 m/s

Pada kondisi kecepatan angin 8,2 m/s, akan diperlihatkan perbandingan gelombang arus hasil simulasi sebelum dan setelah pemasangan filter pasif tipe *single tuned*. Perbandingan gelombang tegangan sebelum dan sesudah dipasang filter pasif tipe *single tuned* ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10.



Gambar 4.9 THDi pada titik PCC grid tanpa filter pasif



Gambar 4.10 THDi pada titik PCC grid dengan filter pasif

Tabel 4.5 Besar THD pada WECS berbasis DFIG (Skema 5)

Kecepatan Angin	THD arus dalam persen (%)		
	Tanpa Filter	Dengan Filter	Total Eliminasi
8,2 m/s	8.82%	0.80%	8.02%

Dari hasil simulasi, dapat diketahui juga bahwa penggunaan filter pasif tipe *single tuned* dapat menurunkan daya reaktif yang disuplai oleh DFIG. Hal ini karena filter bersifat kapasitif yang memiliki karakteristik menghasilkan daya reaktif. Daya reaktif yang dihasilkan oleh filter diberikan ke sistem sehingga daya reaktif yang dibutuhkan beban sekarang diberikan oleh DFIG dan filter. Akibatnya, generator tidak perlu lagi menyuplai semua daya reaktif yang diminta oleh beban.

Dari hasil analisa besar THD pada titik PCC grid dengan 5 kecepatan angin yang berbeda-beda terlihat pada saat sebelum menggunakan filter pasif menunjukkan THDi yang lebih besar, hal ini menunjukkan penggunaan filter pasif mendapatkan hasil yang lebih baik. Dengan rata-rata besar THD pada

saat sebelum menggunakan filter pasif 15,35% THDi. Rata-rata besar THD saat sesudah menggunakan filter pasif 1,40% THDi.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dari simulasi serta analisa besar THD pada sistem DFIG akibat konverter daya dengan filter pasif sebagai pemilah sinyal listrik berdasarkan pada frekuensi dari sinyal tersebut, sehingga dapat menarik beberapa kesimpulan dari hasil simulasi sebagai berikut:

1. Eliminasi harmonisa arus menggunakan filter pasif tipe *single tuned* pada mesin induksi dengan kecepatan angin yang meningkat adalah sebesar 15,35%, telah sesuai dengan standar I_{THD} yaitu sebesar 5%
2. Nilai-nilai % THD dari arus sesudah filter pasif dipasang sudah dapat diterima/sesuai dengan standar THD yang diperbolehkan. Untuk % I_{THD} yaitu 1,40% dan untuk % I_{THD} sebelum dipasang filter pasif adalah 15,35%
3. Penggunaan filter pasif mampu mengeliminasi % I_{THD} sebesar 11,63% dibandingkan dengan sebelum penggunaan filter pasif

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi Sumber Daya Mineral, 2011. “Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi: Potensi Energi Angin,”. Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan. Kementerian ESDM, https://p3tkebt.esdm.go.id/pilot-plan-project/energi_angin/potensi-energi-angin, diakses 9 Januari 2022.
- [2] A. Mishra and M. Singh, “Suppression of Harmonics in DFIG based WECS using passive LCL filter,” *Int. Conf. Power Energy, Environ. Intell. Control*, no. Apr 13-14, 2018, pp. 446–451, 2018.

- [3] G. Hanapi, *Mesin dan Rangkaian Listrik*, Edisi Keen. Bandung: ITB, 1993.
- [4] IEEE Std 1159, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, vol. 2019. 2019.
- [5] H. W. B. Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, *Electrical power systems*. 2017.
- [6] W. P. Mohan, Ned, Undeland, Tore M., ROBBINS, *1995_BOOK_Mohan_820p_Power Electronics_2nd.pdf*. 1995.
- [7] T. L. Skvarenina, *ELECTRONICS*. 2001.
- [8] J. G. Kim, Y. J. Park, and D. J. Lee, “Harmonic analysis of reactor and capacitor in single-tuned harmonic filter application,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 239–244, 2011, doi: 10.5370/JEET.2011.6.2.239.
- [9] M. Davudi, S. Torabzad, and B. Ojaghi, “Analysis of harmonics and harmonic mitigation methods in distribution systems,” *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 5, no. 11, pp. 996–1005, 2011.

