

RANCANGAN *BRUSHLESS EXCITER* GENERATOR SINKRON KAPASITAS DAYA 314 MW

Citra Ayu Monicasari¹, Ali Mashar², Agoeng H Rahardjo³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40612

E-mail: Citra.ayu.tptl19@polban.ac.id¹, ali.mashar@polban.ac.id², agoeng.hr@polban.ac.id³

ABSTRAK

Generator sinkron membutuhkan sistem eksitasi untuk menghasilkan tegangan. Salah satu sistem eksitasi yang digunakan adalah sistem eksitasi statik dimana penyaluran arus eksitasi menggunakan sikat arang dan *slip ring*, hal ini menimbulkan banyak kerugian yaitu *sparking* yang dapat menyebabkan *unit* mengalami *trip*, kemudian arus yang dialirkan oleh sikat arang ini relatif kecil yaitu 10 A/cm². Maka, untuk mengeliminasi penggunaan sikat arang yaitu dengan menggunakan sistem eksitasi tanpa sikat. Perancangan ini dilakukan untuk generator sinkron dengan kapasitas daya 314 MW pada kondisi *full-load* dengan arus eksitasi 2810 A dan tegangan eksitasi 405 V. Dalam perancangan tersebut, komponen yang diperhitungkan adalah *permanent magnet generator*, main exciter, konverter 3 fasa *full bridge*, dan *rotating rectifier*. Kapasitas PMG yang dirancang adalah 324,632 kVA, kapasitas konverter 3 fasa *full bridge* adalah 181,77 kVA, kapasitas main exciter adalah 2385,1 kVA, dan kapasitas *rotating diode* adalah 1138,05 kVA. Dengan rancangan tersebut, sistem eksitasi tanpa sikat mampu menghasilkan daya sebesar 314 MW dengan tegangan keluaran 19002,563 V. Hasil perhitungan teoritis, pengujian simulasi, dan *nameplate* generator dibandingkan, dan menghasilkan nilai toleransi di bawah 5%, sesuai dengan standar IEEE 1159 tahun 2019. Dengan demikian, perancangan sistem eksitasi tanpa sikat berhasil mencapai performa yang diinginkan sesuai dengan spesifikasi generator yang ditetapkan.

Kata kunci :

Generator, eksitasi, sistem eksitasi tanpa sikat

1. PENDAHULUAN

Dalam proses pembangkitan energi listrik, dibutuhkan suatu komponen utama yang berperan dalam pembangkitan listrik, yaitu generator. Pada dasarnya prinsip kerja dari generator ini yaitu mengubah daya mekanik (berupa putaran) menjadi daya listrik (elektrik). Daya mekanik berasal dari mesin penggerak atau turbin, seperti turbin air, turbin uap, turbin gas, dan turbin angin yang kemudian dikopel seporos dengan generator. Proses induksi magnet kemudian mengubah daya mekanik menjadi tenaga listrik yang dihasilkan oleh generator. Adapun generator yang digunakan di PLTGU Priok POMU adalah generator sinkron tiga-fasa, dimana frekuensi tegangan yang dibangkitkan akan sinkron dengan kecepatan putar rotornya.

Sistem eksitasi yang digunakan di PLTGU Priok POMU adalah sistem eksitasi statis, dimana daya listrik DC yang digunakan sebagai penguatan diperoleh dari *grid* (jaringan) saat proses *start-up* dan dari *output* generator saat sistem sudah beroperasi yang kemudian di *step-down* menggunakan transformator. Kemudian setelah tegangan diturunkan menggunakan transformator, listrik AC (bolak-balik) ini akan disearahkan oleh penyearah terkendali (*thyristor*) agar menghasilkan listrik DC yang kemudian akan dihantarkan oleh *carbon brush* dan *slip ring* ke rotor seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Selain itu, peran AVR (*automatic voltage regulator*) juga tak kalah pentingnya, dimana AVR berfungsi untuk mengatur besarnya tegangan keluaran generator sesuai setpointnya dengan cara mengatur arus eksitasi.

Timbulnya percikan api pada *carbon brush* merupakan salah satu kekurangan dari sistem eksitasi dengan sikat, hal ini dikarenakan oleh faktor *clearance* diantara sikat dan cincin dimana kualitas sikat arang yang tidak sesuai. Untuk sikat arang yang digunakan di PLTGU Priok POMU ini berbahan *soft graphite*. Setiap bunga api yang besar, akan menyebabkan udara di atas *slip ring* menjadi konduktif karena udara tersebut terionisasi. Konduktifnya udara di atas permukaan *slip ring* ini akan menyebabkan adanya loncatan muatan listrik besar dari satu *brush holder* ke *brush holder* yang lain dan terjadilah *flash over* pada permukaan komutator. Hal ini terjadi di PLTGU Priok, dikarenakan sikat arang dengan merk sebelumnya sudah tidak berproduksi lagi, maka digunakan sikat arang dengan merk lain. Namun setelah dilakukan penggantian sikat arang, terjadilah *sparking* atau percikan api, hal ini dikarenakan material yang digunakan terlalu keras atau padat sehingga permukaan *slip ring* tergerus dan menyebabkan *shaft slip ring* tidak bulat sempurna.

Akibatnya, ada *air gap* ketika *slip ring* berputar dan terjadi *bouncing* pada *per carbon brushnya* dan terjadilah percikan api. Selain itu, arus yang dapat dialirkan oleh sikat arang relatif kecil sehingga diperlukan kuantitas sikat arang yang banyak seiring dengan besarnya kapasitas eksitasi generator.

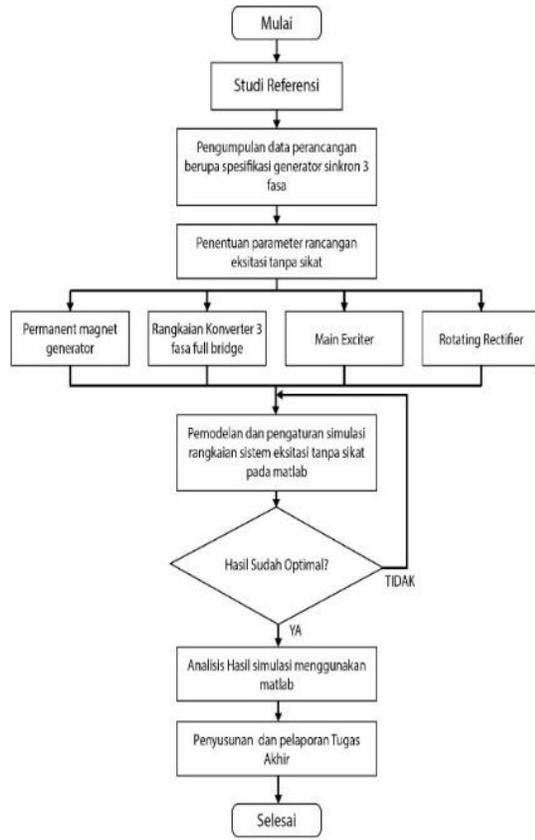
Rancangan sistem eksitasi tanpa sikat ini diharapkan mampu mengatasi permasalahan yang disebabkan oleh sistem eksitasi dengan sikat, untuk itu perlu adanya perhitungan komponen-komponen seperti PMG (Permanent

Magnet Generator), AC Main exciter dan rotating rectifier yang sesuai dengan kapasitas daya eksitasi yang dibutuhkan.

Generator sinkron yang akan dirancang sistem eksitasi tanpa sikatnya memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 2.1

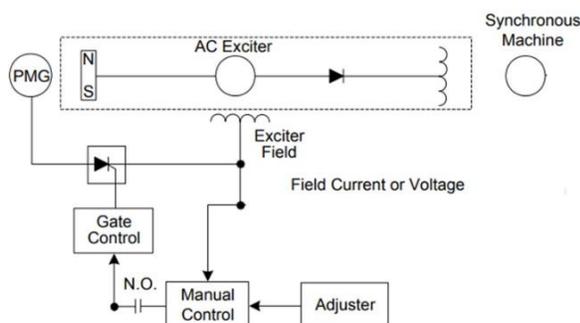
2. METODOLOGI

Pada Gambar 2.1 menjelaskan mengenai langkah-langkah yang dilakukan dalam merancang sistem eksitasi tanpa sikat untuk generator yang memiliki kapasitas daya 314 MW.



Gambar 2.1. Diagram Alir Perancangan

2.1 Spesifikasi Generator Sinkron



Gambar 2.2 . Skema Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

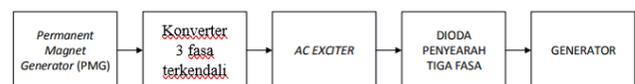
Tabel 2.1. Spesifikasi Generator

Spesifikasi Generator	
Daya	314 MW
Tegangan	19000 V
Arus	11243 A
Faktor Daya	0,85
Fasa	3
Frekuensi	50 Hz
Putaran	3000 rpm
Tegangan eksitasi	405 V
Arus eksitasi	2810 A
Rating	Continuous
Proteksi	IP54
Standard	IEC 60034
Tekanan H ₂	2 bar gauge
Kelas Insulasi	F
Temperature air pendingin	29,6 °C
Serial	16AN1Z
Date	Sep-2017
Arah rotasi	Clockwise
Merk	Mitsubishi Electric Corporation

Generator akan membangkitkan tegangan apabila rotornya diputar dan diberi arus eksitasi berupa arus DC. Arus eksitasi ini menciptakan medan magnet di dalam generator, yang kemudian berinteraksi dengan konduktor di stator untuk menghasilkan tegangan listrik. Prinsip dasar ini dikenal sebagai prinsip induksi elektromagnetik dan merupakan dasar kerja generator listrik. Langkah pertama dalam merancang sistem eksitasi tanpa sikat yaitu dengan menganalisis kebutuhan eksitasi generator sinkron yang dirancang yaitu 405 V dan 2810 A.

2.2 Perancangan Brushless Exciter

Gambar 2.2 menunjukkan skema dari sistem eksitasi tanpa sikat, dimana komponen-komponen sistem eksitasi tanpa sikat terdiri dari *permanent magnet generator*, rangkaian konverter, *main exciter* dan *rotating diode* seperti yang ditunjukkan oleh blok diagram pada gambar 2.3



Gambar 2.3. Blok diagram sistem eksitasi tanpa sikat

Berikut penjelasan komponen yang digunakan pada sistem eksitasi tanpa sikat:

1. Menentukan periode pulsa

$$T = \frac{1}{F}$$

2. Menentukan phase delay thyristor

3. Menentukan sudut penyalaa thyristor

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{2\pi V_{ac_ex}}{3\sqrt{3} V_{PMG}} - 1\right)$$

4. Menentukan tegangan keluaran

$$V_o = \frac{3\sqrt{3} V_m \cos\alpha}{\pi}$$

2.2.3 Perancangan Main Exciter

Dalam perancangan *main exciter* terdapat beberapa tahapan perancangan sebagai berikut :

1. Menentukan arus keluaran

$$(I_{ac}) = K_1 I_{fn}$$

2. Menentukan tegangan keluaran

$$(V_{ac}) = K_2 V_{fn}$$

Dimana nilai K_1 adalah batas arus, K_2 adalah batas tegangan dengan nilai 1,05 - 1,2. (Li, 2019). I_{fn} dan V_{fn} adalah eksitasi pada beban nominal.

Manufacturer	Hitachi	Toshiba	Mitsubishi	Fuji	Meidensha
Thermal power	1.05	1.05-1.1	Approximately 1.1	1.1	-
Hydropower	1.1	1.1-1.2	Approximately 1.1	1.15	1.1

Gambar 2.6. Nilai K_1 , K_2 tiap manufaktur.

3. Menentukan tegangan eksitasi

$$V_{dc} = \frac{VM}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Dimana nilai VM adalah V_{ac} exciter dikali dengan $\sqrt{2}$ dengan sudut penyulutan sebesar $75,848^\circ$.

4. Menentukan tegangan keluaran

$$I_{dc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_{ac} \sqrt{1 - 3\psi\gamma}$$

3.1.1 Perancangan Rotating Rectifier

Dalam perancangan *rotating rectifier* terdapat beberapa tahapan perancangan sebagai berikut :

1. Menentukan kebutuhan arus dan tegangan eksitasi main generator;

2. Menentukan jenis diode yang digunakan;

3. Menentukan tegangan keluaran dioda

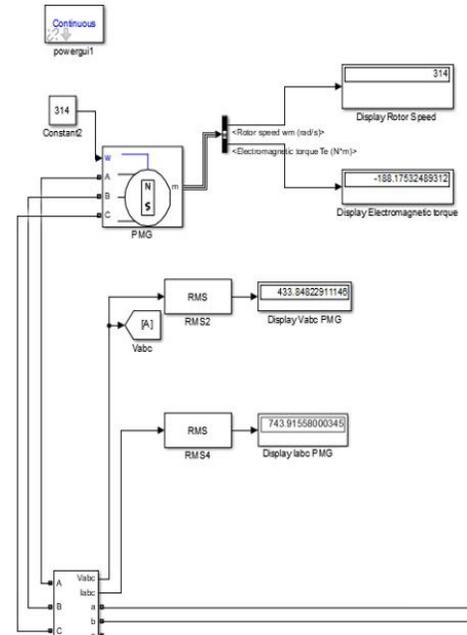
$$V_{dc} = \frac{2 \times V_{max}}{\pi}$$

Dimana nilai V_{max} adalah nilai tegangan keluaran main exciter dikali dengan $\sqrt{2}$.

4. Hasil dan Analisa

4.1 Hasil Perancangan PMG

Pengujian dilakukan dengan kondisi full-load.



Gambar 3.1 Hasil simulasi PMG

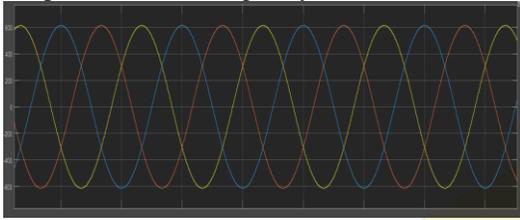
Perancangan pada PMG mengambil daya mekanik dari putaran rotor turbin yang dianggap konstan yaitu 3000 rpm atau 314 rad/s dimana 1 rpm = 0,10471975511966 rad/s. Perancangan pada PMG mengambil daya mekanik dari putaran rotor turbin yang dianggap konstan yaitu 3000 rpm atau 314 rad/s dimana 1 rpm = 0,10471975511966 rad/s.

Tabel 3.1. Perbandingan simulasi dan perhitungan komponen PMG

Parameter	Hasil perhitungan	Hasil simulasi	Selisih
Tegangan AC sebagai output PMG	434,514 V	433,848 V	0,153 %
Arus AC sebagai output PMG	748,67 A	743,915 A	0,635 %

Selain itu, didapatkan juga nilai *electromagnetic torque* sebesar -188,175 Nm, sinyal torsi negatif menunjukkan bahwa PMG sedang pada mode generator karena arah aliran daya listriknya berlawanan dengan arus mekanik yang diberikan pada mesin. Dalam mode generator, mesin berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, yang berarti menghasilkan daya listrik yang disalurkan ke sistem atau jaringan listrik eksternal. Oleh karena itu, torsi negatif menandakan bahwa mesin sedang menghasilkan daya listrik sebagai generator. Pada perancangan PMG ini, membutuhkan 12 buah magnet permanen sebagai penghasil medan magnet yang disusun pada piringan rotornya. Magnet

permanen ini disusun dengan posisi saling berhadapan mengelilingi rotor dan mengapit stator sehingga fluks magnet yang melingkupi kumparan stator dari masing-masing magnet yang berjumlah 12 buah ini saling memperkuat medan magnetnya.



Gambar 3.2 Gelombang tegangan keluaran PMG

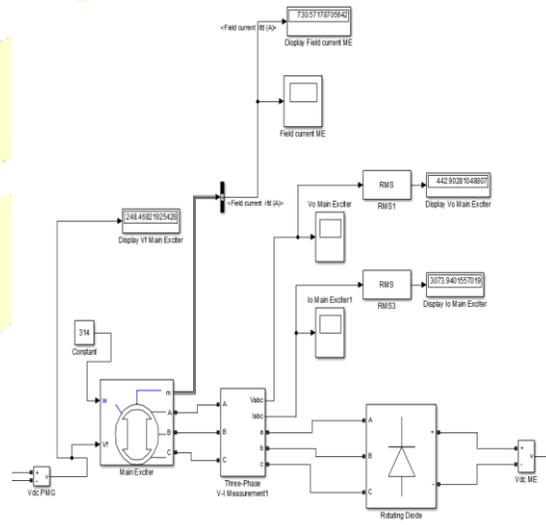
4.2 Hasil Perancangan Konverter 3 fasa

Untuk mengatur tegangan keluaran generator menggunakan AVR (*Automatic Voltage Regulator*) dapat dilakukan dengan mengatur sudut penyalan thyristor pada rangkaian konverter (Kundur, 1994). Berdasarkan hasil perhitungan, maka sudut penyulutan thyristor untuk kondisi full-load (314 MW) dibutuhkan sudut penyulutan sebesar 75,848°.

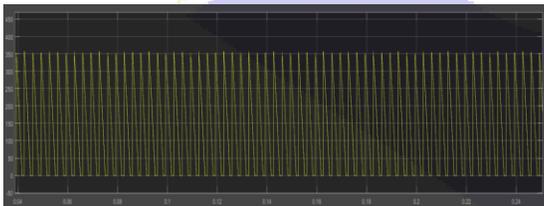
Tabel 3.2. Perbandingan simulasi dan perhitungan komponen konverter 3 fasa full bridge

Parameter	Hasil perhitungan	Hasil simulasi	Selisih
Tegangan dc hasil penyearahan konverter 3 fasa full bridge	248,6 V	248,468 V	0,053 %

Tegangan eksitasi	249,7 V	248,468 V	0,493 %
Arus eksitasi	748,67 A	730,571	2,417 %
Tegangan keluaran main exciter	445,5 V	442,902 V	0,583 %
Arus keluaran main exciter	3091 A	3073,940 A	0,551 %



Gambar 3.4 Hasil simulasi main exciter.



Gambar 3.3 Gelombang tegangan keluaran PMG setelah disearahkan oleh konverter 3 fasa terkendali dengan sudut penyulutan 75,848°.



Gambar 3.5 Gelombang arus eksitasi main exciter.

Gambar 3.5 menunjukkan gelombang arus eksitasi pada main exciter sebesar 730,571 A. Arus ini memiliki pola teratur dan konsisten serta stabil untuk memastikan medan magnet yang konstan pada rotor main exciter. Medan magnet yang dihasilkan oleh arus eksitasi melalui main exciter ini berperan penting dalam menghasilkan tegangan listrik pada stator main exciter.

3.3 Hasil Perancangan Main Exciter

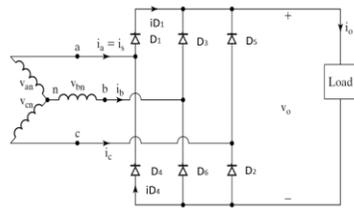
Main exciter ini mendapat input tegangan eksitasi dan arus eksitasi pada belitan medannya yang disupply oleh PMG berupa tegangan DC yang didapatkan dari keluaran rangkaian konverter 3 fasa terkendali pada kondisi generator beban penuh yang kemudian akan menghasilkan listrik AC pada belitan statornya karena induksi elektromagnetik seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4

Tabel 3.3. Perbandingan simulasi dan perhitungan komponen main exciter.

Parameter	Hasil perhitungan	Hasil simulasi	Selisih

4.3 Hasil Perancangan Rotating Rectifier

Rotating rectifier pada brushless exciter adalah komponen yang bertugas untuk mengubah arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan oleh main exciter menjadi arus searah (DC) yang digunakan untuk menyuplai medan magnetik pada rotor utama generator. Rotating rectifier terletak pada rotor generator dan terdiri dari penyearah berputar yang menghubungkan kumparan belitan rotor dengan sirkuit penyearah.

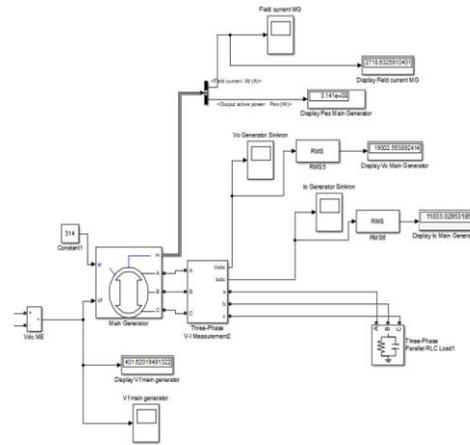


Gambar 3.6 Susunan full bridge diode 3 fasa

Jenis diode yang digunakan pada perancangan ini adalah diode full bridge 3 fasa bahan silikon dengan tegangan kerja 0,7 V.

Tabel 3.4. Perbandingan simulasi dan perhitungan komponen rotating rectifier.

Parameter	Hasil perhitungan	Hasil simulasi	Selisih
Tegangan dc hasil penyearahan rotating diode	401,09 V	401,620 V	0,131 %

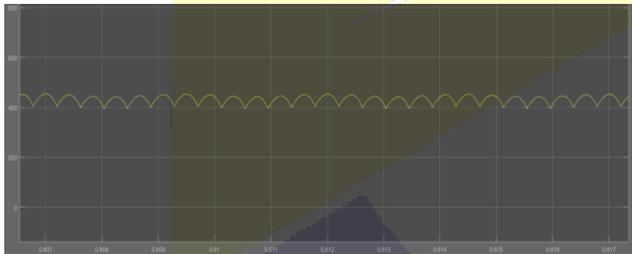


Gambar 3.8 Hasil simulasi main generator

Gambar 3.8 adalah hasil simulasi dari komponen main generator saat kondisi full load, dimana kemudian nilai-nilai yang dihasilkan ini akan dibandingkan dengan spesifikasi generator yang digunakan berupa nameplate generator itu sendiri yang akan ditampilkan pada tabel 3.5

Tabel 3.5. Perbandingan simulasi dan perhitungan komponen main generator.

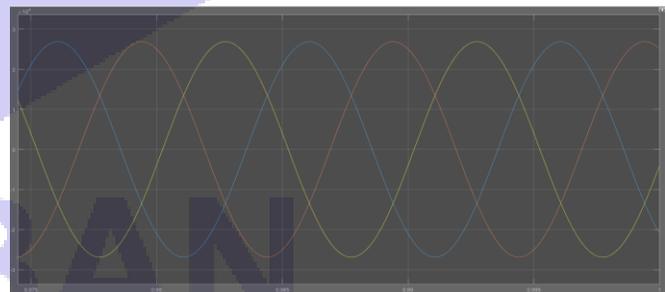
Parameter	Nameplate	Hasil simulasi	Selisih
Tegangan eksitasi	405 V	401,620 V	0,834%
Arus eksitasi	2810 A	2718,632 A	3,251 %
Tegangan keluaran main exciter	19000 V	19002,563 V	0,013 %
Arus keluaran main exciter	11243 A	11003,029 A	2,134%
Daya aktif	314,496 MW	314,1 MW	0,126 %



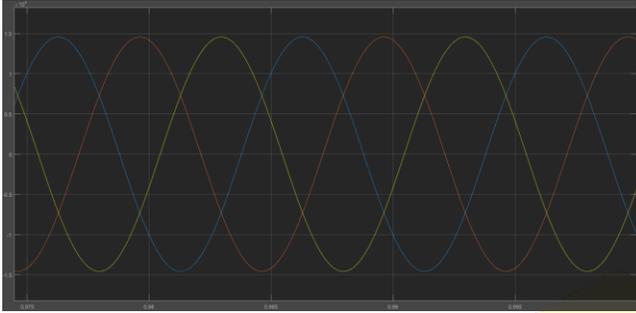
Gambar 3.7 Gelombang tegangan eksitasi untuk main generator dari keluaran rotating diode

4.4 Hasil Simulasi Main Generator

Generator sinkron adalah jenis generator listrik yang menghasilkan arus listrik AC (arus bolak-balik) dengan frekuensi tetap dan tegangan yang tetap sebanding dengan kecepatan putaran rotor. Generator sinkron menghasilkan listrik dengan prinsip induksi elektromagnetik. Generator yang digunakan adalah generator sinkron dengan kapasitas daya 314 MW dengan manufaktur asal Jepang yaitu Mitsubishi electric. Berdasarkan nameplate dapat diketahui bahwa tegangan eksitasi dan arus eksitasi masing-masing 405 V dan 2810 A pada saat commissioning.



Gambar 3.9 Gelombang tegangan keluaran main generator Gambar 3.9 menunjukkan gelombang sinusoidal (AC) yang dihasilkan oleh main generator sebesar 19002,563 V. Hal ini dikarenakan generator sinkron bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik, dimana medan magnet yang berputar di rotor menghasilkan tegangan AC pada belitan stator



Gambar 3.10 Gelombang arus keluaran *main generator*.
Gambar 3.10 menunjukkan gelombang arus sinusoidal (AC) yang dihasilkan oleh main generator sebesar 11003,029 A. Generator menghasilkan arus bolak-balik (AC) sebagai hasil dari konversi energi mekanik menjadi energi listrik.

5. Kesimpulan

- Hasil perancangan dan hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa perancangan sistem eksitasi tanpa sikat ini sudah mampu mencapai kapasitas yang diinginkan yaitu 314 MW dengan tegangan keluaran 19002,563 V dan dapat disimpulkan bahwa berikut parameter-parameter yang harus dipenuhi:
 - Kapasitas permanent magnet generator sebesar 324,632 kVA dengan frekuensi 300 Hz dan jumlah kutub 12 pole menggunakan magnet neodymium iron;
 - Kapasitas konverter 3 fasa *full bridge* 181,77 kVA
 - Kapasitas main exciter sebesar 2385,1 kVA dengan frekuensi 200 Hz dan jumlah kutub 8 pole;
 - Kapasitas rotating dioda *full bridge* sebesar 1138,05 kVA.
- Setelah dilakukan simulasi pada sistem eksitasi tanpa sikat yang dirancang, didapatkan data bahwa perbedaan antara data simulasi, perhitungan maupun data nameplate tidak jauh berbeda dan masih dibawah standar yang ditetapkan yaitu IEEE Standard 1159 tahun 2019 yang berjudul "*IEEE Recommended Practice for Monitoring & Electric Power Quality*" dimana standard ini memberikan pedoman tentang pengukuran & pemantauan kualitas daya listrik meliputi toleransi perancangan berbagai parameter yaitu tegangan, arus, power faktor maupun harmonisa sebesar 5%.
- Sistem brushless exciter yang dirancang telah mampu menyuplai eksitasi dimana main exciter sudah mampu menyuplai eksitasi pada main generator dan juga PMG sudah mampu menyuplai eksitasi pada main exciter. Brushless exciter memberikan unjuk kerja yang handal, efisien, dan

bebas dari masalah yang sering terkait dengan slip ring dan brush pada sistem exciter statik..

Daftar Pustaka

- Chow, J., & Sanchez-Gasca, J. (2020). *Power System Modeling, Computation, and Control*. New York: Wiley-IEEE Press.
- Engineer. (2022, 04 26). Retrieved from <https://canthoautomation.com/three-phase-full-wave-controlled-rectifier/>
- Irasari, P. (2011). Thermal Analysis on Radial Flux Permanent Magnet Generator. *The Journal for Technology and Science*.
- Jaya, L. (2020, Mei 18). Retrieved from Lieneticjaya.com: <https://lieneticjaya.com/apa-itu-current-transformer-trafo/>
- Jerkovic, V., Miklosevic, K., & Zeljko, S. (2010). *Excitation System Models of Synchronous Generator*. Osijek: Faculty of Electrical Engineering Osijek.
- Lemau. (2011, Agustus 13). Retrieved from <https://www.electronicneutron.com/generator-2/basic-of-automatic-voltage-regulator/>
- Li, J. (2019). *Design and application of modern synchronous generator excitation system*. China: China Electric Power Press.
- Marappung, M. (1993). *Teknik Tenaga Listrik*. Bandung: ARMICO.
- Mashar, A. (2016). *MESIN LISTRIK II*. Bandung: Jurusan Teknik Konversi Energi POLBAN.
- Nakhoda. (2018). Design And Implementation Of Ls-Pmsg For Small Scale. *JOURNAL OF SCIENCE AND APPLIED ENGINEERING (JSAE)*.
- Noland, J. K. (2016). Fast-response rotating. *UPPSALA*.
- prasertijo, H. (2012). Generator Magnet Permanen Sebagai Pembangkit Listrik Putaran Rendah . *Dinamika Rekayasa*, 1-8.
- Rakhman, A. (2013, February 6). Retrieved from <https://rakhman.net/electrical-id/generator/>
- Rakhman, A. (2013, 25 April). Retrieved from <https://rakhman.net/electrical-id/prinsip-kerja-sistem-eksitasi-generator/>
- rashid, M. H. (2011). Power Electronic Handbook Third Edition. In *Power Electronic Handbook Third Edition*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- SMAIL, H. (2018). PSO Optimized PID Regulator for a Variable Frequency Brushless Synchronous Generator. *POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING*.
- SMAIL, H. (2018). PSO Optimized PID Regulator for a Variable Frequency Brushless Synchronous Generator. *POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING*