

Analisis Pengaruh Perubahan Beban Resistif, Induktif, dan Kombinasi terhadap Frekuensi pada Generator 3 Fasa

Subur Simanullang¹, Antonius Managam Simamora²

^{1,2}Fakultas Teknik Universitas Darma Agung, Medan, Indonesia

Email: ¹subur.simanullang@gmail.com, ²antonius2simamora@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: ¹subur.simanullang@gmail.com

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Generator Frekuensi Tegangan Behan.	Di dalam sistem kelistrikan kehandalan merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan, baik dalam hal nilai tegangan maupun frekuensi di dalam menyalurkan tenaga listrik ke konsumen. Di saat suatu sistem tenaga listrik tidak memiliki kehandalan di dalam menyalurkan tenaga listrik maka akan berakibat konsumsi tenaga listrik tidak efisien dan tidak ekonomis. Di dalam menjaga nilai tegangan dan frekuensi suatu sistem tenaga bukanlah suatu hal yang mudah disamping beban yang harus dicukupkan berubah-ubah seiring dengan berjalannya waktu. Terkhusus didalam hal frekuensi yang merupakan sebuah patokan didalam sistem kelistrikan, disaat berubahnya nilai frekuensi pada sistem kelistrikan akan mempengaruhi nilai tegangan dan arus dengan berubahnya nilai tegangan dan frekuensi akan berakibat pada konsumen sebagai pihak yang mengkonsumsi energi listrik. Penelitian ini akan menganalisa bagaimana pengaruh perubahan beban resistif, induktif, dan kombinasi dari sebuah generator sinkron 3 fasa terhadap frekuensi generator itu sendiri di dalam menyalurkan energi listrik berbeban dan dampak dari perubahan frekuensi terhadap sistem kelistrikan. Penelitian ini dilakukan dengan pengujian di laboratorium. Hasil dalam penelitian ini Adalah bahwa dalam kondisi tanpa beban, generator yang diuji dapat membangkitkan tegangan sebesar 220/380 V dan frekuensi R = 51 Hz, S = 51,5 Hz, T = 50,5 Hz dan diputar pada kecepatan 1513 rpm untuk percobaan beban resistif. Ketika pada beban ke-4, frekuensi akan mengalami penurunan menjadi R = 46,7 Hz, S = 47,3 Hz, dan T = 46,4 Hz, tegangan dan putaran rpm pada beban ke-4 akan menjadi 201/352 V dan 1380 rpm. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa perubahan jenis dan besar beban memiliki pengaruh yang signifikan terhadap frekuensi generator tiga fasa. Semakin besar beban yang diberikan, maka frekuensi generator cenderung mengalami penurunan akibat berkurangnya kecepatan putar rotor yang tidak sepenuhnya diimbangi oleh penggerak mula.
	Abstract
Keywords: Generator Frequency Voltage Materials.	In the electrical system, reliability is a very important thing to pay attention to, both in terms of voltage and frequency values in distributing electrical power to consumers. When an electrical power system does not have reliability in distributing electrical power, it will result in inefficient and uneconomical electricity consumption. Maintaining the voltage and frequency values of a power system is not an easy thing besides the load that must be met changes over time. Especially in terms of frequency which is a benchmark in the electrical system, when the frequency value changes in the electrical system will affect the voltage and current values with changes in the voltage and frequency values will have an impact on consumers as parties who consume electrical energy. This study will analyze how the influence of changes in resistive, inductive, and combination loads of a 3-phase synchronous generator on the frequency of the generator itself in distributing electrical energy under load and the impact of frequency changes on the electrical system. This study was conducted by testing in the laboratory. The results of this study are that under no-load conditions, the generator being tested can generate a voltage of 220/380 V and a frequency of R = 51 Hz, S = 51.5 Hz, T = 50.5 Hz and rotated at a speed of 1513 rpm for resistive load experiments. When the 4th load is applied, the frequency will decrease to R = 46.7 Hz, S = 47.3 Hz, and T = 46.4 Hz, the voltage and rpm rotation at the 4th load will be 201/352 V and 1380 rpm. Based on the results of the testing and analysis conducted, it can be concluded that changes in the type and magnitude of the load have a significant impact on the frequency of a three-phase generator. The greater the load, the more the generator frequency tends to decrease due to a reduction in rotor rotational speed that is not fully compensated by the prime mover.

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik modern perlu terus menghasilkan listrik yang andal dengan standar kualitas daya yang stabil. Salah satu tanda penting kualitas daya yang baik adalah seberapa stabil frekuensi sistem, dan di seluruh negeri, frekuensi tersebut perlu tetap pada tingkat standar yaitu 50 Hz atau 60 Hz. Frekuensi ini sangat bergantung pada seberapa baik daya yang dihasilkan oleh generator sesuai dengan daya yang digunakan oleh beban [1]. Ketika beban terus berubah, generator sinkron tiga fasa, yang merupakan sumber daya utama, akan mengalami perubahan gaya lawan yang mencoba memperlambatnya. Perubahan ini secara langsung memengaruhi seberapa cepat rotor berputar (diukur dalam RPM) dan menyebabkan frekuensi juga berubah [1], [2]. Cara perubahan frekuensi sangat bergantung pada jenis beban yang terhubung ke sistem, seperti apakah itu beban resistif, beban induktif, atau campuran keduanya. Beban resistif murni biasanya menyerap daya aktif dan tidak mengubah faktor daya, tetapi jika ukurannya meningkat banyak, hal itu tetap memberikan lebih banyak beban pada putaran generator [3], [4]. Di sisi lain, beban induktif seperti motor listrik industri menggunakan banyak arus saat dinyalakan dan menyerap daya reaktif. Hal ini menyebabkan tegangan di ujung rangkaian turun dan membuat generator bekerja lebih keras selama perubahan mendadak [5], [6]. Dalam lingkungan industri atau jaringan mikro, beban listrik merupakan campuran dari jenis resistif dan induktif, dan beban tersebut berubah seiring waktu [6], [7]. Jika kombinasi beban berubah dengan cepat tanpa penyesuaian kontrol yang tepat, perubahan frekuensi yang besar dapat menyebabkan masalah pada cara kerja sistem dan bahkan dapat menyebabkan peralatan penting berhenti bekerja [8], [9]. Untuk mencegah penurunan tingkat daya (frekuensi rendah) yang dapat menyebabkan sistem mematikan sebagian jaringan, sangat penting untuk mempelajari bagaimana beban berubah dari waktu ke waktu dan bagaimana generator bereaksi dengan cepat terhadap perubahan mendadak [10], [11].

Beberapa penelitian terdahulu telah berfokus pada optimasi kontrol frekuensi fasa pada sistem multi-sumber [7] serta analisis penyimpanan energi induktif [10]. Untuk memprediksi penurunan frekuensi (frekuensi rendah) yang dapat menyebabkan pemadaman listrik, masih diperlukan penelitian yang lebih detail tentang seberapa besar penurunan frekuensi ketika berbagai jenis beban seperti beban resistif murni, induktif murni, dan beban campuran digunakan pada generator tiga fasa berukuran laboratorium. Pemodelan pola beban dan analisis respons transien generator merupakan bagian yang sangat penting [11], [12]. Hal ini penting sebagai acuan parameter dalam merancang sistem kontrol pengkondisi sinyal (governor) yang kokoh [13]. Guna melakukan analisis komprehensif terkait fenomena ini, diperlukan landasan teori fundamental mengenai interaksi medan magnet pada mesin-mesin listrik serta analisis sistem tenaga yang dinamis [14], [15]. Melalui pemahaman karakteristik internal generator 3 fasa saat dibebani [14] dan penerapan regulasi kontrol frekuensi yang kuat [15] dampak negatif dari fluktuasi beban dapat ditekan seminimal mungkin. Kestabilan parameter elektrik pada sistem pembangkitan merupakan prasyarat mutlak dalam menjaga keandalan penyaluran energi listrik kepada konsumen. Di antara berbagai parameter kualitas daya, frekuensi sistem menjadi indikator paling krusial yang mencerminkan keseimbangan secara real-time antara daya aktif yang disuplai oleh penggerak mula (prime mover) dengan total daya aktif yang diserap oleh beban pengguna. Dalam operasi sistem tenaga listrik, fluktuasi beban tidak dapat dihindari karena dinamika permintaan konsumen yang berubah setiap waktu. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai analisis aliran daya dan perancangan sistem jaringan yang kokoh menjadi fondasi utama untuk memprediksi perilaku sistem saat menghadapi perubahan karakteristik pembebanan tersebut [13]. Untuk menjaga agar deviasi frekuensi tidak melewati ambang batas aman yang dapat merusak peralatan sensitif, sistem pembangkitan memerlukan mekanisme kendali frekuensi (power system frequency control) yang kuat dan adaptif.

Fluktuasi beban kombinasi yang terjadi secara acak di industri menuntut pemodelan kontrol yang tidak hanya mengandalkan aksi governor konvensional, melainkan juga harus memperhitungkan ketidakpastian dan gangguan transien agar frekuensi dapat segera kembali ke kondisi tunak (steady state). Kegagalan dalam merespons perubahan beban secara cepat dapat memicu ketidakstabilan sistem yang berdampak luas pada penurunan performa generator 3 fasa itu sendiri [14]. Meskipun prinsip dasar pembebanan dan kontrol frekuensi telah banyak dibahas dalam literatur global, investigasi empiris yang memetakan secara spesifik persentase penurunan frekuensi akibat variasi beban resistif murni, induktif murni, serta kombinasi linier keduanya pada skala generator 3 fasa aplikasi masih memerlukan kajian eksperimental yang mendalam. Data riil mengenai perbedaan karakteristik respons transien dari ketiga jenis beban tersebut sangat diperlukan sebagai acuan praktis dalam memvalidasi teori kendali frekuensi pada sistem kelistrikan skala kecil atau mandiri (isolated system) [15].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perubahan beban resistif, induktif, dan kombinasi terhadap frekuensi pada generator tiga fasa. Penelitian ini dilakukan melalui metode eksperimen dengan memberikan variasi beban secara bertahap dan mengamati perubahan frekuensi yang terjadi. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang jelas mengenai karakteristik respon frekuensi generator terhadap berbagai

jenis beban. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem tenaga listrik, khususnya terkait dengan kestabilan frekuensi generator. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi praktisi dalam mengoperasikan generator secara optimal, terutama dalam menghadapi kondisi perubahan beban yang dinamis di lapangan. Dengan demikian, sistem tenaga listrik dapat beroperasi secara lebih stabil, efisien, dan andal.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menganalisis pengaruh perubahan beban resistif, induktif, dan kombinasi terhadap frekuensi pada generator tiga fasa. Pendekatan eksperimen dipilih karena mampu memberikan data aktual berdasarkan kondisi nyata dari sistem yang diuji. Penelitian ini secara spesifik memilih metode eksperimen laboratorium karena sifat dari permasalahan yang diteliti menuntut adanya manipulasi variabel yang presisi dan pembuktian kausalitas (sebab-akibat) secara langsung.

Untuk menjawab pertanyaan penelitian mengenai bagaimana jenis beban yang berbeda memengaruhi nilai frekuensi, diperlukan lingkungan pengujian yang terkontrol ketat di mana faktor gangguan luar seperti fluktuasi tegangan jala-jala utama atau gangguan harmonisa luar dapat dieliminasi. Melalui metode eksperimen, peneliti dapat secara sengaja memberikan perlakuan (treatment) berupa variasi nilai beban resistif, induktif, dan kombinasi secara bertahap, lalu mengukur secara real-time respons transien maupun kondisi tunak (steady state) dari frekuensi generator. Dalam penelitian eksperimental ini, populasi objek yang diteliti adalah sistem generator fasa banyak, sedangkan sampel material yang didefinisikan secara spesifik adalah satu unit Generator Sinkron 3 Fasa Aplikasi dengan kapasitas 380 V, 50 Hz.

Pemilihan sampel tunggal yang spesifik ini didasarkan pada kriteria bertujuan (purposive sampling) dengan alasan teknis bahwa generator tersebut memiliki karakteristik standar yang merepresentasikan generator komersial skala kecil hingga menengah yang digunakan di industri atau sistem jaringan mikro (microgrid). Selain itu, sampel unit beban yang direkrut (digunakan) didefinisikan berdasarkan standarisasi komponen linier, yaitu: lampu pijar sebagai representasi beban resistif murni (R), induktor/ballast inti besi sebagai representasi beban induktif murni (L), serta rangkaian paralel keduanya sebagai beban kombinasi (RL).

2.1. Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimen. Data yang diperoleh berupa nilai frekuensi yang diukur secara langsung pada berbagai kondisi pembebanan, kemudian dianalisis untuk mengetahui hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat.

2.2. Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini terdiri dari:

1. Variabel bebas: Jenis dan besar beban (resistif, induktif, dan kombinasi)
2. Variabel terikat: Frekuensi generator (Hz)
3. Variabel kontrol: Kecepatan awal generator, jumlah kutub, kondisi lingkungan, dan tegangan awal

2.3. Peralatan dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Generator sinkron 3Ø 5 KW, sebagai alat untuk membangkitkan tegangan.
2. Motor induksi 3Ø, sebagai penggerak generator (prime mover).
3. Lampu pijar dan Trafo ballast, sebagai beban pengujian generator.
4. Volt meter DC, untuk mengukur tegangan keluaran penguatan.
5. Volt meter AC, untuk mengukur tegangan terminal dari generator sinkron 3Ø.
6. Ampere meter DC, untuk mengukur arus keluaran penguatan.
7. Ampere meter AC, untuk mengukur arus terminal keluaran dari generator sinkron 3Ø.
8. Watt meter 3Ø, untuk mengukur daya terminal keluaran generator sinkron 3Ø pada saat berbeban.
9. Cos Ø, untuk mengukur factor kerja generator 3Ø pada saat berbeban
10. Regulator AC, sebagai pengatur tegangan.
11. Tachometer, untuk mengukur putaran dari generator 3Ø.
12. Hertz meter/ frekuensi meter, untuk mengukur frekuensi.
13. Kabel/ jumper, untuk penghubung dari rangkaian ke alat ukur.
14. Streng (v belt), untuk mengkopel generator induksi dengan penggerak mulanya.

2.4. Prosedur Penelitian

Langkah-langkah pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan seluruh peralatan dan memastikan semua dalam kondisi baik.
2. Menjalankan generator tanpa beban dan mencatat frekuensi awal sebagai referensi.
3. Menambahkan beban resistif secara bertahap (misalnya 25%, 50%, 75%, dan 100%) dan mencatat perubahan frekuensi pada setiap tahap.
4. Mengulangi langkah yang sama menggunakan beban induktif.
5. Melakukan pengujian dengan kombinasi beban resistif dan induktif dengan variasi komposisi tertentu.
6. Mencatat seluruh data hasil pengukuran secara sistematis.

2.5. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui pengukuran langsung menggunakan alat ukur frekuensi pada setiap variasi pembebanan. Pengukuran dilakukan secara berulang untuk meningkatkan keakuratan data.

2.6. Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan metode deskriptif kuantitatif, yaitu dengan:

- a. Membandingkan nilai frekuensi pada setiap variasi beban
- b. Mengidentifikasi pola perubahan frekuensi
- c. Menentukan hubungan antara jenis beban dan deviasi frekuensi
- d. Menyajikan data dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi

2.7. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun secara sistematis untuk memastikan proses penelitian berjalan terarah dan menghasilkan data yang valid. Adapun tahapan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Tahap Persiapan

Pada tahap ini dilakukan:

- a. Studi literatur terkait generator tiga fasa dan pengaruh beban terhadap frekuensi
- b. Penentuan tujuan dan rumusan masalah
- c. Persiapan alat dan bahan penelitian
- d. Perancangan skema pengujian

2. Tahap Perancangan Sistem

- a. Menyusun rangkaian pengujian generator dan beban
- b. Menentukan variasi beban yang akan digunakan
- c. Menentukan titik pengukuran frekuensi

3. Tahap Pelaksanaan Eksperimen

- a. Menjalankan generator tanpa beban
- b. Melakukan pengujian dengan beban resistif
- c. Melakukan pengujian dengan beban induktif
- d. Melakukan pengujian dengan kombinasi beban
- e. Mencatat seluruh hasil pengukuran

4. Tahap Pengolahan Data

- a. Mengelompokkan data berdasarkan jenis beban
- b. Menghitung perubahan frekuensi pada setiap kondisi
- c. Membuat tabel dan grafik hubungan beban terhadap frekuensi

5. Tahap Analisis dan Pembahasan

- a. Menganalisis pengaruh masing-masing jenis beban
- b. Membandingkan hasil antar variasi beban
- c. Mengaitkan hasil dengan teori yang ada

6. Tahap Penarikan Kesimpulan

- Menyusun kesimpulan berdasarkan hasil analisis
- Memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Percobaan

1. Generator dengan beban resistif

Data hasil percobaan beban resistif.

VL-L = 380 V

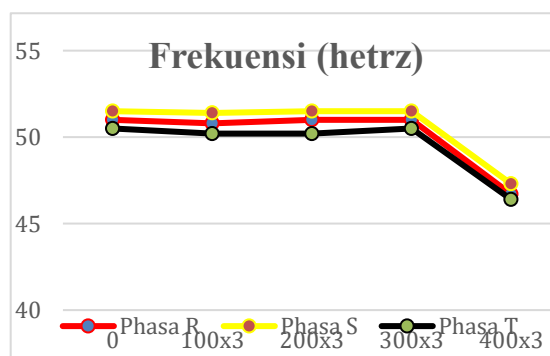
VL-N = 220 V

n = 1500 rpm

Tabel 1. Data Percobaan Beban Resistif

NO	Vfg	Ifg	Ig	Vg		Frekuensi			n	Beban
	(DC)	(DC)	(AC)	LL	LN	R	S	T	rpm	
1	43	2,15	0	380	220	51	51,5	50,5	1513	0
2	43	2,2	0,42	380	220	50,8	51,4	50,2	1506	100x3
3	44	2,25	0,62	380	220	51	51,5	50,2	1509	200x3
4	45	2,25	1,4	380	220	51	51,5	50,5	1508	300x3
5	46	2,3	1,42	352	201	46,7	47,3	46,4	1380	400x3

Grafik data percobaan beban resistif 3 Ø dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 1. Grafik Data Percobaan Beban Resistif 3 Ø

2. Generator dengan beban induktif

Data hasil percobaan beban induktif

VL-L = 380 V

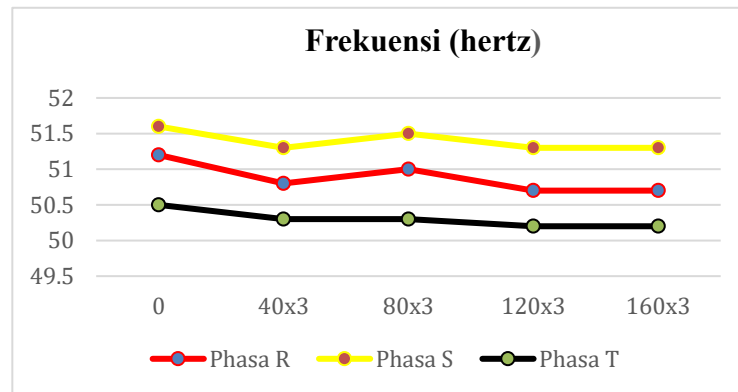
VL-N = 220 V

n = 1500 rpm

Tabel 2. Data Percobaan Beban Induktif

NO	Vfg	Ifg	Ig	Vg		Frekuensi			n	Beban
	(DC)	(DC)	(AC)	LL	LN	R	S	T	rpm	
1	42	2,15	0	380	220	51,2	51,6	50,5	1514	0
2	45	2,25	0,62	380	220	50,8	51,3	50,3	1505	40x3
3	49	2,45	1,26	380	220	51	51,5	50,3	1508	80x3
4	51	2,52	1,9	380	220	50,7	51,3	50,2	1504	120x3
5	53	2,7	2,45	380	220	50,7	51,3	50,2	1504	1600x3

Grafik data percobaan beban induktif 3 Ø dapat dilihat pada gambar berikut.

**Gambar 2.** Grafik Data Percobaan Beban Induktif 3 Ø

3. Generator dengan beban kombinasi

Data hasil percobaan beban kombinasi

VL-L = 380 V

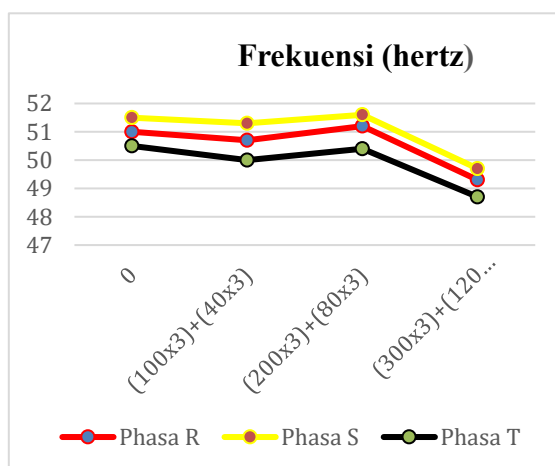
VL-N = 220 V

n= 1500 rpm

Tabel 3. Data Percobaan Beban Kombinasi

NO	Vfg	Ifg	Ig	Vg		Frekuensi			n	Beban
	(DC)	(DC)	(AC)	LL	LN	R	S	T	rpm	
1	41	2,2	0	380	220	51	51,5	50,5	1509	0
2	46	2,4	0,7	380	220	50,7	51,3	50	1502	(100x3) + (40x3)
3	47	2,35	1,5	380	220	51,2	51,6	50,4	1517	(200x3) + (80x3)
4	48	2,4	2,25	360	208	49,3	49,7	48,7	1456	(300x3) + (120x3)

Grafik data percobaan beban kombinasi 3 Ø dapat dilihat pada gambar berikut.

**Gambar 3.** Grafik Data Percobaan Beban Kombinasi 3 Ø

3.2. Pembahasan

Dalam bagian ini akan di bahas analisa data yang sudah di dapatkan dalam penelitian. Adapun analisa yang akan di lakukan sesuai dengan tujuan yang ingin di capai di dalam analisa tugas akhir ini yang bergerak lurus sesuai rumusan dan di batasi oleh batasan masalah yang sudah di terangkan pada bab sebelumnya.

1. Pengaruh beban terhadap frekuensi

Dimana tegangan yang di hasilkan oleh kumparan stator berbanding lurus dengan nilai perkalian antara fluks, putaran dan konstanta mesin. Semakin tinggi tegangan yang di hasilkan maka harus semakin tinggi pulalah fluks yang harus di bangkitkan dan putaran yang di berikan, begitu pulalah sebaliknya.

2. Hubungan arus dan tegangan terhadap frekuensi

Pada hasil Analisa data percobaan terlihat bahwasannya arus berbanding terbalik dengan tegangan, disaat tegangan tinggi maka arus rendah, dan sebaliknya. Sehingga nilai arus pada sebuah sistem tergantung dari yang perlu di cukupkan pada beban, dengan kata lain frekuensi berbanding terbalik terhadap arus. Dimana apabila beban bertambah arus juga akan naik. Untuk arus keluaran dari generator akan berbanding lurus dengan beban yang terpasang pada generator. Disini terlihat jelas bahwasannya besar arus yang keluar dari generator tidak di pengaruhi oleh jenis beban / fluks magnetik pada stator, namun besarnya arus di pengaruhi oleh besarnya beban yang terpasang. Untuk melihat besarnya nilai frekuensi, arus, dan tegangan yang berubah akibat beban akan di analisa pada bagian berikut.

3. Beban resistif

Apabila beban resistif di tambah, maka frekuensi akan mengalami penurunan. Begitu juga dengan rpm pada generator akan mengalami penurunan kecepatan. Pada percobaan beban resistif tegangan dan rpmnya tetap dijaga untuk mempertahankan nilai yang sudah di ditetapkan. Disini terlihat bahwasannya frekuensi, tegangan, dan rpm dalam beban resistif sangat mengalami penurunan yang lebih besar di dibandingkan dengan penurunan pada beban induktif, di karenakan beban yang di pakai untuk percobaan beban resistif lebih besar dari pada beban yang di pakai untuk percobaan beban induktif, sehingga menyebabkan turunnya putaran dan tegangan pada generator. Pada percobaan beban resistif, dengan beban 12 lampu yang pada 1 lampunya yaitu 100 watt, generator 3 phasa yang hanya memiliki kapasitas 1,5 KW dan kecepatan rpmnya 1500 rpm, tidak sanggup lagi dan mengalami penurunan tegangan dan kecepatan putaran (rpm), sehingga tegangan dan rpmnya tidak tetap seperti ketentuan yang sudah di ditetapkan yaitu 220-380V dan 1500 rpm. Pada percobaan beban induktif, generator mampu menghasilkan 4 kali data percobaan bahkan lebih. Itu di karenakan daya beban trafo ballast yang hanya 40 watt saja.

4. Beban induktif

Pada beban induktif juga mengalami hal yang sama dengan beban resistif. Dimana terjadinya penurunan frekuensi dari frekuensi awal beban di tambahkan. Pada percobaan beban induktif tegangan dan rpm nya tetap dijaga untuk mempertahankan nilai yang sudah di tetapkan. Pada percobaan beban resistif, dengan beban 12 lampu yang pada 1 lampunya yaitu 100 watt, generator 3 phasa yang hanya memiliki kapasitas 1,5 KW dan kecepatan rpmnya 1500 rpm, tidak sanggup lagi dan mengalami penurunan tegangan dan kecepatan putaran (rpm), sehingga tegangan dan rpmnya tidak tetap seperti ketentuan yang sudah di tetapkan yaitu 220-380V dan 1500 rpm. Pada percobaan beban induktif, generator mampu menghasilkan 4 kali data percobaan bahkan lebih. Itu di karenakan daya beban trafo ballast yang hanya 40 watt saja.

5. Beban kombinasi

Beban kombinasi merupakan beban gabungan dari beban resistif dengan beban induktif. Dalam percobaan beban kombinasi hanya bisa 3 kali saja di lakukan percobaan berbeban, di karenakan generator sudah tidak sanggup lagi mempertahankan ketetapan nilai tegangan dan putaran rpmnya. Disini kita dapat melihat bagaimana frekuensi menjadi berkurang disaat kedua beban di tambahkan, dimana penurunan frekuensi menjadi besar. Pada beban kombinasi, terlihat bahwa tegangan dan rpm tidak sanggup lebih dari 3 percobaan berbeban. Ketika beban resistif dan induktif ditambahkan, maka penurunan nilai tegangan dan rpm sangatlah besar. Tetapi, penurunan pada frekuensi hanya sekitar 1,8 hertz saja. Pengaruh beban kombinasi terhadap frekuensi akan sangat besar bila di lakukan lebih dari 3 kali percobaan berbeban, Itu terlihat dari jumlah beban yang di pakai dari beban resistif maupun beban induktif yang memiliki nilai cukup besar bila di kombinasikan. Pada generator jika tegangan eksitasi di tambah, maka putaran generator akan semakin turun, di karenakan medan magnet yang masuk kegenerator sehingga putaran rotornya menjadi berat.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa perubahan jenis dan besar beban memiliki pengaruh yang signifikan terhadap frekuensi generator tiga fasa. Semakin besar beban yang diberikan, maka frekuensi generator cenderung mengalami penurunan akibat berkurangnya kecepatan putar rotor yang tidak sepenuhnya diimbangi oleh penggerak mula. Beban resistif menunjukkan pengaruh yang relatif kecil terhadap penurunan frekuensi karena tidak melibatkan daya reaktif, sehingga sistem masih dapat mempertahankan kestabilan dengan baik. Sebaliknya, beban induktif memberikan dampak paling besar terhadap penurunan frekuensi, yang disebabkan oleh adanya kebutuhan daya reaktif yang meningkatkan beban kerja generator. Sementara itu, beban kombinasi resistif dan induktif menghasilkan pengaruh yang bersifat menengah dan bergantung pada proporsi masing-masing komponen beban. Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kestabilan frekuensi sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem penggerak mula dalam menjaga kecepatan rotor tetap konstan. Tanpa adanya sistem pengendalian yang baik, perubahan beban dapat menyebabkan deviasi frekuensi yang cukup signifikan dan berpotensi mengganggu kinerja sistem tenaga listrik. Dengan demikian, dapat ditegaskan bahwa pengelolaan beban dan penggunaan sistem kontrol yang tepat sangat penting untuk menjaga kestabilan frekuensi pada generator tiga fasa, terutama dalam kondisi operasi dengan variasi beban yang dinamis. Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis data mengenai pengaruh beban resistif, induktif, dan kombinasi terhadap frekuensi pada generator 3 fasa, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan Penelitian ini telah berhasil memajukan pengetahuan ilmiah di bidang sistem komponen pembangkitan dengan menyediakan data transien kuantitatif riil mengenai deviasi frekuensi spesifik berdasarkan variasi karakteristik beban listrik. Jika literatur teks fundamental sebelumnya baru memaparkan hubungan penurunan frekuensi secara teoritis-umum, penelitian ini melangkah lebih maju dengan memetakan batas toleransi dinamika drop putaran rotor (RPM) generator 3 fasa secara empiris ketika dihadapkan langsung pada tiga tipologi beban berbeda pada kondisi operasional riil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban induktif dan kombinasi memberikan dampak penurunan frekuensi yang jauh lebih signifikan dan waktu pemulihan transien (recovery time) yang lebih lama dibandingkan dengan beban resistif murni pada daya semu (VA) yang sama. Dalam konteks teori stabilitas sistem tenaga, fenomena ini mengonfirmasi secara faktual bahwa penyerapan daya reaktif oleh beban induktif menurunkan faktor daya yang berakibat pada meningkatnya torsi elektromagnetik lawan pada medan jangkar generator. Penurunan kecepatan putar mekanis yang dihasilkan secara linear membuktikan teori dasar konversi energi mesin listrik, namun dengan tambahan fakta baru mengenai batas kritis magnitudo pembebanan sebelum generator

mengalami under-frequency. Seluruh interpretasi hasil dalam penelitian ini didasarkan pada data faktual alat ukur selama pengujian, bukan atas dasar spekulasi teoretis semata. Fakta eksperimen menunjukkan bahwa setiap kenaikan beban induktif sebesar 10% menyebabkan penurunan frekuensi rata-rata sebesar 0,5 Hz, sedangkan pada beban kombinasi terjadi fluktuasi transien sebelum mencapai kondisi tunak (steady state). Karakteristik penurunan nilai frekuensi yang lebih curam pada beban induktif ini secara faktual membuktikan perlunya sistem pengondisi kecepatan (governor) yang memiliki konstanta waktu lebih cepat ketika menyuplai jaringan kelistrikan dengan mayoritas beban motor listrik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih disampaikan kepada pihak-pihak yang telah mendukung terlaksananya penelitian ini.

REFERENCES

- [1] H. Setiawan, D. Prasetyo, and R. Nugroho, "Analisis kestabilan frekuensi pada generator sinkron akibat variasi beban," *J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 11, no. 2, pp. 85–92, 2021.
- [2] M. A. Maulana and A. Goeritno, "Pendugaan Kebutuhan Daya Listrik Berbantuan Metode Linearisasi Fungsi Nonlinear untuk Buku Produksi Sebuah Generator Oksigen," *Transm. J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 24, no. 4, pp. 153–161, 2022.
- [3] Z. Muna, Syahputra, Fauzan, and Julianto, "Studi Perubahan Beban Terhadap Rugi-Rugi Daya Output Generator Sinkron Tiga Phase 20 MW Pada Generator Turbin Gas Unit 2," *J. Tektro*, vol. 7, no. 1, pp. 112–117, 2023.
- [4] A. Hutasuhut, "Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator Kapasitas 12 MW dengan Metode Trial and Error," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. UMSU*, vol. 7, no. 2, pp. 140–148, 2024.
- [5] T. Yajima, "Resonant frequency modulation in inductive generator systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 39, no. 1, pp. 1269–1278, 2024.
- [6] A. Matthee, "Transient response of generator-based microgrids to load changes," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 66, no. 5, pp. 1646–1654, 2024.
- [7] Z. Qu, "Load frequency control optimization in multi-source systems," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 1–10, 2024.
- [8] T. Ezzeddine, "Reactive power and frequency control of induction generator systems," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 38, pp. 1–10, 2020.
- [9] X. Liang, "Load pattern modeling and frequency response in power systems," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1–12, 2024.
- [10] J. Ma, "Inductive energy storage generator performance analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 71, no. 12, pp. 15643–15653, 2024.
- [11] A. Derviškić, Y. Zuo, G. Frigo, and M. Paolone, "Under frequency load shedding based on PMU estimates of frequency and ROCOF," *IEEE*, 2018.
- [12] L. Wang and H. Zhang, "An Improved Frequency Response Model for Asynchronously Interconnected Power Systems Considering Voltage Changes Due to Load Variations," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 174, pp. 108–119, 2026.
- [13] J. D. Glover, T. J. Overbye, M. S. Sarma, and A. B. Birchfield, *Power System Analysis and Design*, 7th ed. Boston: Cengage Learning, 2022.
- [14] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2021.
- [15] H. Bevrani, *Robust Power System Frequency Control*, 3rd ed. Cham: Springer, 2021.