

DESAIN SISTEM KONTROL PADA MICROGRID UNTUK ANTISIPASI TERHADAP BEBAN *NON-LINEAR* SAAT *POWER SHARING*

Prestian Rindho Saputra ^{*)}, Trihastuti Agustinah dan Ardyono Priyadi

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

^{*)} E-mail: prezst@gmail.com

Abstrak

Penggunaan energi baru terbarukan dianggap menjadi solusi dalam mencegah efek terburuk dari kenaikan suhu. Pemerintah Indonesia menargetkan pencapaian bauran energi nasional dari Energi Baru Terbarukan (EBT) sebesar 23 % pada tahun 2025. Untuk itu diperlukan penambahan kapasitas pembangkit yang berasal dari energi baru terbarukan (EBT). Sistem microgrid adalah sistem kelistrikan dengan sumber dan beban listrik terdesentralisasi yang biasanya beroperasi, terhubung dan sinkron dengan sistem kelistrikan lainnya. Modifikasi teknik *power sharing* saat pola operasi paralel memungkinkan tercapainya pemenuhan kebutuhan energi saat terjadi perubahan beban *non-linear* pada sistem kelistrikan. Adapun metode dalam pengumpulan hasil percobaan ini menggunakan dengan sistem pendekatan model sumber EBT dan beban yang dikombinasikan dengan tegangan dan arus. Hasil penelitian pada simulasi Matlab/Simulink dengan kombinasi desain kontrol *power sharing* dan *sliding mode control* (SMC) menunjukkan bahwa saat adanya penambahan beban *non-linear*, nilai frekuensi terendah sebesar 49.983 Hz pada beban seimbang dan 49.982 Hz pada beban tidak seimbang. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini menunjukkan pada metode PI-LQR-SMC menunjukkan kinerja kontrol yang lebih baik daripada metode PI maupun PI-LQR.

Kata kunci: power sharing, paralel, sliding mode control

Abstract

The use of renewable energy is considered a solution to prevent the worst effects of temperature rise. The Indonesian government targets a national energy mix of 23% from renewable energy sources (RES) by 2025. To achieve this target, it is necessary to increase the capacity of power plants that use renewable energy sources. A microgrid system is an electrical system with decentralized power sources and loads that usually operate, connect and synchronize with other electrical systems. Modification of power sharing techniques during parallel operation patterns allows for the fulfillment of energy needs when nonlinear load changes occur in the electrical system. The method used in collecting the results of this experiment uses a model approach to RES and loads combined with voltage and current. The results of the study on Matlab/Simulink simulation with a combination of power sharing control design and sliding mode control (SMC) show that when there is an addition of nonlinear load, the lowest frequency value is 49.983 Hz for balanced load and 49.982 Hz for unbalanced load. The results obtained in this study show that the PI-LQR-SMC method shows better control performance than the PI and PI-LQR methods.

Keywords: power sharing, parallel, sliding mode control

1. Pendahuluan

Penggunaan sumber energi yang dapat diperbaharui dianggap sebagai solusi untuk mencegah dampak terburuk dari kenaikan suhu. Agar dapat memenuhi kebutuhan energi listrik yang terus meningkat, diperlukan peningkatan kapasitas energi dari sumber energi yang sudah ada dan pengembangan sumber energi baru. Banyak upaya pengembangan energi baru terbarukan (EBT) yang dilakukan.

Di Indonesia, sebagian besar peralatan listrik menggunakan arus AC. Oleh karena itu, untuk dapat menggunakan sumber energi yang berasal dari EBT

diperlukan kontroler untuk menjaga kestabilan proses konversi arus dari DC ke AC. Berbagai model matematika digunakan untuk mengidentifikasi masalah kontrol dan merancang strategi yang efektif untuk menyelesaikannya [1].

Pengaruh beban *non-linear* dalam sistem microgrid sangat mempengaruhi kestabilan sistem kelistrikan. Untuk itu diperlukan desain sistem kontrol yang andal untuk mengatasi perubahan beban yang ada dalam sistem. Beberapa metode untuk mengatasi kestabilan banyak dikembangkan baik dalam kondisi mode *on-grid* maupun *off-grid*. Implementasi yang dapat diterapkan salah satunya menggunakan kontrol optimal untuk menentukan sinyal

kontrol yang paling efektif dengan fungsi persamaan Ricatti [2].

Pada saat *power sharing*, untuk menjaga agar frekuensi sistem stabil digunakanlah teknik *droop control*, dimana teknik ini sangat membantu dalam perhitungan nilai frekuensi. Perhitungan nilai frekuensi pada sistem tersebut dijadikan sebagai acuan dalam menentukan sinyal kontrol sistem microgrid [3].

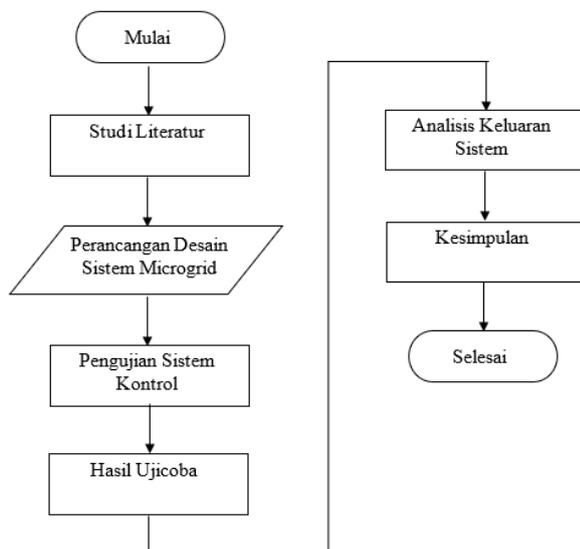
Sistem microgrid untuk operasi paralel dengan inverter tiga fase dapat dikendalikan dengan kontrol *droop* [4]-[9]. Namun masih ada kendala dalam kestabilan frekuensi sistem saat terjadi penambahan beban *non-linear* [10]. Maka diperlukan sebuah metode *Sliding Mode Control* (SMC) untuk menghilangkan distorsi arus dan tegangan pada sistem microgrid tiga fase [11]-[15].

Kombinasi desain kontrol optimal dengan *Sliding Mode Control* memungkinkan tercapainya kestabilan yang lebih tinggi saat terdapat penambahan beban *non-linear* pada sistem microgrid. Dalam makalah ini, perhitungan dengan model matematika disajikan dengan tujuan untuk mengembangkan sistem kontrol yang dapat meningkatkan kehandalan tegangan dengan menjaga nilai frekuensi yang sama pada masing-masing pembangkit EBT pada sistem microgrid. Oleh karena itu, dirancang sebuah simulasi menggunakan Matlab/Simulink sebagai upaya pertama untuk menganalisis konsep ini.

2. Sistem Kontrol Microgrid

2.1. Tahapan Penelitian

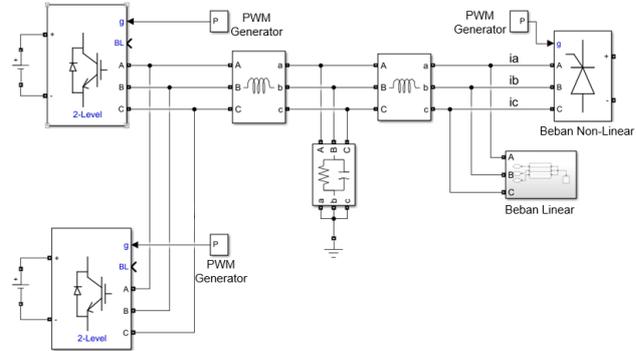
Proses pembuatan simulasi desain kontrol dari tahap awal sampai akhir akan dijelaskan pada diagram *flowchart* Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Flowchart (Kerangka Pemikiran)

2.2. Desain AC/DC Microgrid

Pada penelitian ini, sumber tegangan EBT dianggap ideal karena energinya langsung berupa tegangan DC. Selain itu, tidak ada komponen mekanik terkait inersia seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Rangkaian Operasi Paralel Sistem Microgrid.

Inverter bertugas melakukan transfer daya antara bus DC dan jaringan AC. Filter *low-pass* LCL diperlukan untuk pengukuran besaran arus pada microgrid (i_a, i_b, i_c).

Elemen pasif (induktor dan kapasitor) dianggap memiliki nilai yang sama untuk masing-masing fase. Oleh karena itu, representasi tiga fase dari elemen pasif ditunjukkan persamaan (1).

$$L_{ak} = I_k I_3, C_{ak} = c_k I_3 \quad (1)$$

$$V_{abc}^{Lak} = L_{ak} \frac{d}{dt} I_{abc}^{Lak} \quad (2)$$

$$I_{abc}^{Cak} = C_{ak} \frac{d}{dt} V_{abc}^{Cak} \quad (3)$$

di mana I_3 adalah matriks identitas orde 3, I_k dan c_k adalah nilai skalar komponen pasif di setiap fase. Metode transformasi Park $T_P(\theta)$ kemudian diterapkan pada persamaan (2) dan (3) untuk memperoleh kerangka acuan putar ortogonal (dq).

$$V_{dq}^{Lak} = T_P(\theta) L_{ak} \frac{d}{dt} (T_P(\theta)^{-1} I_{dq}^{Lak}) \quad (4)$$

$$I_{dq}^{Cak} = T_P(\theta) C_{ak} \frac{d}{dt} (T_P(\theta)^{-1} V_{dq}^{Cak}) \quad (5)$$

dimana θ mewakili kecepatan sumbu putar untuk fase yang ditentukan didalam framework, θ didefinisikan oleh ωt . Dengan demikian, $T_P(\theta)$ dikenal dengan transformasi Park. Akhirnya, persamaan (4) dan (5) diselesaikan menggunakan aturan $\theta = \omega t$ untuk mendapatkan model dq untuk setiap elemen pasif [2].

$$v_d^{lk} = -\omega l_k v_q^{lk} + l_k \frac{d}{dt} I_d^{lk} \quad (6)$$

$$v_q^{lk} = \omega l_k v_d^{lk} + l_k \frac{d}{dt} I_q^{lk} \quad (7)$$

$$i_d^{ck} = -\omega c_k v_q^{ck} + c_k \frac{d}{dt} V_d^{ck} \quad (8)$$

$$i_q^{ck} = \omega c_k v_d^{ck} + c_k \frac{d}{dt} V_q^{ck} \quad (9)$$

Sistem microgrid ini secara matematis diwakili oleh model *state-space* yang diberikan dalam persamaan (10) dan (12)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d^{L1} \\ I_d^{L2} \\ v_d^c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} I_d^{L1} \\ I_d^{L2} \\ v_d^c \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ L_1 \\ 0 \end{bmatrix}}_B u_d \quad (10)$$

$$y_1 = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_c \begin{bmatrix} I_d^{L1} \\ I_d^{L2} \\ v_d^c \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_q^{L1} \\ I_q^{L2} \\ v_q^c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} I_q^{L1} \\ I_q^{L2} \\ v_q^c \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ L_1 \\ 0 \end{bmatrix}}_B u_q \quad (12)$$

$$y_2 = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_c \begin{bmatrix} I_q^{L1} \\ I_q^{L2} \\ v_q^c \end{bmatrix} \quad (13)$$

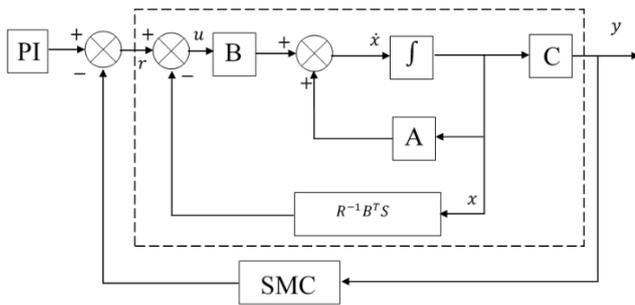
dimana u_d dan u_q mewakili komponen dq dari sumber tegangan input.

Penerapan metode *states-feedback* akan meningkatkan respons terhadap input step. Representasi hukum kontrol baru dan sistem dinamika turunan dijelaskan oleh persamaan (14) dan (15).

$$u(t) = r(t) - K \cdot x(t) \quad (14)$$

$$\dot{x}(t) = (A - BK) \cdot x(t) + B \cdot r(t) \quad (15)$$

dimana $u(t)$ adalah input sistem, $r(t)$ adalah sinyal keluaran kontroler PI, dan K mewakili state feedback gain. Diagram *full state feedback* ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Full State Feedback LQR-Controller untuk Sistem Microgrid.

Selain itu, cost function yang diperlukan oleh algoritma LQR untuk mendapatkan parameter kontrol yang optimal didefinisikan sebagai berikut,

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (16)$$

dimana $Q \geq 0$, $R > 0$ adalah matriks semi-definit positif. Q adalah state matrix, dan R menyatakan actuator effort. Cost function J tergantung pada kendala constraint sistem berikutnya,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (17)$$

dimana $x(t)$ dan $u(t)$ adalah vektor $\in \mathbb{R}^n$. Dengan demikian, input sistem dan vektor keadaan secara teoritis dihitung sebagai berikut.

$$u(t) = -Kx(t) \quad (18)$$

$$K = R^{-1} B^T P \quad (19)$$

Masalah optimisasi LQR diselesaikan dengan persamaan aljabar Riccati,

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (20)$$

Tabel 1. Parameter Model Microgrid

Parameter	Value	Units
Tegangan DG (V_{DC} Gambar 2)	800	[V]
Filter Induktansi	2	[mH]
Filter Kapasitansi	60	[μ F]
Filter Resistansi	5.37	[Ω]
Beban Seimbang 3-phase linear	10/10/10	[Ω]
Beban Tidak Seimbang 3-phase linear	15/10/5	[Ω]
Nilai Frekuensi	50	[Hz]

2.3. Desain Sliding Mode Control

Untuk mendesain *Sliding Mode Control*, digunakan fungsi G dan $T(t)$ sebagai berikut:

$$S(t, x(t)) = G((x(t) - x_0) - T(t)) \quad (21)$$

$$T(t) = \int_0^t (A + BR^{-1}B^T P)x(t') dt' \quad (22)$$

dimana $S(t, x)$ sebagai fungsi *sliding mode*, $G \in R^{m \times n}$ merupakan matrix yang tidak unik, yang harus memenuhi *non-singularity* terhadap G dan B , sedangkan untuk keadaan awal $S(0, x_0) = 0$, sehingga menjadi

$$\frac{d}{dt} S(t, x(t)) = G(\dot{x}(t) - Ax(t) + BR^{-1}B^T Px(t)) \quad (23)$$

$$\frac{d}{dt} S(t, x(t)) = G(Ax(t) + Bu(t) - Ax(t) + BR^{-1}B^T Px(t)) \quad (24)$$

$$\frac{d}{dt} S(t, x(t)) = GB(u(t) + R^{-1}B^T Px(t)) \quad (25)$$

untuk $\frac{d}{dt} S(t, x(t)) = 0$, maka diperoleh

$$u(t)_{nom} = -R^{-1}B^T P \quad (26)$$

Pengujian kestabilan, digunakan Lyapunov function sesuai persamaan berikut.

$$u(t)_{unc} = -F^{-1}(\mu + \gamma_0 \|F\| + \gamma_1 \|F\| \|x\|) \text{sgn}(S) \quad (27)$$

$$F = GB \quad (28)$$

dimana μ adalah konstanta positif. Untuk fungsi saturasi menggunakan sgn . Maka diperoleh evaluasi kestabilan berikut.

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (29)$$

kemudian

$$\frac{d}{dt} V = \dot{V} = S^T \frac{dS}{dt} = S^T G (\dot{x}(t') - Ax(t')) \quad (30)$$

dilakukan beberapa penyederhanaan sebagai berikut.

$$\frac{d}{dt} V = \dot{V} = S^T S = S^T G (\dot{x}(t') - Ax(t')) + S^T GBR^{-1}B^T Px(t') \quad (31)$$

$$= S^T G(Ax(t) + Bu(t) - Ax(t)) + S^T G(x)BR^{-1}B^T Px(t') \quad (32)$$

$$= S^T GBu(t) + S^T GBR^{-1}B^T Px(t') \quad (33)$$

selanjutnya substitusi persamaan (34) dengan (27)

$$= S^T G(-B)u(t)_{unc} \quad (34)$$

$$= -\mu \|S\|_1 + S^T G - (\gamma_0 \|F\| + \gamma_1 \|F\| \cdot \|x\|) \|S\|_1 \leq -\mu \|S\|_1 + \|F\| \cdot \|S\| - (\gamma_0 \|F\| + \gamma_1 \|F\| \cdot \|x\|) \|S\|_1 \leq -\mu \|S\|_1 + \|F\| \cdot \|S\| (\gamma_0 + \gamma_1 \|x\|) - (\gamma_0 \|F\| + \gamma_1 \|F\| \cdot \|x\|) \|S\|_1 \quad (35)$$

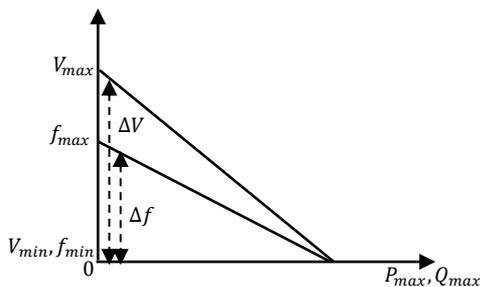
disederhanakan menjadi

$$\frac{d}{dt} V = \dot{V} \leq -\mu \|S\|_1 + \|F\| \cdot \|S\| (\gamma_0 + \gamma_1 \|x\|) (\|S\| - \|S\|_1) \quad (36)$$

dimana $\|S\|_1$ adalah urutan pertama dari sliding surface. Jika $\|S\| < \|S\|_1$ dapat dipastikan turunan pertama dari fungsi Lyapunov menjadi negative ($\dot{V} \leq 0$).

2.4. Konsep Droop Control

Dasar penggunaan *droop control* pada operasi paralel inverter adalah adanya perubahan frekuensi seiring dengan berkurang dan bertambahnya beban. Karakteristik teknik *droop control* mengikuti perubahan beban inverter sumber tegangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Karakteristik Droop Control.

Hubungan antara daya aktif dan frekuensi dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut:

$$f = f_0 + K_{pf}(P_0 - P) \quad (37)$$

Sedangkan untuk daya reaktif dan tegangan ditulis dalam persamaan sebagai berikut:

$$V = V_0 + K_{QV}(Q_0 - Q) \quad (38)$$

dimana,

f_0 : nilai frekuensi pada DG unit

V_0 : nilai tegangan pada DG unit

P_0, Q_0 : daya aktif dan daya reaktif pada inverter.

K_{pV}, K_{QV} : koefisien droop

Koefisien droop pada inverter dapat dinyatakan:

$$K_P = \frac{\Delta f}{P_{max}} \quad (39)$$

$$K_Q = \frac{\Delta V}{Q_{max}} \quad (40)$$

dimana,

P_{max}, Q_{max} : nilai maximum daya aktif dan daya reaktif pada inverter

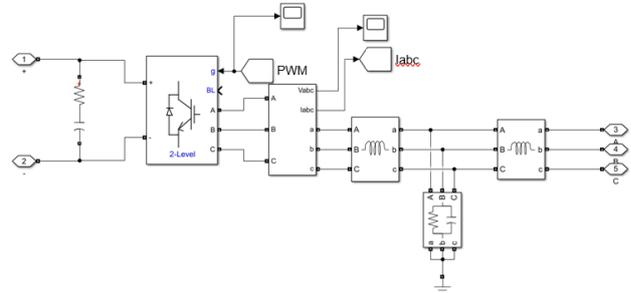
Δf : maksimum frekuensi

ΔV : maksimum perubahan tegangan

Ketika lebih banyak unit DG terhubung ke inverter paralel, pembagian daya beban tergantung pada karakteristik *droop*. Konsep dari karakteristik droop adalah ketika beban meningkat, maka frekuensi mengikuti nilai referensi.

2.5. Perancangan Simulasi Inverter

Hasil perancangan simulasi inverter *off-grid* menggunakan kontroler dengan menggunakan *software* Matlab ditunjukkan pada Gambar 5.



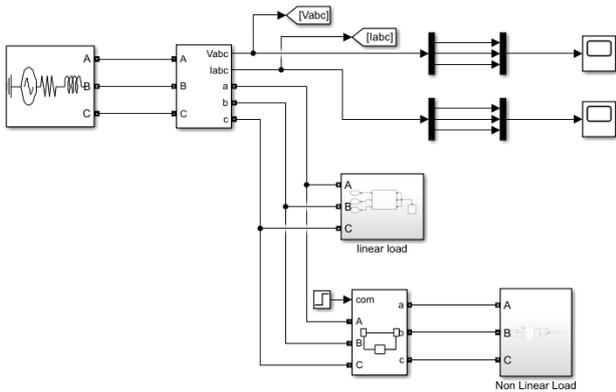
Gambar 5. Simulasi Inverter Menggunakan Matlab

Inverter adalah salah satu komponen utama pada sistem Microgrid yang berfungsi untuk menghasilkan daya yang dapat dikonsumsi oleh beban-beban yang ada. *Inverter* berperan untuk mengubah energi listrik DC menjadi AC untuk disuplai ke arah beban. Oleh karena itu, *inverter*

beserta sistem kendali untuk menghasilkan AC yang diinginkan merupakan hal yang esensial pada sistem Microgrid.

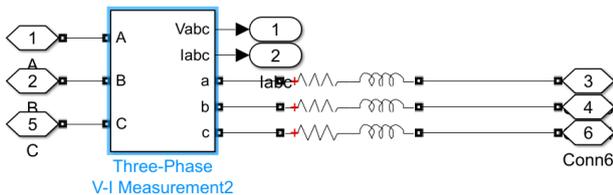
2.6. Perancangan Simulasi Beban

Pada simulasi ini menggunakan dua jenis beban, yaitu beban *linear* dan beban *non-linear*. Dalam perancangan sistem ini, beban *linear* akan dioperasikan terlebih dahulu, kemudian dilakukan penambahan beban *non-linear* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



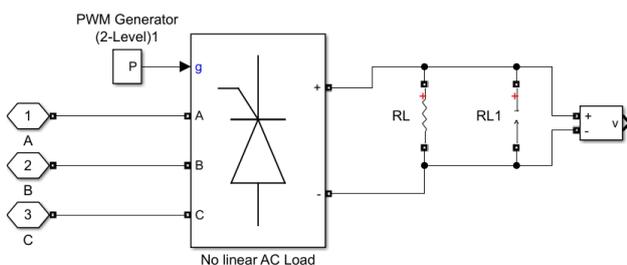
Gambar 6. Rangkaian Simulasi Model Beban.

Untuk melihat detail dari subsistem beban *linear* ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Simulasi Beban *Linear* Menggunakan Matlab

Sedangkan detail dari subsistem beban *non-linear* ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Simulasi Beban *Non-Linear* Menggunakan Matlab

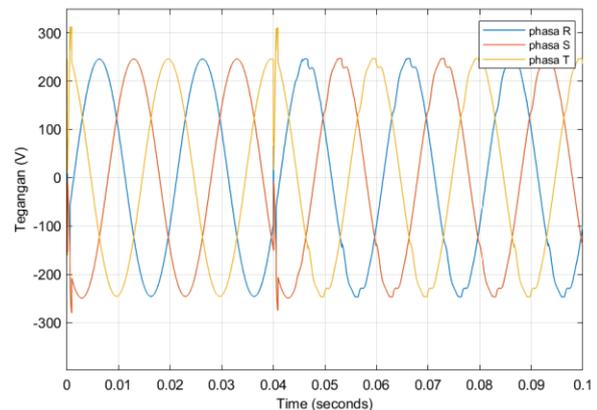
Beban *linear* adalah beban yang nilai impedansinya konstan dan arus selalu berbanding lurus dengan tegangan setiap waktunya. Sedangkan pada beban *non-linear* nilai impedansinya tidak konstan dan arus tidak selalu berbanding lurus dengan tegangan setiap waktunya.

3. Hasil dan Pembahasan

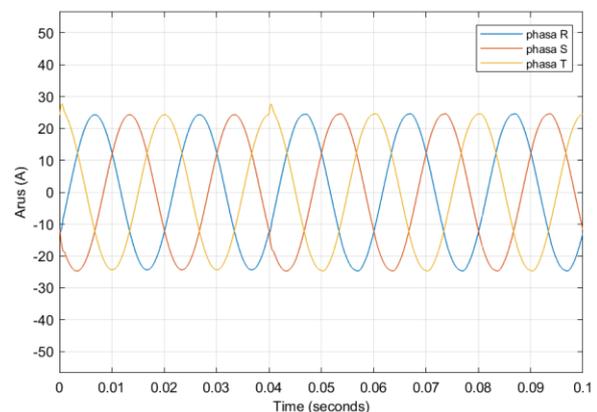
Setelah merancang kontroler, langkah selanjutnya adalah menguji apakah kontroler yang sudah dirancang dapat bekerja dengan baik atau tidak. Untuk itu, perlu dilakukan simulasi pada sistem sebenarnya dengan tujuan untuk menguji apakah kontroler dapat mengatasi perubahan beban *non-linear* yang ada pada sistem. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab R2021b pada makalah ini.

3.1. Pengujian Karakteristik Beban

Dua simulasi dilakukan dalam pengujian ini, yaitu dengan beban seimbang dan beban tidak seimbang. Karakteristik model simulasi beban seimbang ditunjukkan pada Gambar 9.



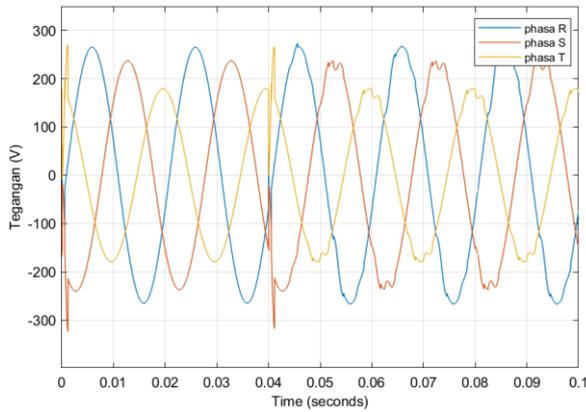
(a)



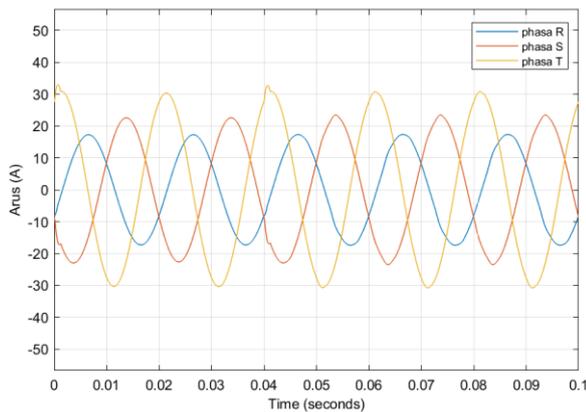
(b)

Gambar 9. Hasil Keluaran pada Pengujian Beban Seimbang: a) Tegangan Beban; b) Arus Beban.

Untuk hasil pengujian model beban tidak seimbang ditunjukkan pada Gambar 10, terlihat bahwa grafik tegangan dan arus mengalami perbedaan amplitudo.



(a)



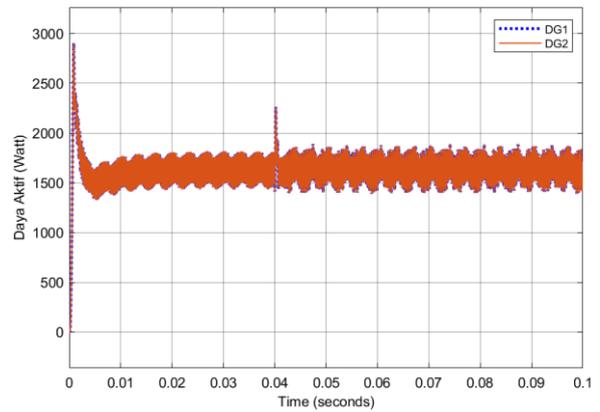
(b)

Gambar 10. Hasil Keluaran pada Pengujian Beban Tidak Seimbang: a) Tegangan Beban; b) Arus Beban.

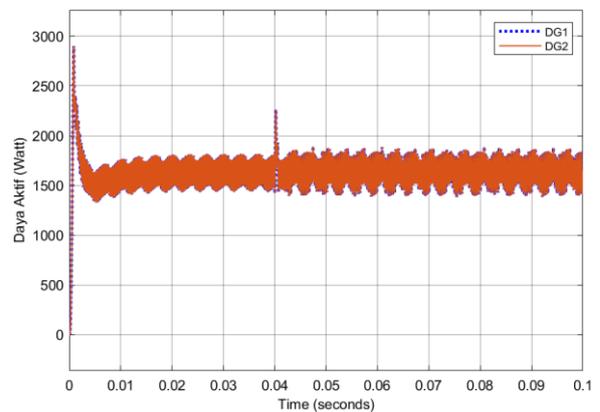
Pada pengujian karakteristik beban *non-linear*, digunakan skenario di mana terdapat perubahan beban dari beban *linear* ke beban *non-linear* pada detik ke 0.04. Untuk hasil keluaran beban seimbang, terlihat adanya bentuk gelombang sinusoidal pada tegangan yang tidak rata seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 (a). Sedangkan untuk beban tidak seimbang, terlihat bentuk gelombang sinusoidal pada tegangan yang tidak rata dan memiliki amplitudo yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10 (a).

3.2. Pengujian Daya Keluaran Dengan Beban Seimbang

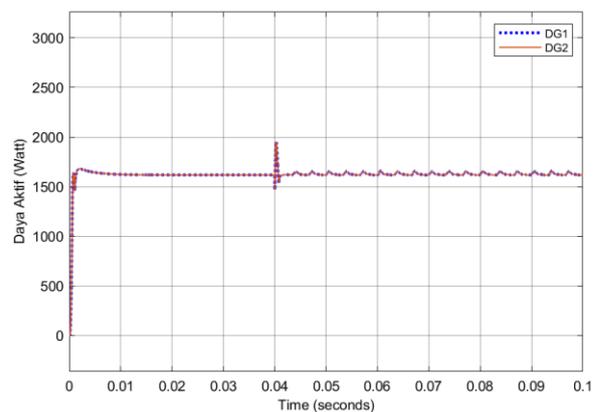
Proses pengujian keluaran daya aktif dan daya reaktif menggunakan simulasi dengan kondisi beban awal seimbang, kemudian ditambahkan beban *non-linear* ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12.



a)



b)

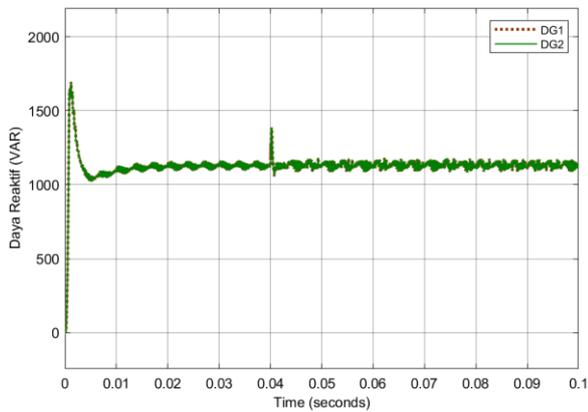


c)

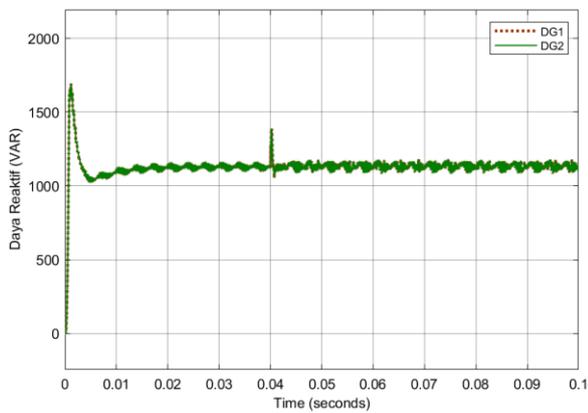
Gambar 11. Hasil Keluaran Daya Aktif Beban Seimbang Menggunakan Kontroler: a) PI; b) PI-LQR; c) PI-LQR-SMC.

Pada percobaan simulasi operasi paralel DG menggunakan beberapa metode kontrol terlihat bahwa keluaran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada masing-masing DG terlihat sama ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12. Adanya perubahan beban dari beban *linear* ke beban *non-linear* di

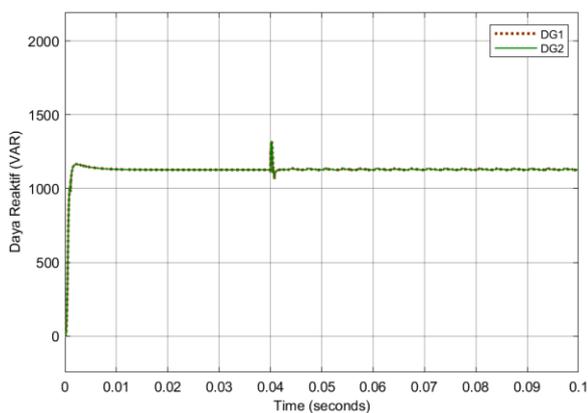
detik ke 0.04 dapat terkendali dengan baik distribusi daya aktif dan daya reaktifnya.



a)



b)



c)

Gambar 12. Hasil Keluaran Daya Reaktif Beban Seimbang Menggunakan Kontroler: a) PI; b) PI-LQR; c) PI-LQR-SMC.

Tabel 2. Perbandingan Respon Sistem Daya Aktif dengan Beberapa Metode Kontrol pada Beban Seimbang.

Metode	Rise Time (s)	Overshoot (%)	Settling Time (s)	Peak (Watt)	RMS (Watt)
PI	0.000034899	286.57	0.006044	2903	1628
PI-LQR	0.000034936	293.20	0.005678	2900	1628
PI-LQR-SMC	0.000324495	3.90	0.004790	1950	1622

Tabel 3. Perbandingan Respon Sistem Daya Reaktif dengan Beberapa Metode Kontrol pada Beban Seimbang

Metode	Rise Time (s)	Overshoot (%)	Settling Time (s)	Peak (VAR)	RMS (VAR)
PI	0.000348659	50.758	0.019922	1695	1129
PI-LQR	0.000348536	50.758	0.019914	1694	1129
PI-LQR-SMC	0.000682502	3.192	0.003258	1322	1127

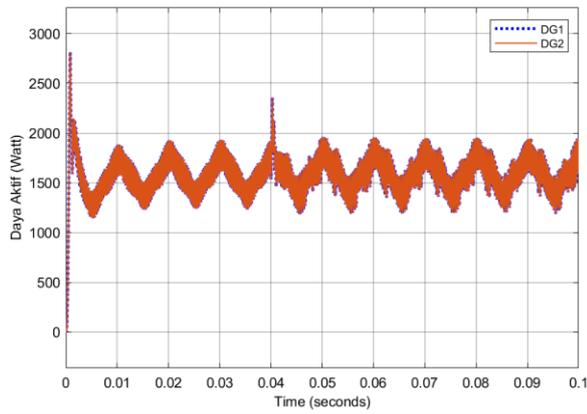
Dari ketiga metode kontrol yang dilakukan pengujian terlihat pada respon daya aktif nilai overshoot kontrol PI-LQR-SMC paling kecil dibanding metode kontrol lainnya yaitu sebesar 3.90 % dengan nilai puncak pada daya 1950 Watt terlihat pada Tabel 2. Sedangkan untuk daya reaktif nilai overshoot paling kecil sebesar 3.192 % untuk metode kontrol menggunakan PI-LQR-SMC dimana ditunjukkan pada Tabel 3.

3.3. Pengujian Daya Keluaran Dengan Beban Tidak Seimbang

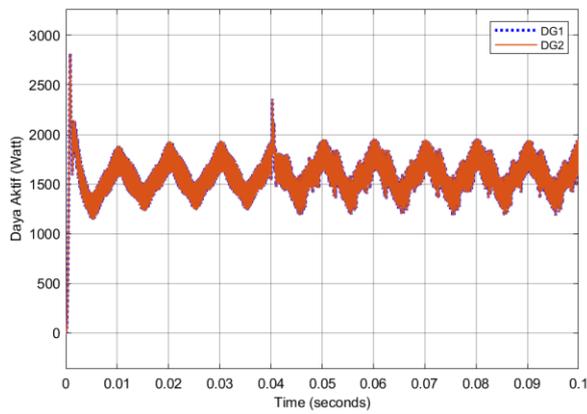
Proses pengujian keluaran daya aktif dan daya reaktif dilakukan dengan menggunakan simulasi yang memperlihatkan kondisi beban awal yang tidak seimbang, kemudian ditambahkan beban *non-linear* seperti yang terlihat pada Gambar 13 dan 14.

Hasil simulasi operasi paralel DG menggunakan beberapa metode kontrol, keluaran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada masing-masing DG terlihat pada Gambar 13 dan 14. Perubahan beban dari beban *linear* ke beban *non-linear* di detik ke 0.04 dapat terkendali dengan baik untuk distribusi daya aktif dan daya reaktifnya pada semua metode kontrol.

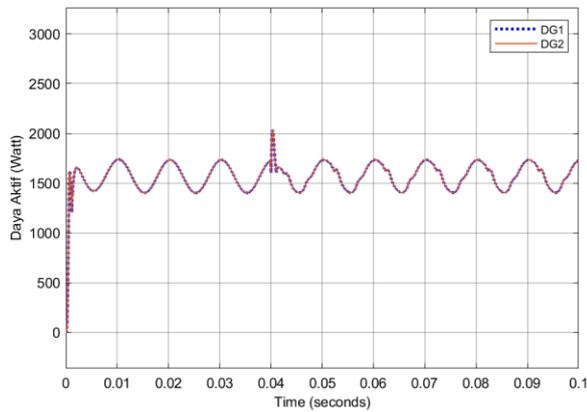
Dari pengujian yang dilakukan pengujian menggunakan metode kontrol yang ada, terlihat pada respon daya aktif nilai overshoot kontrol PI-LQR-SMC paling kecil dibanding metode kontrol lainnya sebesar 14.92 % dengan nilai saat overshoot pada daya 1895 Watt terlihat pada Tabel 4. Untuk daya reaktif nilai overshoot paling kecil sebesar 2.149 % pada nilai 1212 VAR untuk metode kontrol menggunakan PI-LQR-SMC sesuai pada Tabel 5.



a)

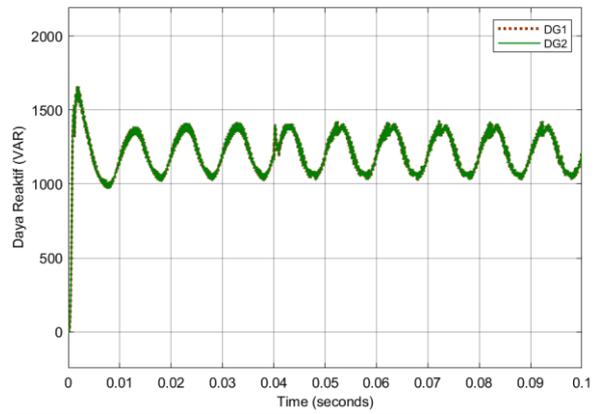


b)

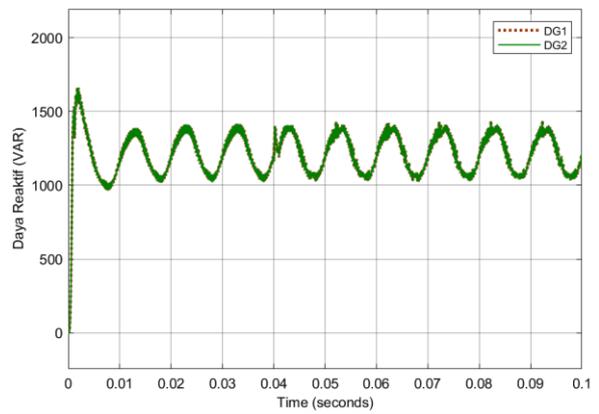


c)

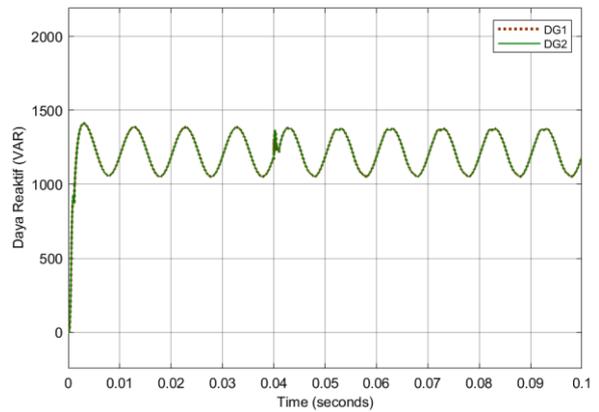
Gambar 13. Hasil Keluaran Daya Aktif Beban Tidak Seimbang Menggunakan Kontroler: a) PI; b) PI-LQR; c) PI-LQR-SMC.



a)



b)



c)

Gambar 14. Hasil Keluaran Daya Reaktif Beban Tidak Seimbang Menggunakan Kontroler: a) PI; b) PI-LQR; c) PI-LQR-SMC.

Tabel 4. Perbandingan Respon Sistem Daya Aktif dengan Beberapa Metode Kontrol pada Beban Tidak Seimbang.

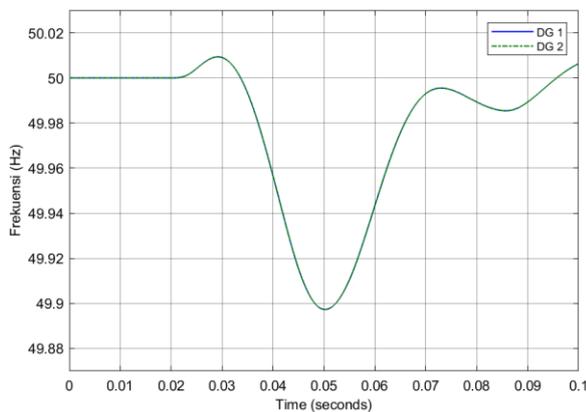
Metode	Rise Time (s)	Overshoot (%)	Peak (Watt)	RMS (Watt)
PI	0.000993033	81.45	2814	1164
PI-LQR	0.000054246	58.93	2814	1164
PI-LQR-SMC	0.002285000	14.92	1895	1153

Tabel 5. Perbandingan Respon Sistem Daya Reaktif dengan Beberapa Metode Kontrol pada Beban Tidak Seimbang.

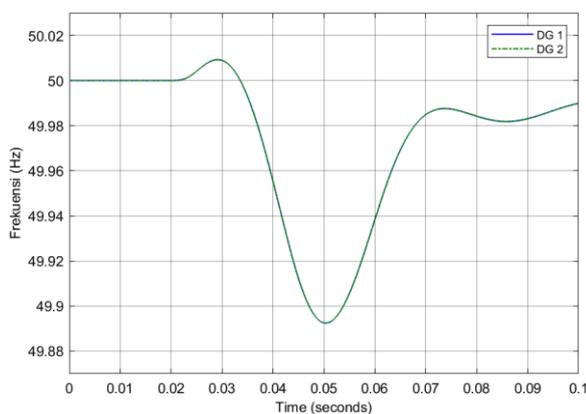
Metode	Rise Time (s)	Overshoot (%)	Peak (VAR)	RMS (VAR)
PI	0.002129000	19.9	1337	840
PI-LQR	0.002129000	19.447	1336	840
PI-LQR-SMC	0.002578000	2.149	1212	838

3.4. Pengujian Frekuensi Beban Seimbang Saat Operasi Paralel

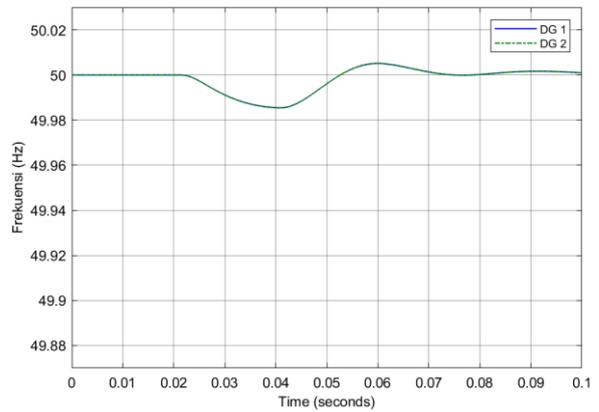
Pengujian frekuensi yang dilakukan dengan simulasi beban awal seimbang kemudian ditambahkan beban *non-linear* ditunjukkan pada Gambar 15.



a)



b)



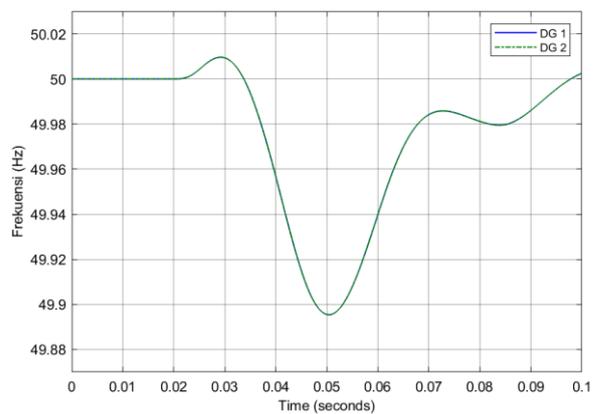
c)

Gambar 15. Hasil Keluaran Frekuensi Beban Seimbang Menggunakan Kontroler: a) PI; b) PI-LQR; c) PI-LQR-SMC.

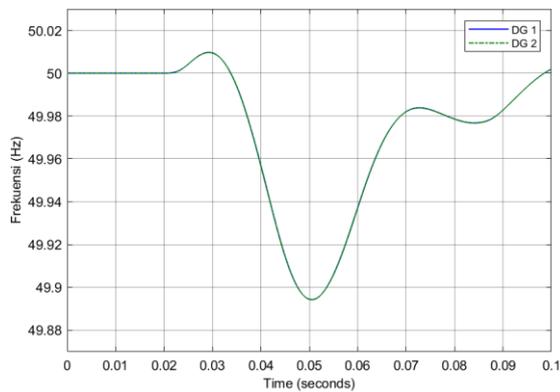
Pada pengujian operasi paralel menggunakan berbagai macam metode kontrol, terlihat bahwa nilai frekuensi yang ditunjukkan kontroler PI-LQR-SMC memberikan nilai respon yang lebih stabil untuk mengatasi perubahan beban *non-linear* pada beban seimbang dengan nilai terendah sebesar 49.983 Hz ditunjukkan pada Gambar 15 c). Nilai tersebut didapatkan setelah dilakukan penambahan beban *non-linear* pada detik ke 0.04.

3.5. Pengujian Frekuensi Beban Seimbang Saat Operasi Paralel

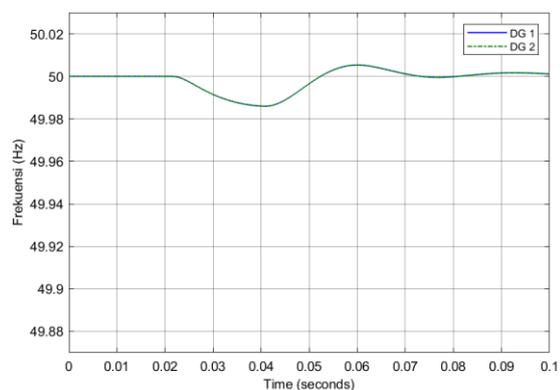
Pengujian frekuensi dilakukan dengan menggunakan simulasi yang memperlihatkan kondisi beban awal yang seimbang, kemudian ditambahkan beban *non-linear* seperti yang terlihat pada Gambar 16.



a)



b)



c)

Gambar 16. Hasil Keluaran Frekuensi Beban Tidak Seimbang Menggunakan Kontroler: a) PI; b) PI-LQR; c) PI-LQR-SMC.

Hasil pengujian operasi paralel menggunakan berbagai macam metode kontrol, memperlihatkan nilai frekuensi yang dihasilkan oleh kontroler PI-LQR-SMC memberikan respon sistem yang lebih stabil saat dilakukan penambahan beban *non-linear* pada detik ke 0.04. Nilai terendah yang ditunjukkan adalah sebesar 49.982 Hz sesuai pada Gambar 16 c).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan selama penelitian ini, terdapat beberapa kesimpulan yang dapat diambil untuk dianalisa. Overshoot pada pengujian beban seimbang dengan perubahan *non-linear*, kontroler PI-LQR-SMC dihasilkan nilai overshoot terendah daripada kontroler PI dan PI-LQR sebesar 3.90 % untuk daya aktif dan 3.192 % untuk daya reaktif. Perubahan beban *non-linear* pada simulasi beban tidak seimbang dapat dikendalikan dengan kontroler PI-LQR-SMC dengan nilai overshoot sebesar 14.92 % untuk daya aktif dan 2.149 % untuk daya reaktif. Hasil Uji Frekuensi power sharing pada beban seimbang, didapatkan nilai 49.983 Hz yang terjadi pada kontroler PI-LQR-SMC. Frekuensi pada beban tidak

seimbang untuk metode kontroler PI-LQR-SMC didapatkan nilai sebesar 49.982 Hz untuk pencapaian pada titik frekuensi sistem terendah selama pengujian. Dari hasil pengambilan data dapat disimpulkan bahwa kontroler PI-LQR-SMC mampu mengantisipasi perubahan beban *non-linear* lebih baik daripada kontroler PI dan kontroler PI-LQR.

Referensi

- [1]. K. Aseem, S. S. Kumar, "A PWM-based Sliding Mode Control Scheme for Isolated Solar Photovoltaic Systems," *Journal of The Institution of Engineers (India):Series B*, 103, 313–328, 2021.
- [2]. H. V. Gerardo, R. M. Luis, T. Guillermo, M. L. Jose, A. I. Mario and G. A. Juan, "Hybrid LQR-PI Control for Microgrids under Unbalanced Linear and Nonlinear Loads," *Mathematics* 2020, 8, 1096, 2020.
- [3]. W. Jasmine, and J. Belwin, "Integrated renewable energy sources with droop control techniques-based microgrid operation," *Woodhead Publishing Series in Energy*, 39-60, 2018; <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102493-5.00003-0>
- [4]. Z. Yao, Z. Fan, Q. Yu and Z. Pengfei, "Analysis of Three-Phase Inverter Parallel Operation with Network-Based Control Having Strong Robustness and Wide Time-Scale Compatibility in Droop-Controlled AC Microgrid," *Electronics* 2020, 9,376, 2020.
- [5]. G. Eva, R. Enrique, R. Carlos, R. Mercedes, B. Fermin, I. Maria and M. Antonio, "Secondary Control for Storage Power Converters in Isolated Nanogrids to Allow Peer-to-Peer Power Sharing," *Electronics* 2020, 9,140, 2020.
- [6]. V. Onkar, D. Suryanarayana and B. G. Fernandes, "Simple Controller Configuration for Decentralized Parallel Operation of Inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34, 1356 – 1369, 2018.
- [7]. S. Yanu, Y. Mochtar, "Model Simulasi Praktikum Pengukuran Power Faktor Berbasis Matlab/Simulink," *Jurnal Sistem Telekomunikasi Elektronika Sistem Kontrol Power Sistem & Komputer*, Vol. 1 / No. 2. 2021.
- [8]. A. Yuli, P. Marlin, F. Rizana dan S. Agus, "Performansi Grid Tie Inverter dengan Variasi Pembebanan pada PV-on Grid Module Trainer," *Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, Vol. 10(2), Hal.287–296, 2021.
- [9]. S. A. Fahad, "DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 36154 – 36172, 2021.
- [10]. L. Peng, G. Tianyu, Z. Fengquan, Y. Jiaxuan, L. Yang, "Nonlinear coordinated control of parallel bidirectional power converters in an AC/DC hybrid microgrid," *Electrical Power and Energy Systems*, 122, 106208, 2020.
- [11]. D. Chaoliang, T. Xiangqian and S. Weizhang, "Sliding-Mode Control in dq-Frame for a Three-Phase Grid-Connected Inverter with LCL-Filter," *Journal of the Franklin Institute*, 357, 10159-10174, 2020.
- [12]. A. Ali, "Park and Clark Transformations Park and Clark Transformations: A Short Review," *Researchgate*, 2020.
- [13]. K. E. Malleh, C. D. Elhak and S. Lassaad, "A Control Strategy for a Three-Phase Grid Connected PV System under Grid Faults," *Electronics* 2019, 8, 906, 2019; doi:10.3390/electronics8080906.

- [14]. X. Lingling, H. Jiajia, T. Enkun, H. Fangzheng and L. Zhipei, "The Stability Criterion and Stability Analysis of Three-Phase Grid-Connected Rectifier System Based on Gerschgorin Circle Theorem", *Electronics* 2022, vol. 11, 3270, 2022.
- [15]. Y. Xinghuo, F. Yong and M. Zhihong, "Terminal Sliding Mode Control-An Overview," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 2, pp. 36-52, 2020.