

DESAIN KONTROL NONLINIER UNTUK SISTEM *HYBRID MICROGRID* DENGAN SUMBER ENERGI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

Panji Setyo Suharso ^{*}), Trihastuti Agustinah dan Ardyono Priyadi

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

^{*}Penulis korespondensi, E-mail: setyopanji23@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini berfokus mendesain suatu sistem kontrol untuk menyelesaikan permasalahan nonlinier pada sistem suplai tenaga listrik melibatkan sumber PV (*Photovoltaic*) yang terhubung melalui *microgrid* ke sumber *grid*. Perubahan konsumsi beban pelanggan pada sistem suplai akan mengganggu konsistensi tegangan dan frekuensi suplai. Makalah ini mengusulkan metode *input-output linearization* untuk desain sistem kontrol yang mampu menjaga nilai tegangan dan frekuensi pada nilai konstan. Modifikasi model nonlinier dari persamaan dinamika sistem *microgrid* dilakukan berdasarkan teori *lie derivative*, model persamaan nonlinier diturunkan sampai persamaan *output* mendapatkan nilai *u* (*input control*). Nilai *u* yang didapat dari modifikasi persamaan sistem tersebut digunakan untuk mendesain sistem kontrol, kemudian nilai *u* dengan menggunakan metode *feedback linearization* akan digunakan untuk mencari nilai *gain* yang sesuai namun sebelumnya dilakukan terlebih dahulu transformasi koordinat untuk mencari nilai matriks A dan B sehingga bentuk model nonlinier dapat ditransformasikan menjadi bentuk linier. Hasil modifikasi yang dilakukan menghasilkan sistem kontrol yang mampu mempertahankan suplai dengan parameter tegangan 238 V AC dan frekuensi 50 Hz (*overshoot* 6 %) sehingga kebutuhan daya pada sistem suplai tenaga listrik dapat terpenuhi.

Abstract

This research focuses on designing a control system to solve nonlinear problems in the power supply system involving PV (photovoltaic) sources connected through microgrids to grid sources. Changes in customer load consumption in the supply system will disrupt the consistency of voltage and frequency supply. This paper proposes an input-output linearization method for designing a control system that can maintain the values of voltage and frequency at a constant value. Modification of the nonlinear model of the microgrid system's dynamic equation is carried out based on the Lie derivative theory; the nonlinear equation model is derived until the output equation obtains a value of u (control input). The value of u obtained from the modification of the system equation is used to design a control system. Then the value of u using the feedback linearization method will be used to find the appropriate gain value, but before that, coordinate transformation is carried out first to find matrix A and B values so that the nonlinear model form can be transformed into linear form. The modification results produced a control system that can maintain supply with voltage parameters of 238 V AC and a frequency of 50 Hz (overshoot 6%) so that power needs in the power supply system can be fulfilled.

Keywords: Photovoltaic, input-output linearization, nonlinear, microgrid, feedback linearization, voltage, frequency.

1. Pendahuluan

Penelitian pada bidang *microgrid* telah banyak dilakukan, ada berbagai metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan nonlinier pada sistem kontrol *microgrid*. Pada penelitian [1] menampilkan metodologi penyelesaian nonlinier dengan teori *input-output* dan optimasi namun belum memasukan parameter dari tegangan dan arus pada sumber seperti *photovoltaic* dan sebagainya, hal ini ditunjukkan oleh persamaan *state* yang hanya memasukan dinamika inverter saja. Kemudian di penelitian [2] untuk bagian *photovoltaic* sebagai sumber yang terhubung dengan sistem *grid* besar fokus merancang MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) sehingga didapatkan

power maksimal dari sumber *photovoltaic* sedangkan kestabilan suplai pada sistem hanya menggunakan Pengontrol PI sehingga hasil kurang maksimal ditunjukkan oleh tegangan keluaran sistem. Selanjutnya pada penelitian [5] lebih membahas tentang model persamaan deferensial, menggunakan Teori *Lie Derivative* untuk linierisasi dan evaluasi terhadap kestabilan dari model persamaan sistem. Namun pengujian ketika *photovoltaic* terhubung ke sistem *grid* tidak dilakukan.

Penambahan parameter sumber berbasis energi baru dan terbarukan menjadi tantangan tersendiri dalam mengembangkan *microgrid* di masa depan [1]-[5]. Perancangan sistem kontrol yang dapat mengintegrasikan

antara sumber seperti *Photovoltaic* (PV) dan sistem *grid* melalui *microgrid* menjadi sebuah inovasi baru yang dapat diupayakan agar di masa depan energi hijau yang ramah lingkungan dapat mengambil peranan besar dalam memenuhi kebutuhan listrik masyarakat.

Penelitian ini mengusulkan metode untuk mendesain suatu sistem kontrol dalam mengatasi permasalahan nonlinier dari dinamika *microgrid* [1],[2] menggunakan metode heuristic nonlinier diharapkan dapat lebih akurat dalam mendesain sistem kontrol. Penambahan parameter *photovoltaic* yang menjadi salah satu sumber, mengakibatkan parameter tegangan dan arus dari PV tersebut mempengaruhi dinamika sistem. Desain model *input – output* digunakan untuk melinierisasi bentuk dari persamaan *state* sistem [1]-[5].

Berdasarkan latar belakang tersebut maka pada penelitian ini akan digunakan metode *input – output linearization* yang bertujuan untuk melinierisasi model nonlinier dengan menurunkan *state equation* sehingga didapat nilai u untuk setiap persamaan *state* [1]-[3]. Hasil akhirnya didapatkan sistem kontrol yang mampu memaksimalkan penggunaan PV dengan parameter tegangan dan frekuensi yang konstan meskipun terjadi perubahan kebutuhan daya [4]-[15].

2. Metode

2.1. Desain Sistem Kontrol DC/AC Microgrid

Konfigurasi *Microgrid* (MG) yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem secara keseluruhan merupakan gabungan dari tiga perangkat yang saling terintegrasi satu sama lain. Perangkat pertama adalah *AC/DC Inverter* yang berfungsi untuk menyeimbangkan daya antara *Bus AC* dan *Bus DC*. Model persamaan sebagai berikut [5]:

$$L_c \frac{di_{cq}}{dt} = -\omega L_c i_{cd} - R_c i_{cq} + u_{cq} v_{dc} - v_{cq} \quad (1)$$

$$L_c \frac{di_{cd}}{dt} = -R_c i_{cd} + \omega L_c i_{cq} + u_{cd} v_{dc} - v_{cd} \quad (2)$$

$$3C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{Lpv} - u_{cd} i_{cd} - u_{cd} i_{cq} + u_{LB} i_{LLB} - i_{cd} - i_{opv} - i_{oLB} \quad (3)$$

Nilai u_{cd} dan u_{cq} yang merupakan tegangan pada *link AC – DC* berubah terhadap waktu [1]-[5]. Kemudian berikutnya terdapat model dari *Boost and Buck DC/DC Converter* [5].

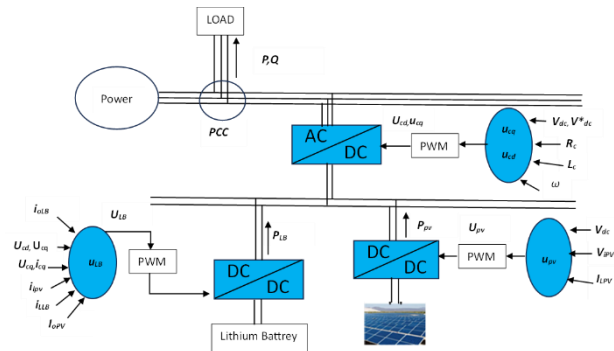
$$L_{pv} \frac{di_{Lpv}}{dt} = -v_{dc} + u_{pv} v_{ipv} \quad (4)$$

$$C_{ipv} \frac{dv_{ipv}}{dt} = -u_{pv} i_{Lpv} i_{ipv} \quad (5)$$

Bentuk model dari Baterai dengan persamaan sebagai berikut: [1]-[5]

$$L_{LB} \frac{di_{L LB}}{dt} = -u_{LB} v_{dc} + v_{iLB} \quad (6)$$

Berikut adalah gambar yang menunjukkan representasi dari Model Sistem Kontrol pada *Hybrid Microgrid*.



Gambar 1. Representasi Sistem Kontrol Keseluruhan pada *Hybrid Microgrid*.

Terlihat pada Gambar 1 bahwa model sistem terdiri dari dua sumber yaitu *photovoltaic* dan *grid*, sistem kontrol yang didesain mengupayakan agar kebutuhan daya dapat dipenuhi dengan memanfaatkan sumber *photovoltaic* sebagai sumber suplai utama. Dipilihnya model (1)-(6) dikarenakan model persamaan diferensial yang sudah teruji stabil dengan pembuktian Lyapunov *theory* sehingga dapat dilakukan *input-output linearization* [5]. Keterangan variabel pada Gambar 1 dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Keterangan Parameter Variabel Model.

Parameter	Keterangan
i_{cq}	Arus Converter yang melalui AC-DC Link.
i_{cd}	Arus Converter yang melalui AC-DC Link.
v_{dc}	Tegangan Bus DC.
i_{Lpv}	Arus Induktansi dari Bidirectional Boost-buck DC/DC Converter.
i_{opv}	Arus DC keluaran Buck-boost DC/DC Converter.
v_{ipv}	Tegangan Keluaran dari Buck (DC) Converter.
v_{iLB}	Tegangan Input Buck-boost DC/DC Converter.
$i_{L LB}$	Arus Induktansi dari Bidirectional Boost-buck DC/DC Converter.
i_{oLB}	Arus DC keluaran dari Buck-boost DC/DC Converter.
L_c	Induktansi DC/AC Converter
C_{dc}	Kapsitor DC.
L_{pv}	Induktansi dari Buck-boost DC/DC Converter.
C_{ipv}	Kapasitor dari Buck DC/DC Converter.
L_{LB}	Induktansi dari Buck dua arah, Buck-boost DC/DC Converter.
$u_{cd} u_{cq} u_{pv} u_{LB}$	Input Kontrol Inverter sumber tegangan DC/DC /AC (dengan referensi).

Modifikasi sistem *hybrid microgrid* berdasarkan teori *input – output linearization* sebagai berikut:

Model nonlinier,

$$\dot{x} = f(x) + g(x) u \quad (7)$$

$$\dot{y} = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x) + \frac{\partial h(x)}{\partial x} g(x) u \quad (8)$$

$$\dot{y} = L_f h(x) + L_g h(x) u \quad (9)$$

jika $\frac{\partial h(x)}{\partial x} \neq 0$ maka,

$$y^{(r)} = L_f^r h(x) + L_g L_f^{(r-1)} h(x) u \quad (10)$$

dengan $L_g L_f^{(r-1)} h(x) u \neq 0$

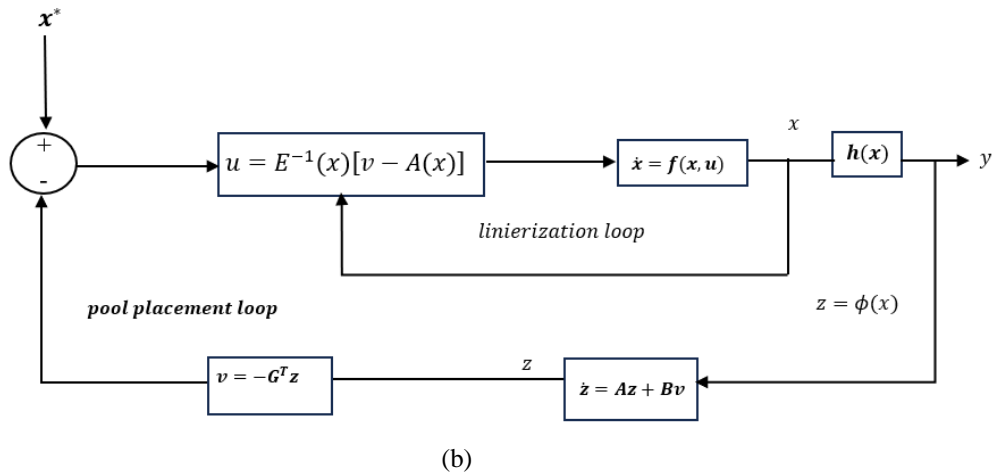
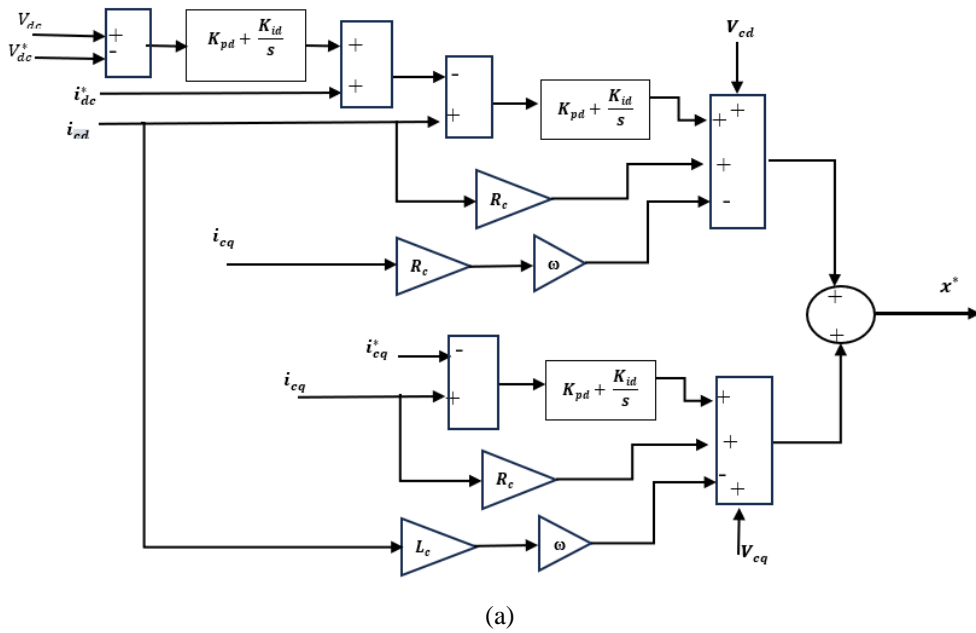
$$u = \frac{1}{L_g L_f^{(r-1)} h(x) u} [-L_f^r h + v] \quad (11)$$

dimana $y^{(r)} = v$ sehingga output dapat dinyatakan

$$y = h(x) \quad (12)$$

$$h(x) = [i_{cd} \quad i_{cq} \quad i_{Lpv} \quad v_{dc}] \quad (13)$$

Blok diagram yang menjelaskan bagaimana mendesain pengontrol u agar didapat nilai yang sesuai dengan tujuan kontrolnya ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Blok Diagram Sistem Kontrol Hybrid Microgrid; a) Sinyal Input, b) Sinyal Output.

Penjelasan untuk penurunan $E(x)$ dan $A(x)$ dapat dilihat pada (23) dan (24). Tahapan desain sistem kontrol yang dilakukan untuk mendapatkan u adalah sebagai berikut:

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R_c x_1}{L_c} + \frac{\omega L_c x_2}{L_c} - \frac{v_{cd}}{L_c} \\ -\frac{R_c x_2}{L_c} - \frac{\omega L_c x_1}{L_c} - \frac{v_{cq}}{L_c} \\ -\frac{x_4}{L_{pv}} \\ -\left(\frac{x_3}{3C_{dc}} + \frac{u_{cd} x_1}{3C_{dc}} + \frac{u_{cq} x_2}{3C_{dc}}\right) - \frac{1}{3C_{dc}} \\ (i_{LPV} - i_{dc} - i_{opv} - i_{oLB}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{L_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{V_{dc}}{L_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{V_{ipv}}{L_{pv}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{I_{LLB}}{3C_{cd}} \end{bmatrix} u \quad (15)$$

Berikutnya dilakukan transformasi $T(x)$ menggunakan matriks transformasi pada \dot{x} (7) untuk mendapatkan nilai v berdasarkan $\dot{y} = v$ sehingga bentuk dari persamaan linier menjadi seperti berikut:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = T(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R_c x_1}{L_c} + \frac{\omega L_c x_2}{L_c} - \frac{v_{cd}}{L_c} \\ -\frac{R_c x_2}{L_c} - \frac{\omega L_c x_1}{L_c} - \frac{v_{cq}}{L_c} \\ -\frac{x_4}{L_{pv}} \\ (i_{LPV} - i_{dc} - i_{opv} - i_{oLB}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

didapatkan bentuk linier yaitu:

$$\dot{z}(t) = Az + Bv \quad (17)$$

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \quad (18)$$

di mana A matriks $A \in R^{n \times n}$; $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ dan B adalah

matriks $B \in R^{n \times 1}$; $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$. Dengan demikian, *input* sistem dan *vector state* secara teoritis dihitung sebagai berikut [1]:

$$v = A(x) + E(x)u \quad (19)$$

$$u = E^{-1}(x)[v - A(x)] \quad (20)$$

$$v = -Gz \quad (21)$$

Nilai G didapat dengan melakukan perhitungan *pole placement* menggunakan matrix A dan B maka dapat dihitung nilai v sesuai (25).

$$v = -[24 \ 50 \ 35 \ 10] \begin{bmatrix} x_1 \\ -\frac{R_c x_1}{L_c} + \frac{\omega L_c x_2}{L_c} - \frac{v_{cd}}{L_c} \\ -\frac{R_c x_2}{L_c} - \frac{\omega L_c x_1}{L_c} - \frac{v_{cq}}{L_c} \\ -\frac{x_4}{L_{pv}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Kemudian dilanjutkan dengan menghitung $A(x)$ dan $E(x)$

$$A(x) = \begin{bmatrix} L_f h_1(x) \\ L_f h_2(x) \\ L_f h_3(x) \\ L_f h_4(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_c i_{cd} - \omega L_c i_{cq} + v_{cd} \\ -\omega L_c i_{cd} + R_c i_{cq} + v_{cq} \\ V_{dc} \\ (-i_{LPV} + u_{cd} i_{cd} + u_{cq} i_{cq} + i_{dc} + i_{opv} + i_{oLB}) \end{bmatrix} \quad (23)$$

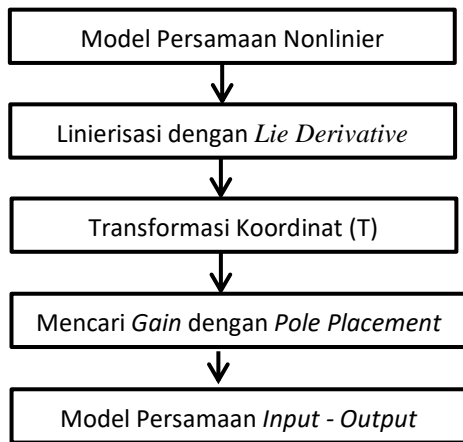
$$E(x) = \begin{bmatrix} L_{g1} h_1(x) & L_{g2} h_1(x) & L_{g3} h_1(x) & L_{g4} h_1(x) \\ L_{g1} h_2(x) & L_{g2} h_2(x) & L_{g3} h_2(x) & L_{g4} h_2(x) \\ L_{g1} h_3(x) & L_{g2} h_3(x) & L_{g3} h_3(x) & L_{g4} h_3(x) \\ L_{g1} h_4(x) & L_{g2} h_4(x) & L_{g3} h_4(x) & L_{g4} h_4(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{dc}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_{dc}^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_{ipv}^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{LLB}^* \end{bmatrix} \quad (24)$$

Berdasarkan (24) maka nilai u dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \\ u_{pv} \\ u_{LB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (R_c i_{cd} - \omega L_c i_{cq} + v_{cd})/v_{dc}^* \\ (\omega L_c i_{cd} + R_c i_{cq} + v_{cq})/v_{dc}^* \\ v_{dc}/v_{ipv}^* \\ (-i_{LPV} + u_{cd} i_{cd} + u_{cq} i_{cq} + i_{dc} + i_{opv} + i_{oLB})/I_{LLB}^* \end{bmatrix} \quad (25)$$

Sistem secara keseluruhan merupakan proses dari perancangan sistem kontrol nonlinier. Perancangan dimulai dari memodifikasi persamaan diferensial yang terdiri dari beberapa model yang saling terintegrasi. Modifikasi dilakukan dengan melakukan linierisasi menggunakan teori *Lie Derivative* sesuai dengan (9). Transformasi (T) dilakukan untuk mencari bentuk linier sesuai dengan (17). Matriks A dan Matriks B digunakan untuk mencari nilai G (*gain*). Menghitung nilai v sesuai (21), setelah didapatkan nilai v maka nilai dari u (*input*

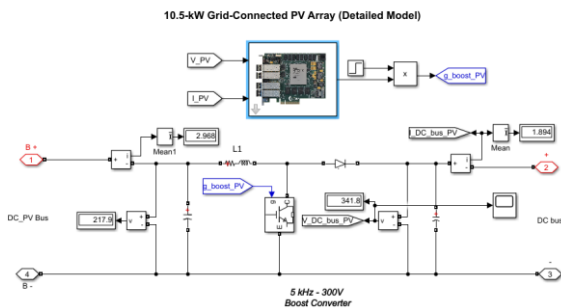
kontrol) dapat ditentukan (25). Representasi dari skema keseluruhan sistem terdapat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema Keseluruhan Sistem *Input – Output Feedback Linearization*

2.2. Perancangan Simulasi *Boost Converter DC/DC 5kHz – 300 V*

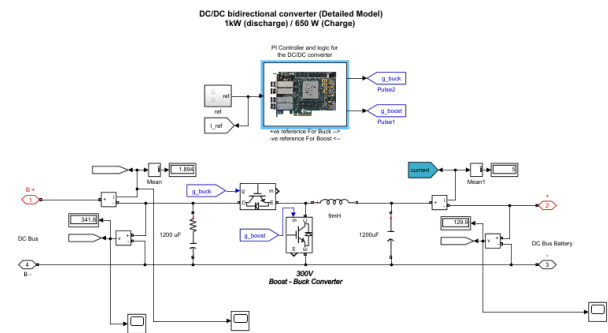
Hasil perancangan simulasi *Boost Converter 5 kHz – 300 V* untuk menaikkan tegangan pada Bus DC PV dari 200 V menjadi 300 V ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Simulasi *Boost Converter* Menggunakan Matlab

2.3. Perancangan Simulasi *Boost – buck Bi-directional Converter DC/DC 0.65 kW*

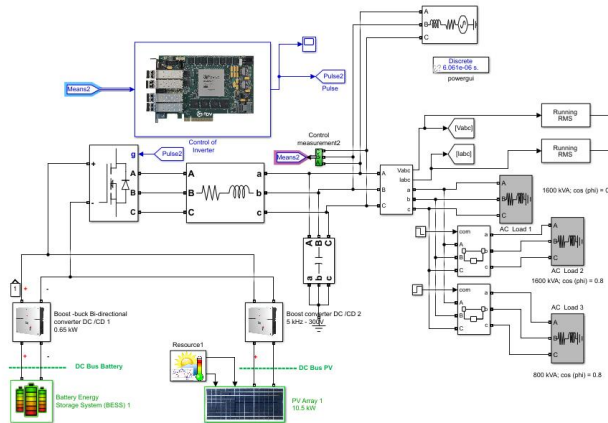
Hasil perancangan simulasi *Boost – Buck Directional Converter* menurunkan tegangan Bus DC pada saat mode pengisian baterai dari 300 V ke 120 V DC kemudian pada mode suplai (PV off) *converter* menaikkan tegangan dari 120 V ke 300 V. Kontrol pada *Boost – buck converter* menggunakan pengontrol PI sebagai sinyal masukan kedalam rangkaian *converter* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Simulasi *Boost – buck Converter* Menggunakan Matlab

2.3. Perancangan Simulasi *Inverter*

Perancangan simulasi untuk *inverter* menggunakan pendekatan nonlinier, algoritma kontrol yang didesain digunakan sebagai referensi sinyal yang masuk ke dalam *inverter*. Spesifikasi *inverter* yang digunakan ($P= 1 \text{ kW}$; $Q= 1 \text{ kVar}$; $PF= 0.6$; dan $V_{pu}= 0.95$) ditunjukkan pada Gambar 6.

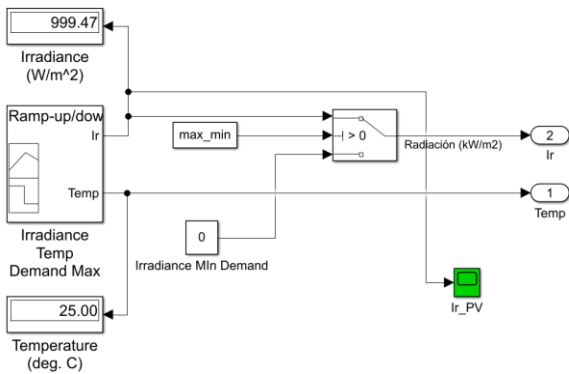


Gambar 6. Simulasi *Inverter DC/AC*.

Spesifikasi *inverter* membangkitkan tegangan masukan 300 V DC menjadi 230 V AC (dengan toleransi (+/-) 5%).

2.4. Perancangan Model Sumber *Photovoltaic (PV)*

Perancangan simulasi menggunakan spesifikasi 10.5 kW *pv array* dengan *irradiance* maksimal dan minimal adalah 900 – 1000 W/m^2 ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Pemodelan Intensitas Penyinaran Matahari dengan Matlab.

Pola penyinaran matahari dengan mengambil suhu rata-rata penyinaran yaitu $25^{\circ}C$.

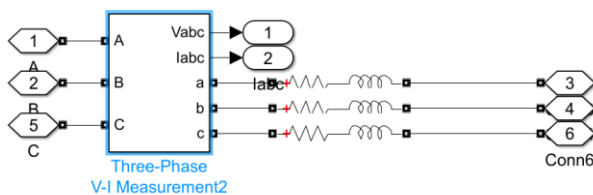
2.5. Perancangan Simulasi Model Beban

Skema dari penggunaan beban AC pada penelitian ini adalah dengan menggunakan 3 jenis beban dengan kapasitas masing – masing ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Model Beban

Beban	Daya (P)	Cosphi
a	1.600 kVA	0.8
b	1.600 kVA	0.8
c	800 kVA	0.8

Kemudian simulasi beban ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Simulasi Beban AC Menggunakan Matlab

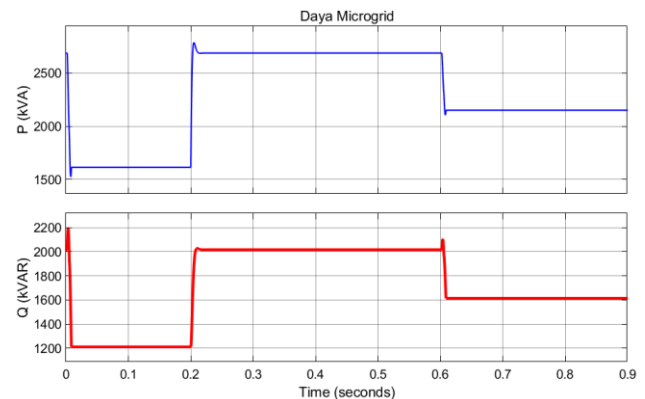
Skema pengujian perubahan (penambahan dan pengurangan) beban dilakukan untuk menguji sistem kontrol apakah dapat *tracking* perubahan kebutuhan daya. Pertama beban a dan beban c masuk kedalam sistem *microgrid*, setelah 0.2 sec beban b ditambahkan kedalam sistem sehingga terjadi penambahan daya, daya total menjadi 4.000 kVA kemudian setelah 0.6 sec beban b dilepas dari sistem sehingga terjadi pengurangan daya, daya total menjadi 3.200 kVA. Penambahan dan pengurangan daya terjadi akibat beban masuk dan lepas pada 0.2 sec dan 0.6 sec.

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini bertujuan untuk membuktikan apakah desain sistem kontrol dapat memenuhi tujuan yaitu penggunaan sumber *Photovoltaic (PV)* yang terhubung dengan sistem *grid* sebagai sumber utama dapat saling terintegrasi dalam menanggapi kebutuhan daya. Serta untuk menguji konsistensi sistem ketika dibebani oleh beban pelanggan yang berubah-ubah. Simulasi menggunakan aplikasi Matlab 2021b.

3.1. Pengujian Sistem Kontrol Nonlinier pada *Microgrid* dengan penambahan dan pengurangan daya

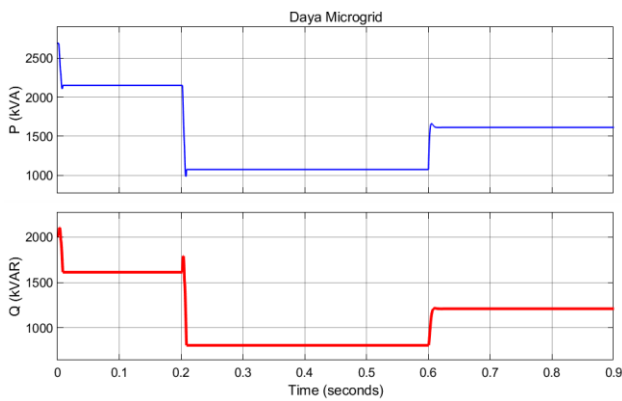
Penambahan daya pada 0.2 sec sebesar (1.737 kVA – 2.894 kVA) respon penyesuaian daya terjadi selama (0.02 sec) sebelum mencapai keadaan konstan. Kemudian pada 0.6 sec terjadi pengurangan daya pada sistem *microgrid* sebesar (2.894 kVA – 2.115 kVA) respon penyesuaian daya terjadi selama (0.008 sec) sebelum mencapai keadaan konstan ditunjukkan pada Gambar 9.



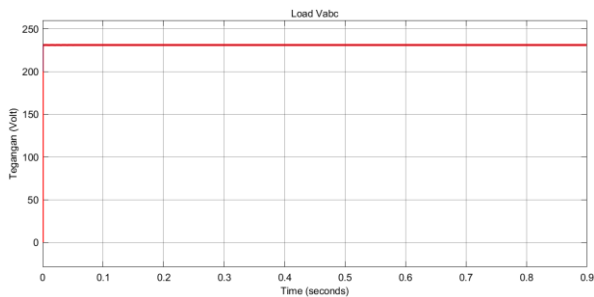
Gambar 9. Kenaikan dan Penurunan Daya P dan Q dengan Kontrol Nonlinier pada *Photovoltaic*.

Representasi dari kontribusi daya yang disalurkan pada sistem *grid* ditunjukkan pada Gambar 10. Terjadi penurunan daya pada 0.2 sec sebesar (2.151 kVA – 1.076 kVA) sistem *grid* merespon PV dapat menanggapi kebutuhan daya selama (0.02 sec) sebelum mencapai keadaan konstan. Kenaikan kebutuhan daya terjadi pada 0.6 sec, suplai daya pada sistem *grid* naik sebesar (1.076 kVA – 1.659 kVA) respon penyesuaian daya terjadi selama (0.008 sec) sebelum mencapai keadaan konstan ditunjukkan pada Gambar 10.

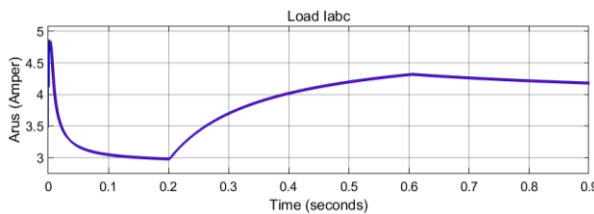
Berdasarkan pengamatan pada Gambar 11. Ketika terjadi penambahan (0.2 sec) dan penurunan daya (0.6 sec) tegangan suplai tetap konstan di 238 V AC sedangkan untuk arus berubah sesuai kebutuhan daya pada 0.2 sec dan 0.6 sec



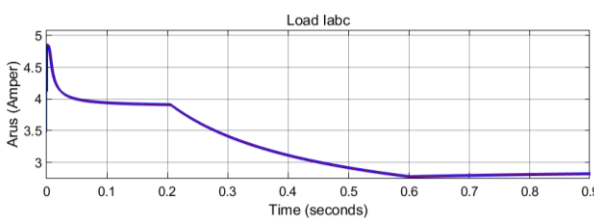
Gambar 10. Kenaikan dan Penurunan Daya P dan Q dengan Kontrol Nonlinier pada Sumber Grid



(a)



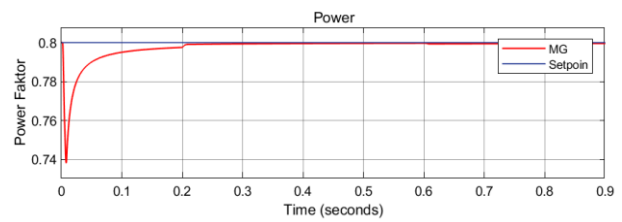
(b)



(c)

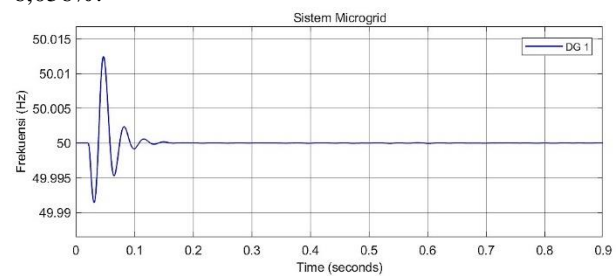
Gambar 11. Hasil Keluaran Sistem Microgrid dengan Kontrol Nonlinier; a) Tegangan Beban, b) Arus Beban Sumber PV, c) Arus Beban Grid

Berdasarkan Gambar 12 dan 13. Saat terjadi perubahan daya pada sistem *microgrid* di 0.2 sec besarnya Power Faktor (pu) berubah, terjadi kenaikan dan penurunan pada 0.2 sec (7.975 - 7.995) kemudian pada 0.6 sec (7.995 - 7.993). PF kembali stabil pada 0.8 sec dan seterusnya.



Gambar 12. Perubahan Power Faktor Sistem Microgrid dengan Kontrol Nonlinier.

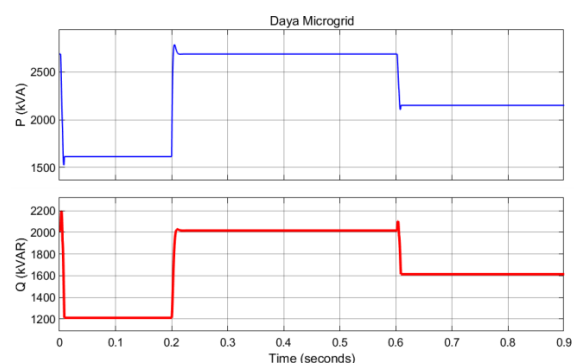
Kenaikan dan penurunan daya akibat penambahan dan pelepasan beban tidak berpengaruh besar terhadap frekuensi, frekuensi terbaca 50 Hz dengan *overshoot* 6,056%.



Gambar 13. Perubahan Frekuensi Sistem Microgrid dengan Kontrol Nonlinier.

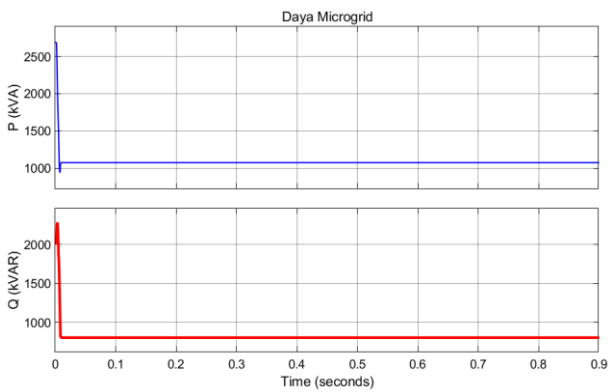
Total dari daya yang disuplai ke beban pada saat kondisi 0.2 sec menggunakan pengontrol nonlinier adalah 3.970 kVA, terdapat selisih dari total kebutuhan beban yaitu 4.000 kVA, hal ini diakibatkan oleh adanya faktor harmonisa yang mengakibatkan terjadinya *loses* pada sistem suplai daya sebesar 0,75%.

3.2. Pengujian dengan menggunakan Pengontrol PI

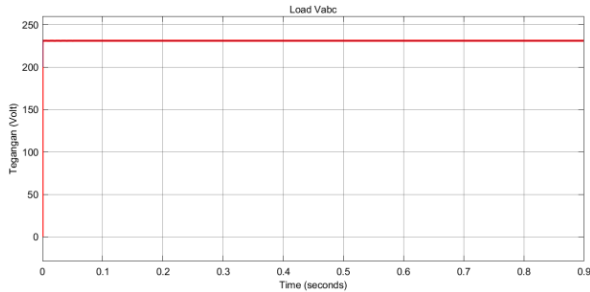


Gambar 14. Kenaikan dan Penurunan Daya P dan Q dengan Kontrol PI pada Photovoltaic.

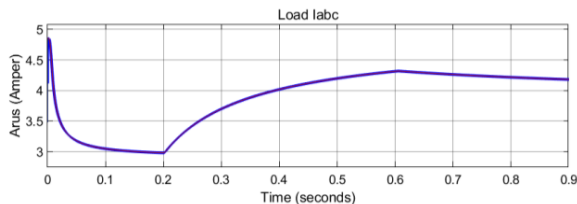
Ketika 0.2 sec terjadi penambahan daya sebesar (1.637 kVA – 2.692 kVA) respon penyesuaian daya terjadi selama (0.02 sec) sebelum mencapai keadaan konstan. Kemudian pada 0.6 sec terjadi pengurangan daya pada sistem MG sebesar (2.692 kVA – 2.115 kVA) respon sistem ditunjukkan pada Gambar 14.



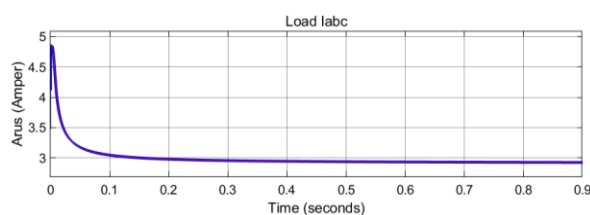
Gambar 15. Kenaikan dan Penurunan Daya P dan Q dengan Kontrol PI pada Grid.



(a)



(b)



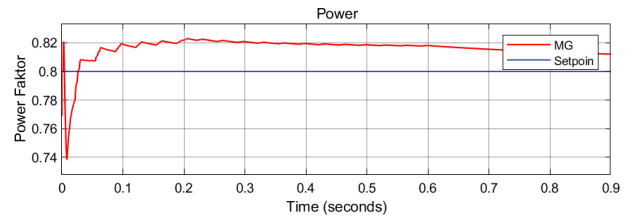
(c)

Gambar 16. Hasil Keluaran Sistem Microgrid dengan Kontrol PI; a) Tegangan Beban, b) Arus Beban Sumber PV, c) Arus Beban Grid

Sedangkan untuk suplai grid daya turun dari (2.688 kVA – 1.056 kVA) selama 0.013 sec, setelah itu suplai daya konsisten di 1.056 kVA sampai 0.9 sec. Respon sistem ditunjukkan pada Gambar 15.

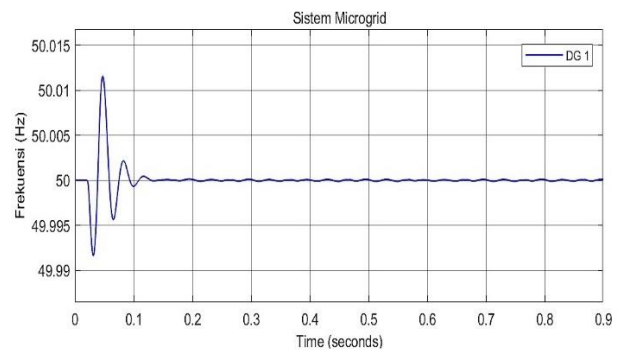
Berdasarkan pengamatan pada Gambar 16 ketika terjadi penambahan (0.2 sec) dan penurunan daya (0.6 sec) tegangan suplai tetap konstan di 236 V AC sedangkan untuk arus beban berubah sesuai kebutuhan daya pada 0.2 sec dan 0.6 sec pada sumber *photovoltaic* namun untuk sumber *grid* tetap konstan di 3 amper.

Berdasarkan Gambar 17 dan 18 pada saat terjadi perubahan daya pada sistem *microgrid*, PF terus bergejolak dan terus turun sampai pada 0.9 sec dinilai 8.1.



Gambar 17. Perubahan Power Faktor Sistem Microgrid dengan Kontrol PI.

Frekuensi sistem 50 Hz (*overshoot* 13.036%) ditunjukkan oleh Gambar 18, namun sistem tetap dapat mensuplai daya ke pelanggan, antara sumber PV, sumber *grid*, dan pelanggan tetap dapat tersinkron.



Gambar 18. Perubahan Frekuensi Sistem Microgrid dengan Kontrol PI.

Jumlah dari kebutuhan daya pada saat 0.2 sec adalah 4.000 kVA sesuai dengan Gambar 14 dan 15. Total dari daya yang tersalur adalah 3.748 kVA terdapat selisih daya yaitu 252 kVA, hal ini diakibatkan oleh terjadinya harmonisa sehingga mengakibatkan *loses* pada sistem suplai, besarnya *loses* 6.3%.

3.3. Pengujian Error dengan Time Sampling (0.9 sec)

Sistem kendali berumpan balik berperan penting untuk mengurangi galat ($e(t)$). $e(t)$ antara setiap variable harus mencapai nilai nol secepat mungkin. Oleh karena itu, kriteria apapun yang digunakan untuk mengukur kualitas respon sistem memperhitungkan variasi *error* selama rentang seluruh waktu. Terdapat empat kriteria dasar yang umum digunakan yaitu:

Integral of squared error. ISE

$$\int_0^{\infty} \{e(t)\}^2 dt \quad (26)$$

Integral of absolute error. IAE

$$\int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (27)$$

Integral of time multiplied by squared error. ITSE

$$\int_0^{\infty} t\{e(t)\}^2 dt \quad (28)$$

Integral of time multiplied by absolute error. ITAE

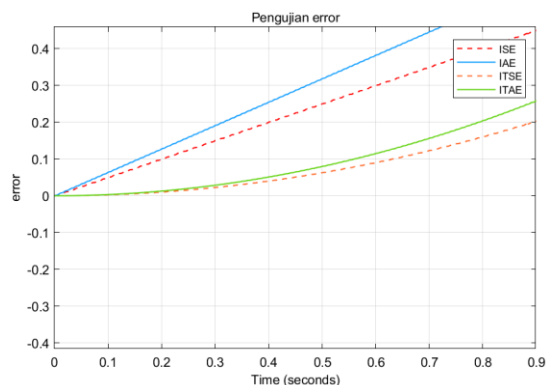
$$\int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (29)$$

Selanjutnya akan dilakukan pengujian galat (e(t)) berdasarkan metodologi di atas sehingga didapatkan data sesuai Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan Error dengan Time Sampling (0.9 sec).

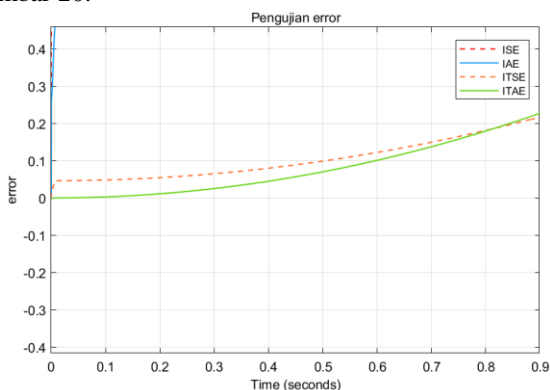
Pengontrol	ISE	IAE	ITSE	ITAE
Nonlinier	0,45	0,573	0,2031	0,2583
PI	0,963	0,675	0,2179	0,2281

Dilakukan simulasi untuk menguji error pada pengontrol nonlinier seperti ditunjukkan oleh Gambar 19.



Gambar 19. Pengujian Error Pengontrol Nonlinier.

Kemudian dilakukan simulasi untuk pengontrol PI sehingga respon dari perhitungan error ditunjukkan pada Gambar 20.

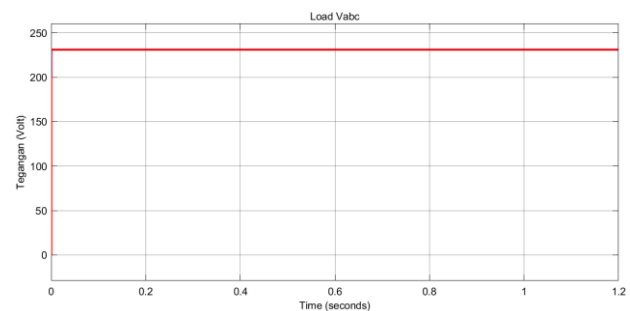


Gambar 20. Pengujian Error Pengontrol PI.

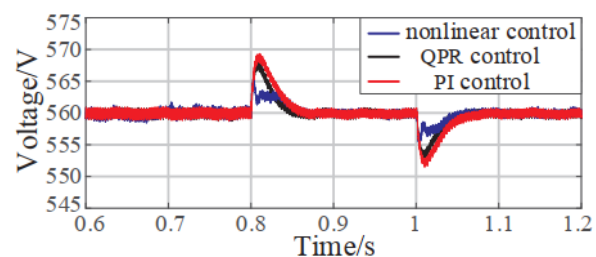
Hasil analisis Pengontrol Nonlinier pada kriteria ITSE menunjukkan hasil terbaik namun Pengontrol PI untuk kriteria ITAE lebih baik daripada Nonlinier.

3.4. Hasil Analisis dengan Penelitian Sebelumnya

Berikut adalah hasil simulasi tegangan pada sistem microgrid dengan pengontrol nonlinier yang penulis desain dibanding dengan paper lain [1]. Nilai dari tegangan yang konstan menjadi tujuan kontrol ketika terjadi perubahan kebutuhan daya akibat penambahan dan pengurangan beban AC.



(a)



(b)

Gambar 21. Tegangan Sistem Microgrid ketika dibebani oleh Beban AC; a) Hasil Perancangan Penulis, b) Hasil Perancangan Referensi Paper [1].

Pada Gambar 21 menunjukkan bahwa tegangan keluaran dari perancangan sistem kontrol microgrid pada penelitian ini menghasilkan tegangan suplai konstan, dibandingkan dengan paper lain [1]. Pada paper lain ditunjukkan oleh Gambar 21 b, terdapat overshoot (560 – 569) Volt pada 0.8 sec dan (560-552) Volt pada 1 sec. Sedangkan pada Gambar 21 a, menunjukkan tegangan konstan di 238 Volt (tidak ada overshoot) ketika terjadi perubahan kebutuhan daya pada 0.2 sec dan 0.6 sec.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan selama penelitian ini, terdapat beberapa kesimpulan yang dapat diambil, antara lain. Sistem Kontrol yang didesain pada penelitian ini dapat menyelesaikan permasalahan dari

microgrid sehingga suplai tenaga listrik dapat mempertahankan tegangan (238 V AC), frekuensi (50 Hz dengan overshoot 6,05%), dan loses 0.75%, secara konsisten saat terjadi perubahan beban. Sistem Kontrol dapat men-tracking kebutuhan daya akibat perubahan beban (naik dan turun) dengan nilai perhitungan error ITSE menunjukkan hasil terkecil, dengan respon waktu 0,008 – 0,02 sec sehingga kemampuan suplai daya pada sumber photovoltaic dan baterai secara otomatis dapat mengikuti kebutuhan sistem.

Referensi

- [1]. P. Li, T. Guo, F. Zhou, J. Yang, and Y. Liu, "Nonlinear coordinated control of parallel bidirectional power converters in an AC/DC hybrid microgrid," *Electrical Power and Energy Systems*, 122, 160208, 2020.
- [2]. X. Liu, P. Weng, and P. C. Loh, "A Hybrid AC/DC Microgrid and It's Coordinated Control," *IEEE Transaction on Smart Grid*, Vol 2, No 2, June 2011.
- [3]. L. Ortiz, R. Oriondo, A. Aguila, J. W. Gonzales, G. J. Lopez, I. Isaac, "Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode," *Elsevier Ltd*, 2405-8440, November 2019.
- [4]. N. Vafamand, M. M. Arefi, M. S. Javadi, A. A. Moghadam, J. P.S Catalo, "Advance Kalman Filter for Current Estimation in AC Microgrid," *IEEE Transaction* 2020, 2, 122, 2020.
- [5]. Y. Toghani, S. A. Taher, M. Mehrasa, "Distributed energy storage system – based nonlinear control strategy for hybrid microgrid power management include wind/PV units in grid – connected operation," *Int Trans Electric Energy Syst. John Wily & Sons*, 2019.
- [6]. I. Setiawan, A. Priyadi, and M. H. Purnomo, "Control Strategi Based on Associative Memory Networks for a Grid-Side Converter in On-Grid Renewable Generation Systems Under Generalized Unbalanced Grid Voltage Conditions," *International Review of Electrical Engineering* Vol.11, N.2, 2016.
- [7]. S. A. Fahad, "DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, Vol. 9, 2021.
- [8]. V. Onkar, D. Suryanarayana and B. G. Fernandes, "Simple Controller Configuration for Decentralized Parallel Operation of Inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018.
- [9]. 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*, 2020.
- [10]. 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.
- [11]. 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.
- [12]. 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.
- [13]. 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.
- [14]. 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.
- [15]. 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.