

Kendali Penyimpanan Energi Listrik untuk Aplikasi Mikrogrid

Hilman Zarory¹, F. Danang Wijaya², Bambang Sutopo³

Abstract— The design of the inverter control system aims to regulate active power and reactive power flows from the batteries through the three-phase inverter. Reference power generated manually to compensate the active and reactive power required by microgrid. Modelling done by the transformation clarke-park to design close loop system with PI (Proportional Integral) control so that the current flows in the inverter is maintained at the reference value. PLL (Phase Locked Loop) is used to synchronize inverter and grid. The simulation result shows that the system can work very well and the voltage or frequency of microgrid maintained under normal conditions.

Intisari— Perancangan pada sistem kendali inverter ini bertujuan untuk mengatur daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dari baterai melalui inverter tiga fase. Daya referensi dibangkitkan secara manual untuk mengkompensasi daya aktif dan reaktif yang diperlukan oleh mikrogrid. Pemodelan dilakukan berdasarkan transformasi clarke-park untuk merancang sistem *close loop* dengan Pengendalian PI (Proportional Integral) sehingga arus yang mengalir pada inverter dipertahankan pada nilai referensinya. PLL (Phase Locked Loop) dipergunakan agar inverter selalu dalam kondisi sinkron dengan grid. Hasil Simulasi menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi dengan baik sehingga tegangan maupun frekuensi dari mikrogrid dapat dipertahankan dalam kondisi normal.

Kata Kunci— penyimpanan energi listrik, transformasi clarke-park, PLL, pengendalian PI.

I. PENDAHULUAN

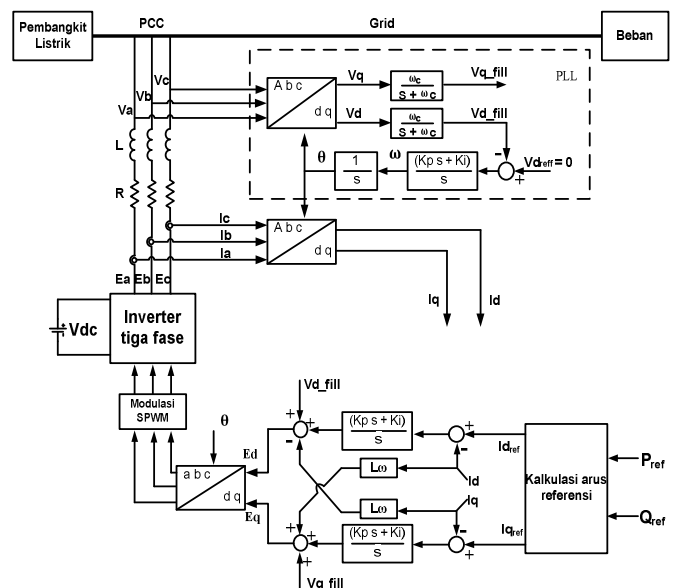
Konsep dari mikrogrid merupakan suatu pendekatan dimana pembangkit listrik dan beban dipandang sebagai sebuah subsistem. Dengan pendekatan seperti ini maka sistem akan terdiri dari kluster-kluster sehingga lebih memungkinkan untuk melakukan kontrol secara lokal dalam sebuah jaringan listrik [1]. Sistem mikrogrid sendiri dapat beroperasi secara mandiri ataupun terhubung dengan *main grid*. Mikrogrid yang beroperasi secara mandiri lebih sering digunakan pada daerah terpencil yang sulit terjangkau oleh jaringan listrik.

Energi listrik yang dibangkitkan dalam jaringan listrik perlu disesuaikan dengan jumlah kebutuhan energi listrik pada beban. Hal ini membutuhkan kendali tambahan mengingat jumlah beban yang terpasang pada jaringan listrik selalu berubah-ubah sehingga jumlah energi listrik yang dibutuhkan dari pembangkit listrik juga akan berubah-ubah nilainya. Jika daya yang dibutuhkan beban tidak disesuaikan dengan pembangkit listrik maka akan mengakibatkan gangguan berupa penyimpangan frekuensi maupun tegangan sistem [2][3].

Penambahan sistem penyimpanan energi listrik pada sistem mikrogrid dapat digunakan untuk mengatasi masalah kesetimbangan daya antara pembangkit dan beban dalam mikrogrid. Penelitian yang telah dilakukan [4] menunjukkan bahwa penyimpanan energi listrik mempunyai peranan yang penting dalam mempertahankan frekuensi dan tegangan dari gangguan pada saat mikrogrid beroperasi secara mandiri dengan sangat baik walaupun kapasitas dari penyimpanan energi listrik itu sendiri terbatas.

Perpindahan energi listrik dari sumber energi ramah lingkungan seperti panel surya, turbin angin atau baterai melibatkan inverter yang terkoneksi dengan grid. Sistem kendali yang sering digunakan pada inverter yaitu sistem kendali PI [5]-[8]. Sistem kendali dengan menggunakan pendekatan *state space* juga pernah dilakukan [9][10]. Pada dasarnya sistem kendali pada inverter bertujuan untuk menjamin arus yang mengalir sesuai dengan harga referensinya. Sebelumnya sistem dimodelkan berdasarkan ditransformasikan clarke - park. Transformasi ini akan merubah sinyal ac pada sumbu abc menjadi sinyal dc pada sumbu dq. Dalam model dinamika inverter dengan jala-jala pada sumbu dq akan menunjukkan efek kopling dimana sumbu dq akan saling mempengaruhi [11].

Untuk menjamin inverter selalu dalam keadaan sinkron dengan grid maka diperlukan PLL. Frekuensi dan tegangan maksimum dari grid juga dapat dilihat melalui PLL. PLL akan mendeteksi sudut fase tegangan grid yang berikutnya dipergunakan sebagai sudut referensi dalam transformasi abc ke dq ataupun sebaliknya. Dengan PLL maka kondisi sinkron akan tercapai hingga frekuensi inverter dan grid mencapai harga yang sama.



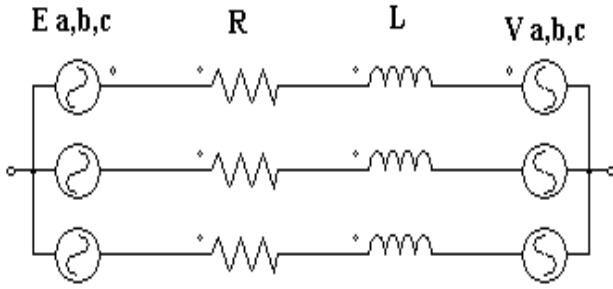
Gbr. 1 Blok diagram sistem penyimpanan energi listrik

¹Mahasiswa Pasca Sarjana Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi FT UGM.

^{2,3}Dosen Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi FT UGM

II. PEMODELAN SISTEM

Inverter yang terkoneksi dengan grid pada dasarnya dapat digambarkan sebagai dua buah sumber tegangan ac yang saling berhubungan dengan beban R dan L.



Gbr. 2 Rangkaian ekivalen inverter terkoneksi grid

Pada Gbr. 2, Notasi $E_{a, b, c}$ digunakan untuk menunjukkan tegangan dari keluaran inverter, $V_{a, b, c}$ menunjukkan tegangan dari sisi jala-jala dan $I_{a, b, c}$ merupakan arus yang diinjeksi ke jala-jala. Pada sistem tersebut akan berlaku persamaan :

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Pemodelan pada jaringan tiga fase dilakukan menggunakan transformasi clarke – park:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \cos \left(\theta_i - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_i + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_i & -\sin \left(\theta_i - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_i + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{2}{3} & \frac{2}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Transformasi balik dari persamaan (2):

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

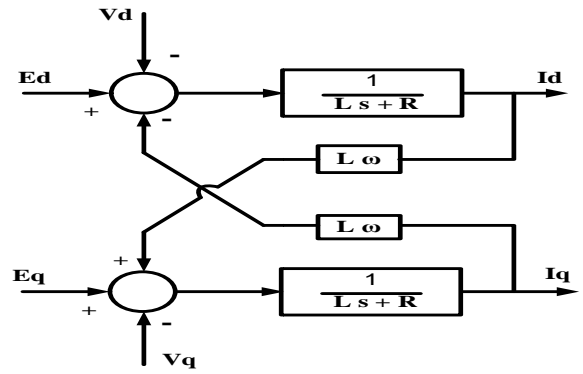
Dengan melakukan operasi substitusi persamaan (3) ke persamaan (1) maka didapatkan:

$$E_d = R i_d + L \frac{d i_d}{dt} - L \omega i_q + V_d \quad (4)$$

$$E_q = R i_q + L \frac{d i_q}{dt} + L \omega i_d + V_q \quad (5)$$

Tegangan dan arus dalam persamaan (4) dan (5) merupakan komponen dari transformasi park yang terdiri dari sumbu d dan sumbu q. Sedangkan ω merupakan frekuensi angular dari grid dengan:

$$\omega = 2\pi f \quad (6)$$



Gbr. 3 Model dinamika inverter terkoneksi grid

i_d dan i_q pada Gbr. 3 merupakan arus yang mengalir keluar atau masuk pada inverter. Arus tersebut akan dikendalikan dengan kendali PI sehingga besarnya sesuai dengan besar daya aktif dan daya reaktif yang akan ditransfer. Daya aktif dan daya reaktif pada bidang dq diberikan dalam persamaan:

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (7)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_d i_q - v_q i_d) \quad (8)$$

Dengan P adalah daya aktif dan Q merupakan daya reaktif. Dari persamaan (7) dan (8) maka arus berdasarkan daya referensi dapat ditentukan dengan persamaan:

$$i_d = \frac{2}{3} \frac{(P v_d - Q v_q)}{v_d^2 + v_q^2} \quad (9)$$

$$i_q = \frac{2}{3} \frac{(P v_q + Q v_d)}{v_d^2 + v_q^2} \quad (10)$$

III. SISTEM DENGAN KENDALI PI

Model dinamika yang telah dibahas pada bagian II merupakan model tanpa sistem kendali PI. Sistem kendali PI yang dirancang bertujuan agar arus yang mengalir sesuai dengan harga referensi. Berdasarkan persamaan (4) dan (5) dan dengan menambahkan variabel U :

$$U_d = L \frac{d i_d}{dt} + R i_d \quad (11)$$

$$U_q = L \frac{d i_q}{dt} + R i_q \quad (12)$$

Maka fungsi alih dengan arus sebagai keluaran adalah:

$$\frac{i_d(s)}{u_d(s)} = \frac{i_q(s)}{u_q(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (13)$$

Persamaan kendali PI pada kerangka acuan dq diberikan dalam persamaan:

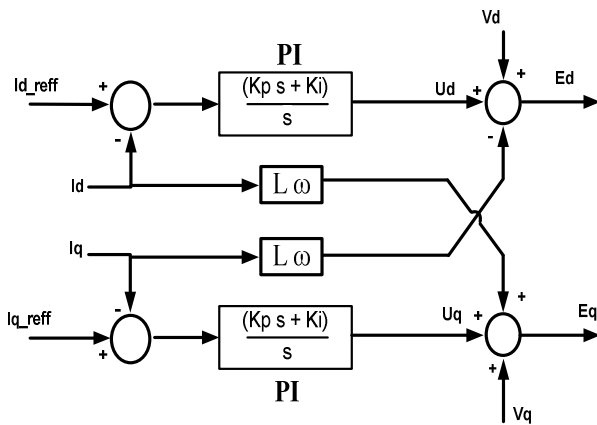
$$u_d = K_p \hat{i}_d + K_i \int \hat{i}_d dt \quad (14)$$

$$u_q = K_p \hat{i}_q + K_i \int \hat{i}_q dt \quad (15)$$

maka fungsi alih dengan arus sebagai masukan adalah:

$$\frac{u_d(s)}{i_d(s)} = \frac{u_q(s)}{i_q(s)} = \frac{(Kp s + Ki)}{s} \tag{16}$$

Dari persamaan (4) – (14), maka blok diagram sistem kendali inverter terkoneksi grid adalah:



Gbr. 4 Kendali close loop umpan balik negatif

Blok diagram kendali PI kalang tertutup pada Gbr. 4 akan memberikan fungsi alih sistem orde dua yaitu:

$$T(s) = \frac{Kp}{L} \frac{s + \frac{ki}{kp}}{s^2 + \frac{R+kp}{L}s + \frac{ki}{L}} \tag{17}$$

Fungsi alih pada persamaan (17) memiliki pole-pole pada bidang s:

$$S_{1,2} = \frac{-(Kp+R) \pm \sqrt{(Kp+R)^2 - 4 Ki L}}{2L} \tag{18}$$

$$\zeta = \frac{Kp+R}{2L\omega_n} \tag{19}$$

$$\omega_n^2 = \frac{Ki}{L} \tag{20}$$

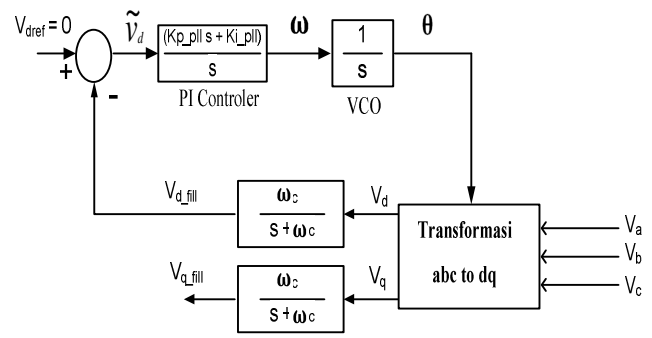
Dengan ζ merupakan faktor redaman dan ω_n adalah frekuensi alami sistem.

IV. PLL (PHASE LOCKED LOOP)

Dengan mensubstitusi sinyal sinus tegangan grid ke persamaan (2) maka akan menghasilkan:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_o - \theta_i) \\ -\cos(\theta_o - \theta_i) \end{bmatrix} \tag{21}$$

V_m merupakan harga maksimum dari tegangan grid, θ_o adalah sudut fase tegangan grid dan θ_i merupakan sudut fase dari transformasi park. Dari persamaan ini dapat diketahui bahwa jika sudut fase transformasi park sama dengan sudut fase dari tegangan grid maka V_d akan sama dengan nol dan V_q merupakan tegangan maksimum dari grid. Berdasarkan hal tersebut maka blok diagram PLL dapat dibuat:

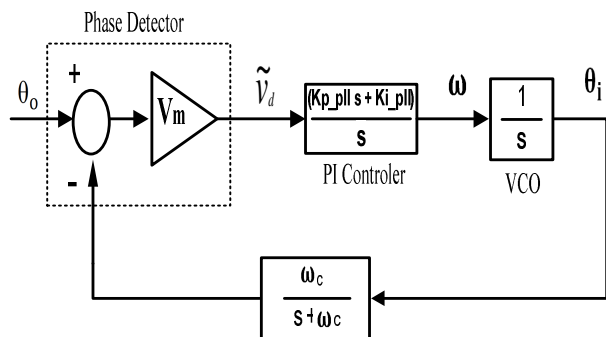


Gbr. 5 Blok diagram PLL

Gbr. 5 merupakan blok diagram PLL dengan V_d difilter. PI kontroler pada PLL bertujuan untuk memaksa $V_d = 0$, karena pada saat keadaan ini berlangsung maka $\theta_o \approx \theta_i$ dan V_d dalam persamaan (21) dapat dilinearkan:

$$V_d = V_m (\theta_o - \theta_i) \tag{23}$$

Blok digram ekivalen:



Gbr. 6 Blok diagram PLL yang dlinierkan

Keluaran dari PLL adalah sudut fase yang telah sinkron dengan sudut fase grid, sehingga tiap transformasi yang digunakan dalam sistem menggunakan sudut fase yang sama yaitu θ_o .

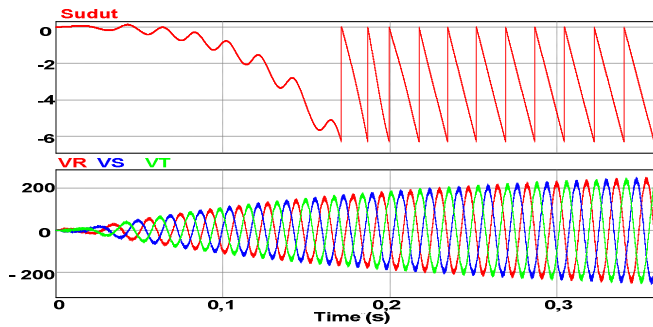
V. SIMULASI DAN HASIL

Sistem yang dirancang disimulasikan dengan PSIM untuk melihat unjuk kerja dari sistem tersebut. Simulasi yang dilakukan yaitu simulasi PLL, simulasi grid tanpa sistem kendali penyimpan energi listrik dan simulasi grid terhubung dengan sistem kendali penyimpan energi listrik. Filter yang dirancang ditulis dalam fasilitas C blok yang disediakan oleh PSIM.

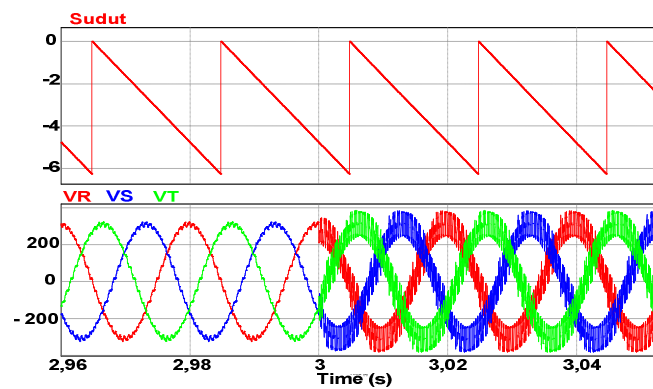
TABEL I
PARAMETER SISTEM

Parameter	Nilai
Tegangan jala-jala (rms)	220 V
Frekuensi jala-jala	50Hz
Hambatan dan induktansi	R = 7 Ω L = 10mH
Frekuensi modulasi	1500 Hz
V Baterai	1000 V

Gbr. 7 dan Gbr. 8 menunjukkan kinerja PLL. Frekuensi cutoff filter dan faktor redaman yang digunakan adalah $\omega_c = 188.5$ rad/sec, $\xi = 0.707$. Gbr. 7 merupakan PLL saat mulai beroperasi sedangkan Gbr. 8 menunjukkan kinerja PLL saat terjadi perubahan beban. Simulasi menunjukkan bahwa sudut keluaran PLL tetap dipertahankan stabil walaupun terjadi gangguan pada tegangan grid.

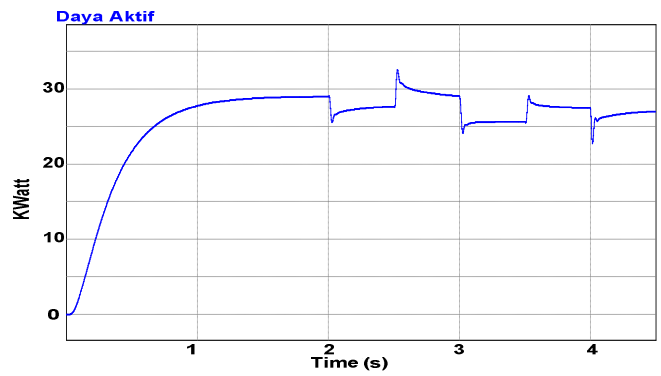


Gbr. 7 Sudut keluaran PLL dalam kondisi transisi

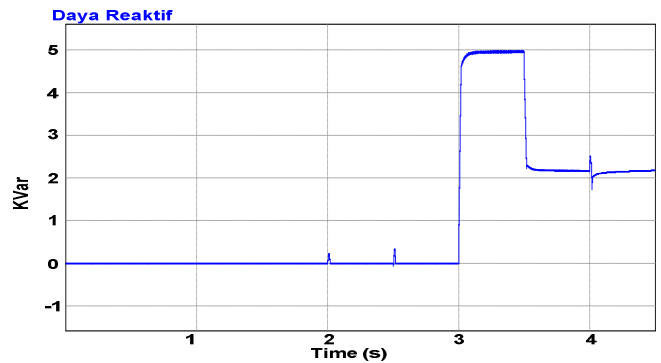


Gbr. 8 Sudut keluaran PLL ketika tegangan grid terdistorsi

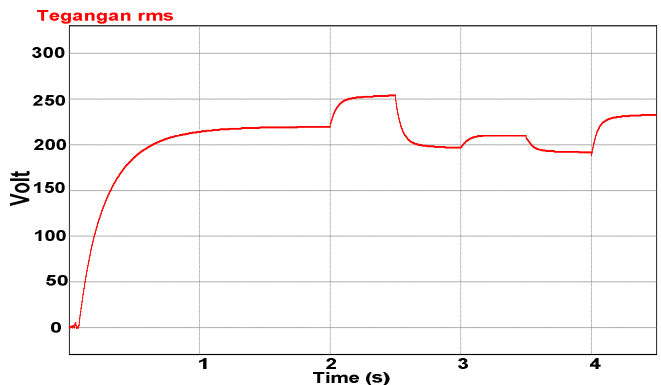
Gbr. 9 hingga Gbr. 12 memperlihatkan hasil simulasi kondisi grid sebelum dihubungkan dengan sistem kendali. Mulanya beban yang terpasang merupakan beban disaat grid dalam kondisi normal yaitu pada tegangan adalah 220 V dan frekuensi 50 Hz. Selanjutnya beban akan divariasikan sehingga daya aktif maupun daya reaktif yang dibutuhkan beban akan berubah-ubah. Dari simulasi dihasilkan bahwa perubahan daya aktif maupun daya reaktif yang dibutuhkan beban tanpa diikuti dengan penyesuaian kapasitas daya yang bisa dibangkitkan akan mengakibatkan gangguan pada tegangan dan frekuensi grid. Besar gangguan tergantung dari besarnya perubahan daya oleh beban.



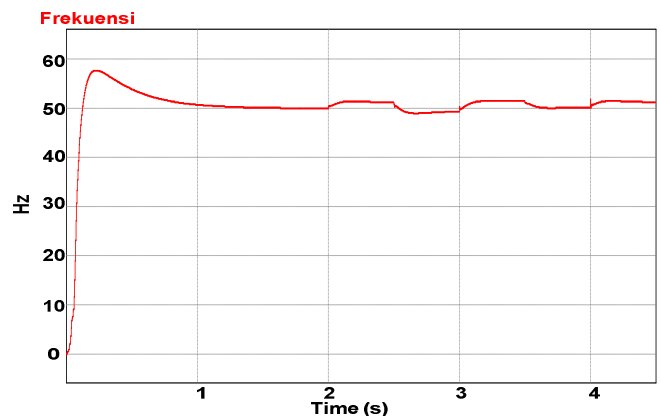
Gbr. 9 Daya aktif beban saat sistem kendali inverter belum beroperasi



Gbr. 10 Daya reaktif beban sebelum sistem kendali beroperasi

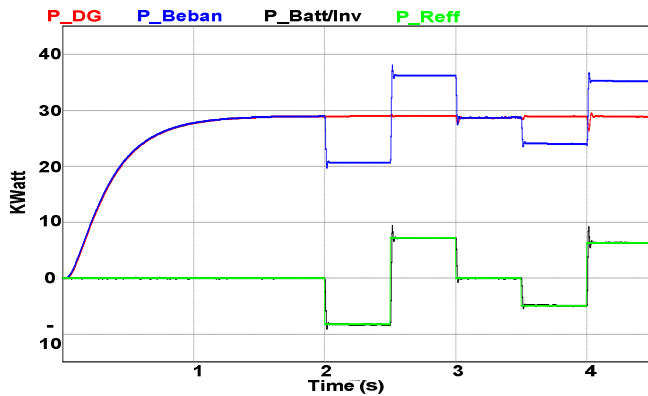


Gbr. 11 Gangguan pada tegangan rms akibat ketidakseimbangan daya antara pembangkit dengan beban

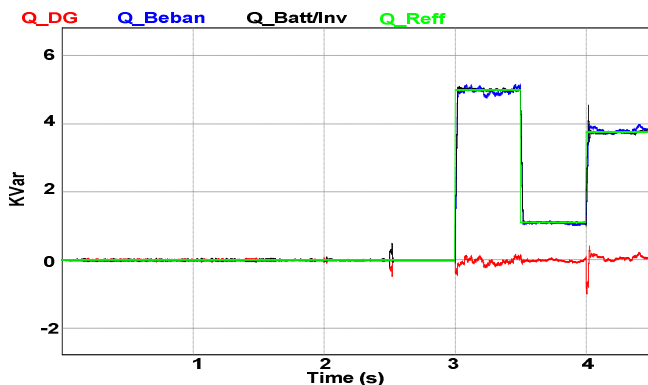


Gbr. 12 Gangguan pada frekuensi akibat ketidakseimbangan daya antara pembangkit dengan beban

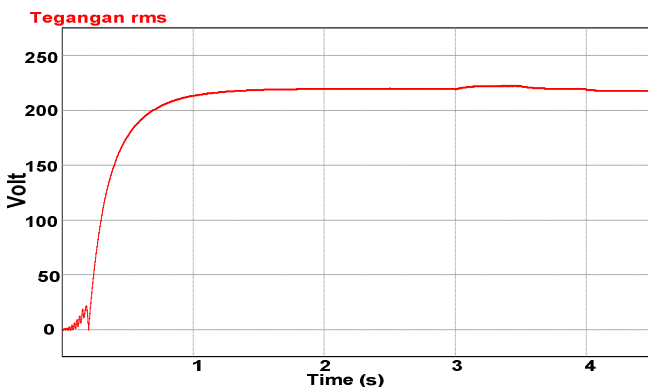
Gbr. 13 sampai Gbr. 16 merupakan simulasi saat grid telah terhubung dengan sistem kendali penyimpanan energi listrik. Karena mulanya beban yang terpasang merupakan beban dalam keadaan normal maka tidak ada daya yang ditransfer dari baterai ke grid atau sebaliknya. Selanjutnya daya inverter akan dibangkitkan secara manual sesuai dengan daya yang dibutuhkan grid sehingga tegangan dan frekuensi tetap dalam kondisi normal. Nilai negatif pada daya referensi menandakan transfer daya akan terjadi dari sisi grid ke sisi baterai, sedangkan nilai positif transfer daya terjadi dari sisi baterai. Frekuensi alami dan faktor redaman pada kendali arus yaitu $\omega_c = 4000$ rad/sec dan $\xi = 0.707$.



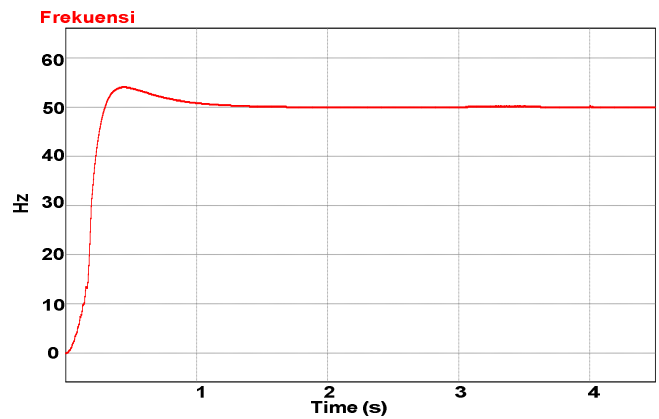
Gbr. 13 Daya aktif saat sistem kendali beroperasi



Gbr. 14 Daya reaktif saat sistem kendali beroperasi



Gbr. 15 Tegangan rms setelah sistem kendali beroperasi



Gbr. 16 Frekuensi setelah sistem kendali beroperasi

VI. KESIMPULAN

Sistem yang dirancang merupakan sistem kendali daya aktif dan reaktif pada inverter tiga fase. Penggunaan baterai sebagai sumber dc pada inverter memungkinkan sistem untuk mentransfer energi listrik dari baterai ke grid atau sebaliknya. PLL juga dibutuhkan untuk menjamin sistem selalu dalam kondisi sinkron dengan grid.

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa sistem telah mampu menghasilkan daya aktif dan daya reaktif sesuai dengan daya referensinya. Gangguan berupa perubahan tegangan dan frekuensi akibat ketidak seimbangan daya antara pembangkit dan beban dapat lebih ditekan.

Nilai referensi dari daya aktif dan reaktif dibangkitkan secara manual sehingga penelitian masih perlu dilanjutkan supaya kendali daya aktif dan reaktif sepenuhnya dapat dilakukan secara otomatis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat diselesaikan karena doa, dukungan, dan semangat yang diberikan oleh semua pihak.

REFERENSI

- [1] Robert H. Lasseter and Paolo Piagi, "Microgrid: A Conceptual Solution", *PESC'04 Aachen*, Germany: 20-25 June 2004.
- [2] Zeineldin, H. H., and J.L. Kirtley., "Micro-grid Operation of Inverter Based Distributed Generation with Voltage and Frequency Dependent Loads", *Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting, (PES '09)*, 2009, pp 1 – 6.
- [3] Paolo Piagi and Robert H. Lasseter, "Autonomous Control of Microgrids", *IEEE PES Meeting*, Montreal: June 2006.
- [4] Kim Jong-Yul, Kim Seul-Ki and Park June-Ho, "Contribution of an Energi Storage System for Stabilizing a Microgrid during Islanded Operation", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 194-200, 2009.
- [5] Binduhewa P. J, Barnes Mike and Renfrew Alasdair, "Standard Microsource Interface For a Microgrid", *CIREC Seminar 2008: Smart Grids for Distribution*, Frankfurt: 23 - 24 June 2008.
- [6] Santiprapan P., Areerak K-L. and Areerak K-N, "Mathematical Model and Control Strategy on DQ Frame for Shunt Active Power Filters", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011.
- [7] Kim Dong-Eok and Lee Dong-Choon, "Inverter Output Voltage Control of Three-Phase UPS Systems Using Feedback Linearization", *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Taiwan: Nov. 5-8, 2007.

- [8] Abdalrahman Ahmed, Zekry Abdalhalim and Alshazly Ahmed," Simulation and Implementation of Grid-connected Inverters", *International Journal of Computer Applications*, vol. 60, no.4, December 2012.
- [9] Botterón F., Pinheiro H., Gründling H. A., Pinheiro J.R., Hey H. L.," Digital Voltage and Current Controllers for Three-Phase PWM Inverter for UPS Applications", *IEEE: 0-7803-7116-X/01*, 2001, pp 2667-2674.
- [10] Gaiceanu Marian," Integral State Feedback Control of Ggrid Power Inverter", *Buletinul AGIR nr. 3/2012, iunie-august*, 2012.
- [11] Anwar Muqorobin and Estiko Rijanto," Perancangan Kontroler DC Link Inverter Sisi Jala-jala pada Kondisi Faktor Daya 1 untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu 100kW", *INKOM*. Nov 2010, vol. IV no. 2, pp IV 69-80.