

PENGENDALIAN STABILITAS MIKROGRID BERBASIS PLTB TERISOLASI MENGGUNAKAN ALGORITMA SYNCHRONVERTER

Mohd. Brado Frasetyo¹

¹ Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Padang

E-Mail:

¹ mohdbrado@pnp.ac.id

ABSTRACT

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki wilayah terpencil yang menghadapi tantangan akses listrik, seperti Kabupaten Adaut di Maluku Barat. Salah satu solusi untuk mengatasi hal ini adalah penerapan sistem mikrogrid berbasis energi terbarukan, seperti PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu). Namun, integrasi sumber energi terbarukan ke dalam mikrogrid berpotensi menimbulkan gangguan stabilitas frekuensi dan tegangan akibat sifat intermiten sumber energi dan fluktuasi beban. Penelitian ini mengusulkan penggunaan algoritma *synchronverter* sebagai strategi kontrol untuk meningkatkan stabilitas operasional mikrogrid terisolasi (*islanded*) berbasis PLTB. Metode yang digunakan adalah simulasi kinerja mikrogrid dengan membandingkan respons sistem yang menggunakan *synchronverter* terhadap sistem yang mengadopsi generator sinkron konvensional. Parameter uji meliputi masukan kecepatan angin yang tidak stabil (*intermittent wind speed*) dan perubahan beban bertahap. Hasil simulasi menunjukkan bahwa mikrogrid dengan *synchronverter* mampu mempertahankan stabilitas frekuensi dan tegangan dalam kondisi dinamis, sementara sistem konvensional mengalami osilasi. *Synchronverter* juga menunjukkan respons lebih cepat dalam menyeimbangkan fluktuasi daya dibandingkan generator konvensional. Temuan ini membuktikan bahwa *synchronverter* efektif sebagai solusi kontrol adaptif untuk meningkatkan ketahanan mikrogrid terisolasi berbasis PLTB di wilayah kepulauan.

ARTICLE INFO

Keywords:

Mikrogrid;
Synchronverter; PLTB;
Kendali; Stabilitas

Article History

Submitted:

13-12-2024

Accepted:

01-01-2025

Published:

02-01-2025

Corresponding Author:

Mohd.Brado Frasetyo, mohdbrado@pnp.ac.id

1. INTRODUCTION

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki banyak pulau terpencil yang mengalami kesulitan akses listrik, salah satunya Kabupaten Adaut di Maluku Barat (PLN, 2021). Solusi untuk mengatasi masalah ini adalah dengan membangun sistem mikrogrid (jaringan listrik mandiri)

yang dapat diimplementasikan di wilayah terpencil. Namun, integrasi sumber energi terbarukan (seperti tenaga angin atau surya) ke dalam mikrogrid berpotensi menimbulkan gangguan teknis, seperti ketidakstabilan frekuensi dan tegangan, akibat sifat intermiten sumber energi dan fluktuasi beban (Shuai et al., 2016; Haritha & Nair, 2018). Oleh karena itu, diperlukan algoritma kontrol yang mampu menjaga stabilitas sistem secara dinamis.

Salah satu algoritma yang berkembang pesat adalah *synchronverter* (Zhong & Weiss, 2011; D'Arco & Suul, 2013; Cheema, 2020), sebuah sistem elektronika daya yang meniru karakteristik dinamis *generator* sinkron konvensional (Frasetyo et al., 2021). *Synchronverter* menggabungkan *energy storage system*, *inverter*, dan algoritma kontrol yang menyerupai mekanisme *governor* dan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) pada generator konvensional. Dengan demikian, frekuensi dan tegangan dapat dikontrol berdasarkan kebutuhan daya aktif (*active power*) dan daya reaktif (*reactive power*).

Penelitian terkait stabilitas frekuensi dan tegangan pada mikrogrid menggunakan *synchronverter* telah dilakukan dalam beberapa studi sebelumnya. Misalnya, Bevrani et al., (2014) mengimplementasikan *synchronverter* sebagai pengendali *inverter* berbasis elektronika daya. Studi ini menunjukkan bahwa *synchronverter* mampu menginjeksikan daya aktif dan reaktif secara otomatis sesuai kebutuhan beban melalui mekanisme *droop frequency* dan *voltage regulation*. Namun, penelitian tersebut hanya menggunakan skenario satu *generator*, sehingga diperlukan kajian lebih lanjut untuk mengevaluasi kinerja *synchronverter* pada mikrogrid dengan *multi-generator*, khususnya yang berbasis energi terbarukan.

Beberapa penelitian lain menggunakan *synchronverter* pada mikrogrid dengan satu sumber energi terbarukan, seperti PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) atau PLTS (Vasudevan et al., 2020; Rosso et al., 2019; Nair & Kanakasabapathy, 2018; Zhong et al., 2014; Hesse et al., 2009; Visscher & De Haan, 2008; Hirase et al., 2018). Padahal, secara praktis, mikrogrid dapat terdiri dari beberapa sumber energi terbarukan (PLTB, PLTS, mikrohidro, dll.) yang terhubung secara paralel. Oleh karena itu, penelitian terkait *synchronverter* perlu dikembangkan untuk skenario multi-sumber energi terbarukan.

Studi Trujillo et al., (2019) mensimulasikan *synchronverter* dalam dua skenario: operasi tunggal dan terhubung paralel, dengan pengujian kinerja pada kondisi *transient* dan *steady-state*. Sementara itu, Kustanovich & Weiss (2019) mengintegrasikan *synchronverter* pada PLTS skala kecil dengan jaringan listrik utama, tetapi hanya fokus pada skenario *grid-connected*. Padahal, mikrogrid harus mampu beroperasi dalam mode terisolasi (*islanded*) saat terjadi gangguan pada jaringan utama. Dengan demikian, diperlukan penelitian lebih mendalam terkait kinerja *synchronverter* pada mikrogrid terisolasi berbasis *multi-generator*.

Berdasarkan tinjauan literatur, belum ada penelitian yang mengembangkan algoritma *synchronverter* pada mikrogrid terisolasi dengan *multi-generator* berbasis energi terbarukan. Pada studi ini, *synchronverter* diimplementasikan pada mikrogrid terisolasi berbasis PLTB untuk menjaga stabilitas jaringan. Kinerja sistem dievaluasi dengan membandingkan respons stabilitas mikrogrid yang menggunakan *synchronverter* terhadap *generator* sinkron konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma *synchronverter* mampu mempertahankan stabilitas frekuensi dan tegangan meskipun mendapat masukan kecepatan angin intermiten dan perubahan beban tiba-tiba.

2. METHOD

2.1 Synchronverter

Synchronverter merupakan sistem elektronika daya yang memiliki algoritma kontrol unik. Model yang digunakan pada sistem ini mengadopsi prinsip kerja yang sama dengan generator sinkron konvensional (Grainger & W.D. Stevenson, 1994).

Model *synchronverter* dalam penelitian ini menggunakan Persamaan (1), (2), (3), (4), dan (5). Selanjutnya, formula tersebut akan ditambahkan asumsi arus rotor konstan untuk

menyederhanakan perhitungan. Meskipun asumsi ini bukanlah pendekatan ideal, hal ini diperlukan untuk mempermudah desain kontroler. Jika *synchronverter* dianggap sebagai *inverter* berkapasitas kecil dalam sistem besar, jaringan utama akan diasumsikan sebagai bus infinit (*infinite bus*) dengan tegangan dan frekuensi tetap. Persamaan *synchronverter* yang dimodifikasi adalah sebagai berikut:

$$v = -R_s i - L_s \frac{di}{dt} + e,$$

$$e = \omega M_f i_f \sin \theta,$$

$$T_e = M_f i_f \langle i, \sin \theta \rangle,$$

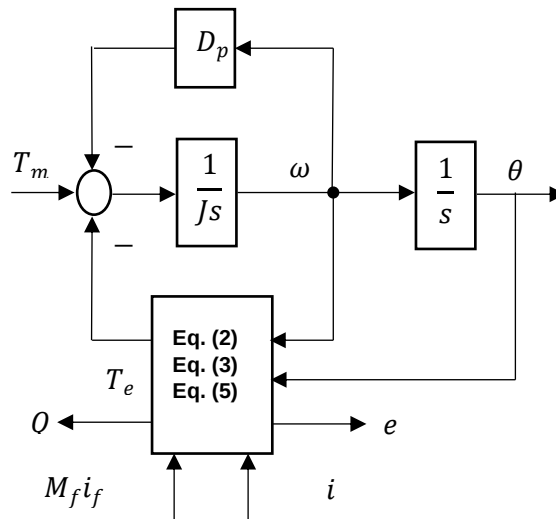
$$J\dot{\omega} = T_m - T_e - D_p \omega, \text{ with } \omega = \dot{\theta}$$

Daya aktif dan daya reaktif didefinisikan sebagai $P = \langle i, e \rangle$ dan $Q = \langle i, e_{quad} \rangle$, dengan $e_{quad} = -\omega M_f i_f \cos \theta$. Daya aktif dan daya reaktif dapat dihitung dengan persamaan:

$$P = \omega M_f i_f \langle i, \sin \theta \rangle, \quad (5)$$

$$Q = -\omega M_f i_f \langle i, \cos \theta \rangle.$$

Persamaan tersebut dapat diimplementasikan ke dalam blok diagram pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Synchronverter.

Penting untuk diperhatikan bahwa jika tidak terjadi gesekan yang signifikan, torsi virtual rotor adalah $T_m - D_p \omega$. Dengan demikian, persamaan ini bergantung pada ω yang merupakan umpan balik atau disebut frequency droop. Selain itu, torsi T_m dapat dianggap konstan atau bernilai variabel tergantung kebutuhan pengguna.

Frekuensi synchronverter akan mengikuti frekuensi jaringan. Synchronverter akan menyesuaikan daya keluaran jika frekuensi menyimpang dari frekuensi nominal: Jika frekuensi synchronverter melebihi set-point, daya keluaran akan dikurangi. Sebaliknya, jika frekuensi lebih rendah, daya keluaran akan ditingkatkan.

Nilai koefisien droop D_p merupakan nilai yang umum digunakan pada generator sinkron konvensional. Sebagai contoh, standar generator Eropa menggunakan perubahan frekuensi 3% untuk mengakomodasi variasi daya 100% dari nilai nominal.

Parameter kritis lainnya adalah inersia J . Nilai J harus sesuai dengan generator sinkron asli. Namun untuk synchronverter, nilai J sebaiknya lebih kecil karena memengaruhi kecepatan respons sistem terhadap perubahan. Konstanta waktu H generator sinkron dinyatakan sebagai: $H = \frac{1}{2} J \omega^2 / P_n$ dengan batasan: $2 \text{ s} \leq H \leq 12 \text{ s}$. Hal ini menyebabkan: $J \geq 4 P_n / \omega_n^2$ dan $D_p = P_n / (\text{droop rate} \times \omega_n^2)$, di mana droop rate biasanya sekitar 0.03 (3% perubahan ω_n menghasilkan T_m sebesar 100% daya nominal).

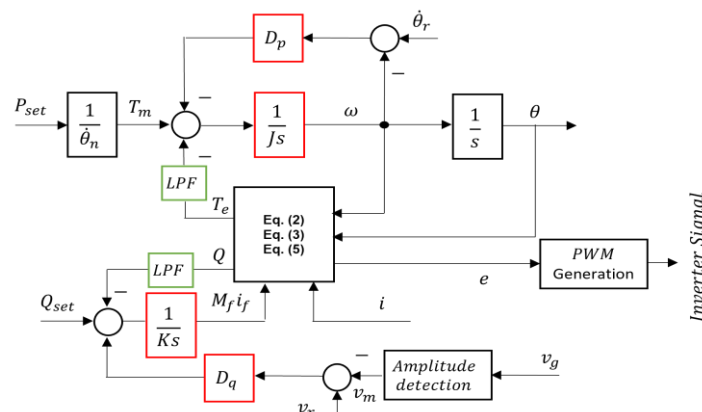
Pada pengendalian daya reaktif dan tegangan, diperlukan kontrol tambahan. Arus rotor dianggap konstan atau berubah secara perlahan, karena medan magnet pada rotor berpengaruh signifikan terhadap tegangan generator sinkron (sesuai Persamaan 2). Tegangan internal e merupakan variabel terpenting (Persamaan 1) mengingat resistansi dan induktansi stator yang relatif kecil. Pendekatan berikut kemudian digunakan:

$$Q = 3 \left[\frac{VE}{X} \cos(\delta) - \frac{V^2}{X} \right] \quad (6)$$

Dengan V , E , δ , and $X = \omega L_s$ adalah tegangan rms pada terminal synchronverter, tegangan internal (e) nilai rms, sudut daya, dan nilai absolut dari impedansi stator, secara berurutan. Berdasarkan Persamaan (2) dan (5), fluks pada rotor dapat dimanfaatkan untuk mengontrol E dan daya reaktif Q melalui mekanisme kontrol integral sederhana. Q dapat dikendalikan melalui perubahan fluks rotor dengan perubahan daya aktif P yang minimal, mengingat P sudah dikontrol melalui mekanisme frequency droop. Oleh karena itu, ditambahkan mekanisme droop tambahan untuk mengontrol tegangan yang bergantung pada daya reaktif sebagai berikut:

$$D_q = -\frac{Q - Q_{set}}{V - V_n} = -\frac{\Delta Q}{\Delta V} \geq 0. \quad (7)$$

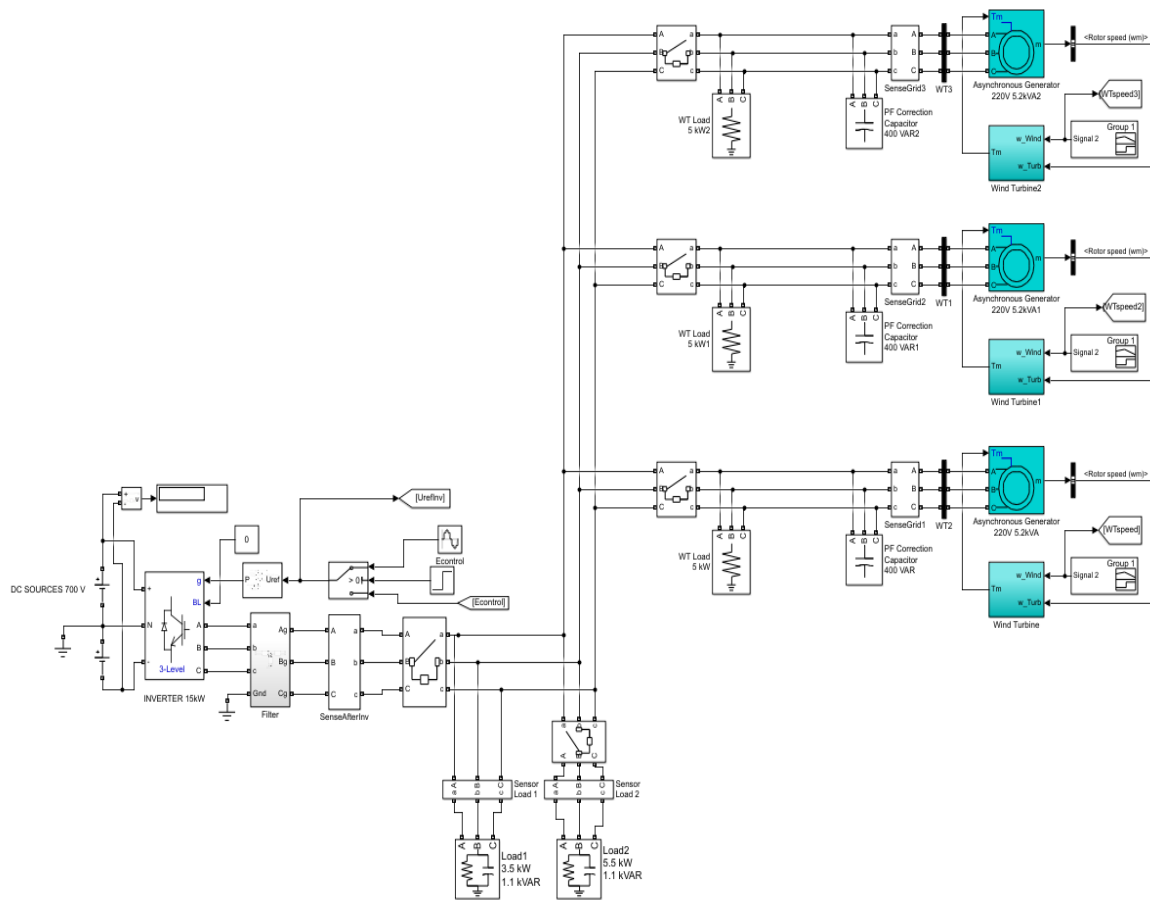
Dengan Q , Q_{set} , V , V_n adalah keluaran daya reaktif, daya reaktif yang diinginkan untuk tegangan nominal, tegangan rms yang terukur pada terminal synchronverter, dan tegangan rms nominal. Selanjutnya, integrator kendali flux rotor mempunyai pengali $\frac{1}{K} > 0$. Pemilihan nilai K dan D_q tergantung dari kebutuhan pengguna dengan melakukan tuning. Semakin besar nilai K berarti sistem semakin stabil tetapi cenderung responnya lambat. Semakin tinggi nilai D_q berarti synchronverter akan bekerja lebih keras untuk mengoreksi nilai tegangan dan daya reaktif yang diinginkan. Blok diagram synchronverter beserta kendalinya dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Blok diagram dan kendali synchronverter

2.2 Skenario Simulasi

Penelitian ini menggunakan Simulink untuk mensimulasikan sistem mikrogrid dengan kontrol synchronverter. Mikrogrid terdiri dari tiga turbin angin (wind turbine/WT), synchronverter, dan beban lokal. Input synchronverter berasal dari sumber DC berupa baterai. Algoritma synchronverter diterapkan untuk mengontrol output inverter baterai. Dalam simulasi ini, synchronverter dianggap sebagai satu kesatuan dengan baterai - dimana baterai berperan sebagai sumber DC konstan dan inverter sebagai perangkat elektronika dayanya. Untuk menguji performa kontrol synchronverter terhadap perubahan daya, setiap WT diberikan nilai input kecepatan angin yang berbeda. Diagram blok Simulink untuk sistem mikrogrid dengan kontrol synchronverter dapat dilihat pada Gambar 3, sedangkan nilai parameter sistem mikrogrid disajikan dalam Tabel 1.



Gambar 3. Blok diagram Simulink untuk simulasi mikrogrid

Dalam penelitian ini, dilakukan simulasi mikrogrid berbasis pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) yang beroperasi secara islated dengan menerapkan algoritma *synchronverter*. Tujuan utama dari simulasi ini adalah untuk menganalisis kemampuan algoritma *synchronverter* dalam menjaga kestabilan nilai tegangan dan frekuensi agar tetap berada pada nilai nominalnya. Beberapa variabel yang diamati dalam skenario simulasi ini meliputi tegangan, frekuensi, daya inverter, daya turbin angin (WT), serta beban. Untuk menguji respons algoritma kendali terhadap perubahan kondisi sistem, simulasi dilakukan dengan dua skenario perubahan sebagai berikut: Kondisi 1: Perubahan beban (peningkatan atau penurunan). Kondisi 2: Perubahan kecepatan angin yang memengaruhi daya keluaran turbin angin. Dengan melakukan simulasi berdasarkan kedua kondisi di atas, dapat dianalisis sejauh mana algoritma *synchronverter* mampu

mempertahankan nilai frekuensi dan tegangan agar tetap stabil dan sesuai dengan nilai nominal, meskipun terjadi fluktuasi beban maupun variasi input daya dari turbin angin.

Tabel 1. Parameter Mikrogrid

Parameters	Value
J	0.2 kgm^2
D_p	1.7
K	$5e4$
D_q	120
R_s	0.152Ω
L_s	15 mH
C	$10 \mu F$
L_g	15 mH
Sample Time	1e-5 second
v_n	220 Volt
$M_f i_f$ initial condition	0
Inverter Capacity	20 kW
Inverter Current	0-80 A
P_n	3.5 kW
Q_n	0 VAR
Wind Turbine Capacity	5.2 kVA
Load 1	3.5 kW, 1.1 kVAR
Load 2	5.5 kW, 1.1 kVAR
Wind Turbine Load	5 kW
Capacitor Bank	400 VAR
V_{dc}	700 V

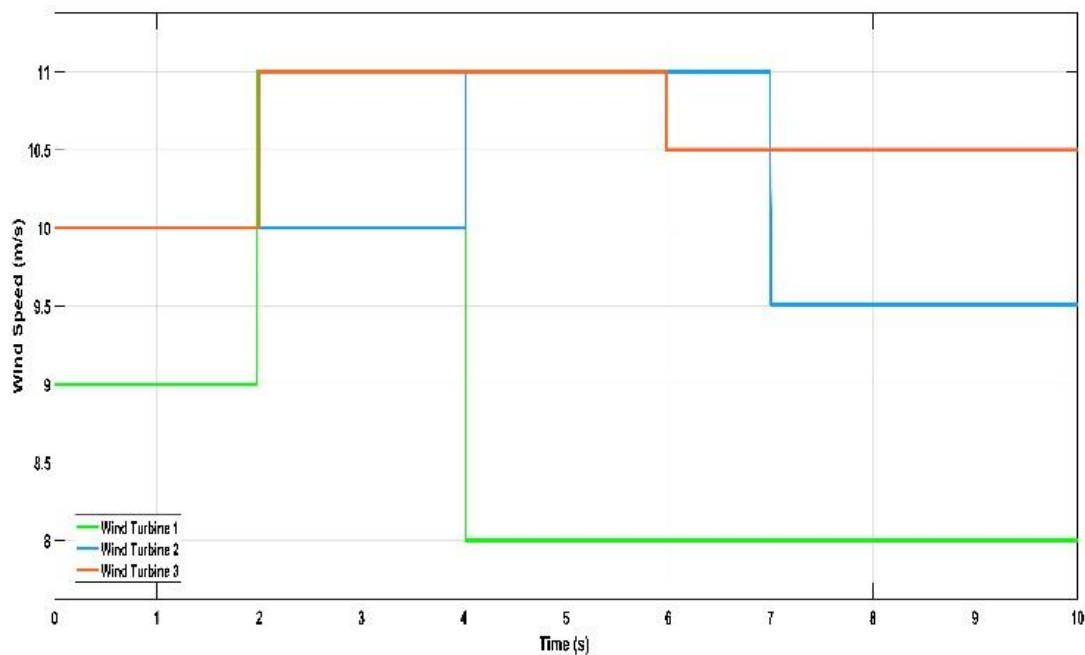
3. RESULT AND DISCUSSION

Stabilitas mikrogrid dibandingkan antara respons sistem yang menggunakan synchronverter dengan sistem yang menggunakan synchronous generator. Hasil dari penelitian ini akan dijelaskan sebagai berikut.

Dalam studi ini, skenario simulasi *synchronverter* untuk stabilitas mikrogrid dilakukan selama 10 detik dengan skema pengujian sebagai berikut:

- Pada detik ke-0, turbin angin dihubungkan ke inverter.
- Pada detik ke-0 hingga detik ke-2, beban 1 (3,5 kW dan 1,1 kVAR) serta beban internal dari turbin angin (5 kW) dihubungkan ke sistem.
- Pada detik ke-2 hingga detik ke-4, beban 2 (5,5 kW dan 1,1 kVAR) ditambahkan ke sistem, kemudian dilepaskan kembali.
- Kecepatan angin turbin divariasikan mulai dari detik ke-2 hingga detik ke-7 sesuai dengan yang ditunjukkan pada Gambar 4.
- Pada detik ke-7 hingga detik ke-10, beban 1 dan seluruh beban internal turbin angin dijaga tetap konstan.

Melalui skenario ini, performa synchronverter dalam menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi dianalisis, serta dibandingkan dengan karakteristik respons *synchronous generator* dalam kondisi yang sama. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan algoritma *synchronverter* dalam menghadapi variasi beban dan sumber energi yang dinamis dalam sistem mikrogrid.



Gambar 4. Input Kecepatan Angin PLTB

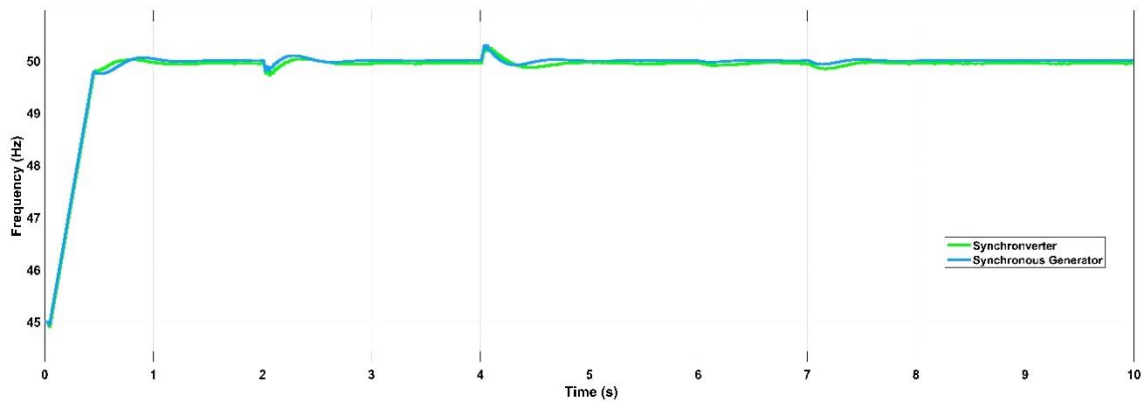
Skenario simulasi ini juga diterapkan pada mikrogrid berbasis turbin angin (Wind Turbine/WT) yang menggunakan synchronous generator sebagai kendali stabilitas. Selanjutnya, respons tegangan dan frekuensi dari mikrogrid yang menggunakan synchronverter dan synchronous generator akan dibandingkan. Tujuan dari perbandingan ini adalah untuk menganalisis apakah karakteristik respons synchronverter serupa dengan synchronous generator konvensional dalam menjaga kestabilan mikrogrid.

Dalam simulasi ini, terdapat dua variabel yang divariasikan, yaitu beban mikrogrid dan perubahan kecepatan angin (meningkat/menurun). Variasi ini digunakan untuk menguji sejauh mana algoritma *synchronverter* mampu merespons perubahan kondisi dalam sistem mikrogrid.

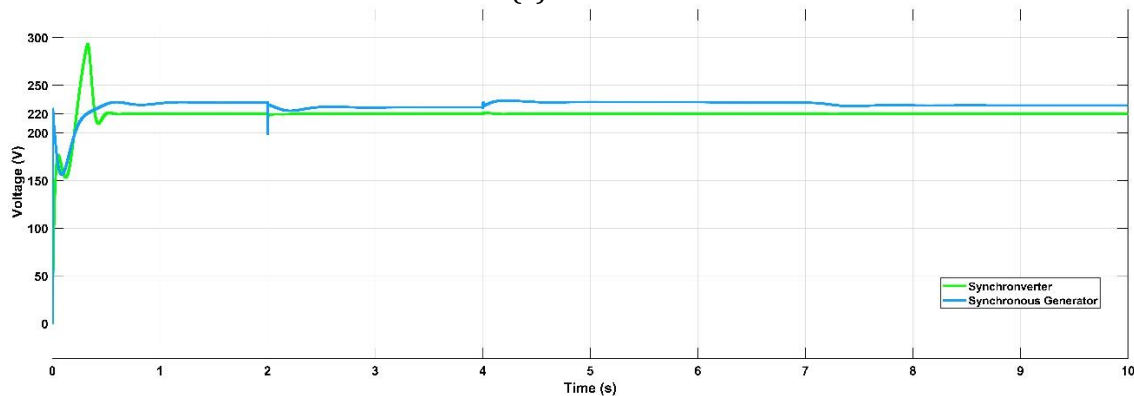
Variabel yang diukur dalam simulasi meliputi frekuensi dan tegangan mikrogrid. Selain itu, daya aktif dan daya reaktif keluaran dari *synchronverter*, *synchronous generator*, dan turbin angin juga dibandingkan untuk keperluan analisis. Nilai frekuensi dan tegangan sistem dapat dilihat pada Gambar 5, sementara data daya aktif dan reaktif dari *synchronverter*, *synchronous generator*, dan turbin angin ditampilkan pada Gambar 6.

Hasil pada Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai frekuensi dan tegangan mikrogrid tetap berada pada nilai nominalnya. Hal ini berlaku untuk kedua metode kendali stabilitas, baik menggunakan *synchronverter* maupun *synchronous generator*. Nilai *steady state* tegangan pada sistem *synchronous generator* tercatat sedikit lebih tinggi, sekitar 5 Volt dibandingkan dengan sistem *synchronverter*, namun masih berada dalam batas toleransi yang diperbolehkan.

Pada Gambar 6, terlihat bahwa inverter mampu menyuplai daya sesuai dengan permintaan beban sistem dan keluaran turbin angin. Sebagai contoh, ketika kecepatan angin meningkat, *synchronverter* akan mengurangi daya yang disuplai. Sebaliknya, saat kecepatan angin menurun, *synchronverter* akan meningkatkan daya keluaran. Dengan mekanisme ini, sistem dapat mempertahankan kondisi stabil pada nilai nominalnya. Selain itu, *synchronverter* juga secara aktif menyesuaikan daya yang disuplai ke sistem mikrogrid berdasarkan perubahan beban guna menjaga kestabilan sistem. Karena daya keluaran turbin angin bergantung pada kecepatan angin, maka inverter memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan daya beban secara real-time.



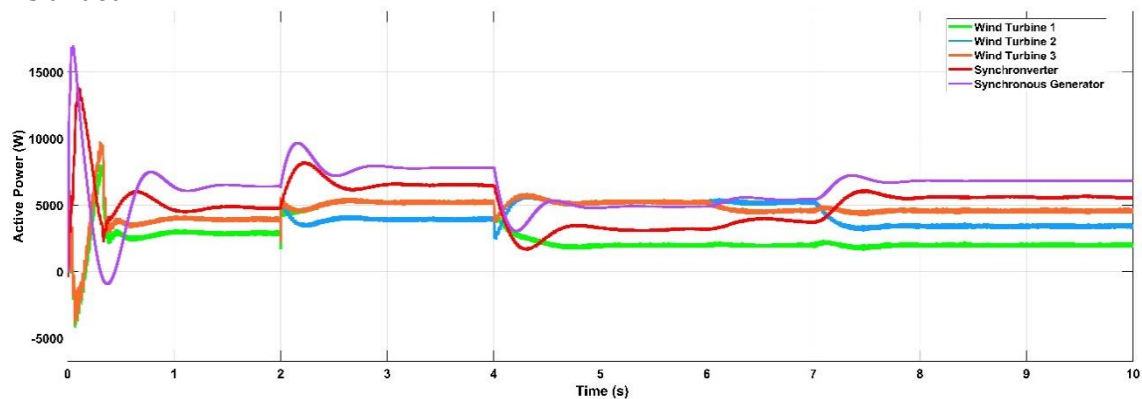
(a) Frekuensi



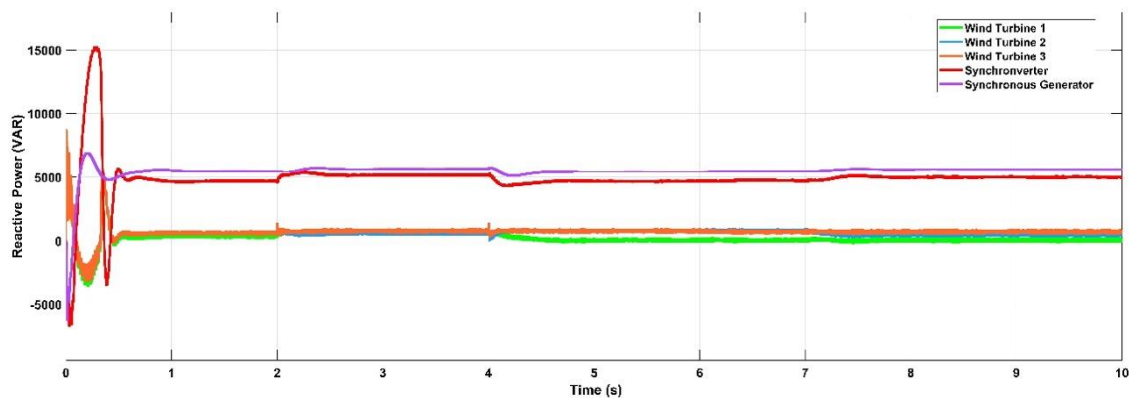
(b) Tegangan

Gambar 5. (a) Frekuensi dan (b) Tegangan Mikrogrid.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, daya keluaran dari *synchronous generator* sedikit lebih tinggi dibandingkan daya keluaran dari *synchronverter*. Namun demikian, algoritma *synchronverter* menunjukkan karakteristik respons yang serupa dengan *synchronous generator* konvensional. Hal ini terlihat dari kemampuannya dalam menyesuaikan daya keluaran terhadap perubahan beban dan variasi daya dari turbin angin. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa algoritma *synchronverter* dapat digunakan sebagai alternatif dari *synchronous generator* dalam menjaga kestabilan sistem mikrogrid yang beroperasi secara *islanded*.



(a) Active Power



(b) Reactive Power

Gambar 6. (a) Daya aktif dan (b) Daya reaktif dari synchronverter dan PLTB.

4. CONCLUSION

Synchronverter merupakan perangkat elektronika daya yang mengadopsi karakteristik *synchronous generator* untuk mengendalikan stabilitas sistem tenaga listrik. Dalam penelitian ini, algoritma *synchronverter* digunakan untuk mengendalikan stabilitas mikrogrid berbasis pembangkit listrik tenaga angin. Sistem mikrogrid yang disimulasikan terdiri dari tiga turbin angin yang terhubung secara paralel, masing-masing dilengkapi dengan beban lokal. Pengujian dilakukan dengan membandingkan respons stabilitas mikrogrid yang dikendalikan oleh *synchronverter* dan *synchronous generator* konvensional. Variabel utama yang dianalisis adalah kestabilan frekuensi dan tegangan, dengan nilai standar masing-masing sebesar 50 Hz dan 220 V. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma *synchronverter* mampu memberikan performa stabilitas yang baik. Selain itu, *synchronverter* juga terbukti dapat mempertahankan kestabilan sistem mikrogrid meskipun menghadapi gangguan berupa variasi kecepatan angin yang bersifat intermiten serta beberapa perubahan beban selama proses simulasi berlangsung.

REFERENCE

- Bevrani, H., Ise, T., & Miura, Y. (2014). Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 54, 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.009>
- Cheema, K. M. (2020). A comprehensive review of virtual synchronous generator. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 120(December 2019), 106006. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106006>
- D'Arco, S., & Suul, J. A. (2013). Virtual synchronous machines - Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids. *2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech, POWERTECH 2013*. <https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652456>
- Frasetyo, M. B., Wijaya, F. D., & Firmansyah, E. (2021). Review on virtual synchronous generator model and control for improving microgrid stability. *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2021*, 397–402. <https://doi.org/10.1109/ICEES51510.2021.9383646>
- Grainger, J. J., & W.D. Stevenson. (1994). *Power System Analysis*. McGraw-Hill, New York.
- Haritha, M. S., & Nair, D. S. (2018). Review on virtual synchronous generator (VSG) for enhancing performance of microgrid. *EPSCICON 2018 - 4th International Conference on Power, Signals, Control and Computation*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/EPSCICON.2018.8379587>
- Hesse, R., Turschner, D., & Beck, H. (2009). Micro grid stabilization using the Virtual

- Synchronous Machine (VISMA). *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*.
- Hirase, Y., Abe, K., Sugimoto, K., Sakimoto, K., Bevrani, H., & Ise, T. (2018). A novel control approach for virtual synchronous generators to suppress frequency and voltage fluctuations in microgrids. *Applied Energy*, 210, 699–710.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.058>
- Kustanovich, Z., & Weiss, G. (2019). Synchronverter based photovoltaic inverter. *2018 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering in Israel, ICSEE 2018*, 3–7.
<https://doi.org/10.1109/ICSEE.2018.8646184>
- Nair, N. R., & Kanakasabapathy, D. P. (2018). A Three Phase Grid Connected SPV System using Synchronverter. *India International Conference on Power Electronics, IICPE, 2018-Decem*.
<https://doi.org/10.1109/IICPE.2018.8709501>
- PLN. (2021). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030. *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030*, 2019–2028.
- Rosso, R., Engelken, S., & Liserre, M. (2019). Robust stability analysis of synchronverters operating in parallel. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(11), 11309–11319.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2896707>
- Shuai, Z., Sun, Y., Shen, Z. J., Tian, W., Tu, C., Li, Y., & Yin, X. (2016). Microgrid stability: Classification and a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 167–179.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.201>
- Trujillo, M. D., Mendez, S., Ramos, G., Camarillo-Penaranda, J., & Jurado, E. (2019). Real-time Simulation of Synchronverter Connected to the Main Grid. *2019 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2019 - Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/PEPQA.2019.8851569>
- Vasudevan, K. R., Ramachandaramurthy, V. K., Babu, T. S., & Pouryekta, A. (2020). Synchronverter: A Comprehensive Review of Modifications, Stability Assessment, Applications and Future Perspectives. *IEEE Access*, 8, 131565–131589.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010001>
- Visscher, K., & De Haan, S. W. H. (2008). Virtual synchronous machines (VSG'S) for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralized generation. *IET Seminar Digest*, 2008(12380), 23–24. <https://doi.org/10.1049/ic:20080487>
- Zhong, Q. C., Nguyen, P. L., Ma, Z., & Sheng, W. (2014). Self-synchronized synchronverters: Inverters without a dedicated synchronization unit. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(2), 617–630. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2258684>
- Zhong, Q. C., & Weiss, G. (2011). Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1259–1267.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2048839>