

Perbandingan Metode MPPT *Incremental Conductance* *Incremental Resistance* dan *Hill Climbing* dengan PSIM

Dimas Nur Prakoso, Achmad Afandi, Miftahul Arrijal, Rizqy Abdurrahman,

Novie Ayub Windarko

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Jalan Raya ITS, Keputih, Surabaya 60111, Indonesia

E-mail: dimasnprakoso@gmail.com

ABSTRACT

Increasing energy requirements require us to create renewable energy that is environmentally friendly such as utilizing sunlight. By using tracking techniques such as Maximum Power Point Tracking (MPPT) will produce maximum power so that the solar cell works efficiently. The MPPT method which is simulated in this PSIM software is Incremental Conductance, Incremental Resistance and Hill Climbing. By implanting the MPPT Incremental Conductance Method in the solar cell, a maximum power of 91,47 Watt will be generated with a time of 0.018 seconds, whereas if implanting the MPPT Incremental Resistance method in a solar cell will get a maximum power of 90.35 watt, a faster time than the previous method, and if implanting the MPPT Hill Climbing method to make the solar cell efficient it is necessary to add the KMPP value equal to 5 to get the maximum MPP value and not oscillate. So the Incremental Conductance method by adding a variable step size should be use to search the maximum power from all three methods .

Keywords: *MPPT, Incremental Conductance, Incremental Resistance, Hill Climbing, PSIM*

ABSTRAK

Kebutuhan energi yang semakin tinggi mengharuskan kita untuk menciptakan energi terbarukan yang ramah lingkungan seperti memanfaatkan cahaya matahari. Dengan menggunakan Teknik tracking seperti Maximum Power Point Tracking MPPT (MPPT) akan menghasilkan daya yang maksimal sehingga solar cell bekerja secara efisien. Metode MPPT yang disimulasikan di software PSIM ini adalah Incremental Conductance, Incremental Resistance dan Hill Climbing. Dengan menanamkan Metode MPPT Incremental Conductance pada solar cell maka akan dihasilkan daya maksimum sebesar 91,47 Watt dengan waktu 0,018 detik, sedangkan jika menanamkan metode MPPT Incremental Resistance pada solar cell akan di dapatkan daya maksimum sebesar 90,35 watt dengan waktu yang lebih cepat dari metode sebelumnya, dan jika menanamkan metode MPPT Hill Climbing untuk mengefisienkan solar cell diharuskan menambahkan nilai KMPP sama dengan 5 untuk mendapatkan nilai MPP yang maksimal dan tidak berosilasi. Jadi jika untuk

mencari daya yang sangat maksimal dari ketiga metode sebaiknya menggunakan metode Incremental Conductance dengan menambahkan variable step size.

Kata kunci: MPPT, Incremental Conductance, Incremental Resistance, Hill Climbing, PSIM

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan daya listrik dan kondisi lingkungan yang berubah, seperti pemanasan global, mendorong kebutuhan untuk mendapatkan sumber energi yang lebih murah dan lebih bersih. Energi matahari cukup menjanjikan dalam menyelesaikan masalah tersebut. Pemerintah juga mendorong pemanfaatan energi matahari melalui beberapa peraturan. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 17/2013 Pasal 2 Ayat 1 yang menyatakan bahwa dalam rangka memenuhi kebutuhan tenaga listrik nasional melalui pemanfaatan energi surya yang ramah lingkungan, pemerintah menugaskan PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) untuk membeli tenaga listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Pada tahun 2014 peraturan pemerintah tentang Kebijakan Energi Nasional, pada tahun 2025 peran Energi Baru dan Energi Terbarukan paling sedikit 23% dan pada tahun 2050 paling sedikit 31% [1].

Pemanfaatan energi matahari menggunakan modul PV memiliki masalahnya sendiri yang muncul akibat dari perubahan iradiasi matahari. Memanfaatkan sistem PV sebagai sumber energi alternatif membutuhkan biaya investasi awal yang besar. Untuk mengefisienkan biaya sistem PV, pengoperasian daya keluaran maksimum dari modul PV menjadi pertimbangan penting. Daya keluaran maksimum tergantung pada intensitas radiasi, suhu sekitar dan impedansi beban [2]–[4].

Banyak penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan daya keluaran modul PV. Sejumlah metode untuk menghasilkan daya keluaran maksimum pada modul PV telah diusulkan. Metode ini sebagian telah digunakan pada produk komersial. Metode ini biasa disebut sebagai *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). Metode MPPT digunakan untuk mengekstraksi daya maksimum dari modul PV dan mentransfer daya tersebut ke beban melalui konverter daya [5]. Dengan mengubah *duty cycle* konverter daya, impedansi beban seakan-akan diatur agar modul PV beroperasi pada daya maksimum. Namun metode MPPT yang dimaksudkan untuk meningkatkan output

daya modul PV, belum tentu bisa beroperasi sesuai harapan. Studi perbandingan ini dilakukan untuk melihat kinerja beberapa metode MPPT.

2. Kajian Pustaka

Metode MPPT tidak hanya meningkatkan daya yang dikirim dari modul PV ke beban, tetapi juga meningkatkan *lifetime* sistem PV [6]. Berbagai metode MPPT telah dikembangkan dan diimplementasikan [7], [8]. Metode ini dapat dibedakan berdasarkan berbagai macam fitur termasuk jenis sensor yang dibutuhkan, konvergensi kecepatan, biaya, efektivitas, dan perangkat keras [8].

Metode MPPT dapat dikategorikan sebagai metode *offline*, metode dan metode hibrida. Metode *offline* adalah metode yang bergantung pada model sel surya. Metode *online* adalah metode yang tidak secara khusus bergantung pada pemodelan karakteristik sel surya, dan metode hibrida adalah kombinasi dari metode tersebut.

Metode *offline* umumnya memerlukan data karakteristik modul PV, seperti *Voltage Open Circuit* V_{OC} , arus hubung singkat I_{sc} , suhu dan iradiasi. Nilai-nilai tersebut digunakan untuk menghasilkan sinyal kontrol yang diperlukan untuk mengoperasikan modul PV ke titik daya maksimum (MPP). Contoh metode *offline* adalah *Open Circuit Voltage (OCV) method* [9], *Short Circuit Current method (SCC)* [10], *Artificial Intelligence* [11].

Pada metode *online*, nilai tegangan *output* atau arus modul PV digunakan untuk menghasilkan sinyal kontrol. Sinyal kontrol diterapkan ke sistem PV dengan merespon perubahan daya keluaran dari modul PV. Maka saat pelacakan sudah pada posisi daya output maksimum menyebabkan osilasi di sekitar nilai daya maksimum. Contoh metode *online* adalah *Perturbation and Observation (P&O) method* [12], *Extremum Seeking Control (ESC) method* [13], *Incremental Conductance (INC) method* [14].

Dalam metode *hybrid* yang mewakili kombinasi *offline* dan metode *online*, pelacakan MPP dilakukan dalam dua langkah-langkah: estimasi dan iterasi menuju daya maksimum. Langkah pertama, yang melibatkan estimasi MPP, bergantung pada metode *offline* untuk memperkirakan lokasi daya maksimum. Langkah kedua, bisa

dianggap seperti *fine-tuning* untuk mencapai nilai MPP yang sebenarnya. Contoh metode *hybrid* adalah *two stage maximum power point tracking* [15].

Pada makalah ini perbandingan metode MPPT dilakukan pada metode *Hill Climbing*, *Incremental Resistance* dan *Incremental Conductance* dengan menggunakan simulator rangkaian elektronika daya PSIM dan membandingkan dari hasil masing-masing metode ini, metode mana yang lebih efisien dan bisa menghasilkan daya yang maksimal serta pemilihan mana yang paling mudah dari ketiga metode ini.

2.1 MPPT *Incremental Conductance*

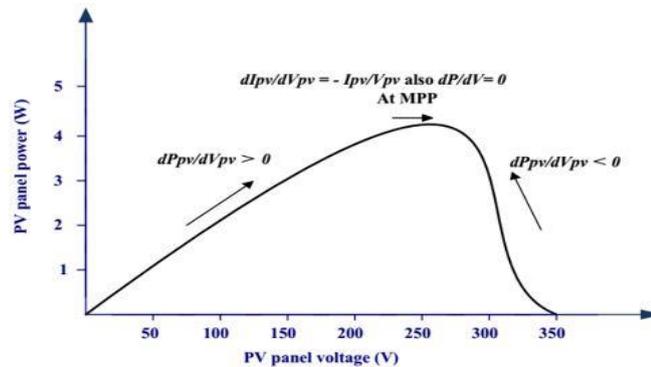
Metode *Incremental Conductance* bekerja berdasarkan gradien kurva P-V karakteristik *solar cell*. Titik kerja maksimum solar cell terletak pada nilai tegangan yang berbeda untuk setiap kondisi lingkungan yang berbeda, disebut VMPP. MPPT memberikan V_{ref} agar titik kerja solar cell terdapat di nilai VMPP tersebut. Karakteristik P terhadap V *solar cell* merupakan fungsi daya terhadap tegangan, mencapai titik maksimum ketika gradiennya bernilai nol. Hal tersebut dapat dituliskan

$$\frac{dP}{dV} = 0 \tag{1}$$

di mana dP adalah perubahan daya (watt) dan dV= perubahan tegangan (volt). Karena $P=V.I$, maka Persamaan (1) dapat dijabarkan menjadi Persamaan (2) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} &= \frac{d(V.I)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} \\ I + V \frac{dI}{dV} &= 0 \\ \frac{dI}{dV} &= -\frac{I}{V} \end{aligned} \tag{2}$$

Di mana dI adalah perubahan arus (ampere), dV adalah perubahan tegangan (volt), I adalah arus (ampere), dan V adalah tegangan (volt). Sehingga persamaan-persamaan di atas menghasilkan Kurva Kinerja seperti pada Gambar 1.



Gambar 1 Kurva Kinerja MPPT *Incremental Conductance*

Konsep dasar dari metode *Incremental Conductance* sesuai dengan kurva karakteristik solar cell. Nilai slope dari kurva daya panel surya akan bernilai nol saat mencapai titik MPP, nilai slope akan menurun apabila berada disamping kanan titik MPP, dan akan meningkat apabila berada disamping kiri titik MPP [5].

Perubahan V_{ref} yang diberikan *Incremental Conductance* tetap. Besar perubahan V_{ref} tersebut dipertimbangkan dari waktu penjajakan menuju nilai maksimum dan osilasi pada nilai maksimum. Kedua parameter tersebut memiliki hubungan terbalik, sehingga selalu terdapat kompensasi untuk setiap parameter yang ingin diperbaiki. Perubahan V_{ref} yang besar akan mempercepat waktu penjajakan, namun sulit mencapai VMPP dan menyebabkan osilasi di sekitar MPP. Oleh karena itu, modifikasi dari algoritma *Incremental Conductance* yang telah berkembang selama ini adalah dengan membuat besar perubahan V_{ref} bervariasi.

2.2 MPPT *Incremental Resistance*

Aturan utama untuk algoritma INR MPPT dapat disimpulkan dengan dualitas dari INC MPPT sebagai berikut: kurva daya modul PV menunjukkan bahwa turunan dari daya modul PV PPV positif sebelum mencapai MPP, nol pada MPP, dan negatif setelah melewati MPP, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 Turunan dari PPV diberikan pada persamaan (3), dan persamaan yang menghasilkan *error* ditunjukkan pada persamaan (4).

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d(V I)}{dI} = \frac{dV}{dI} I + V \quad (3)$$

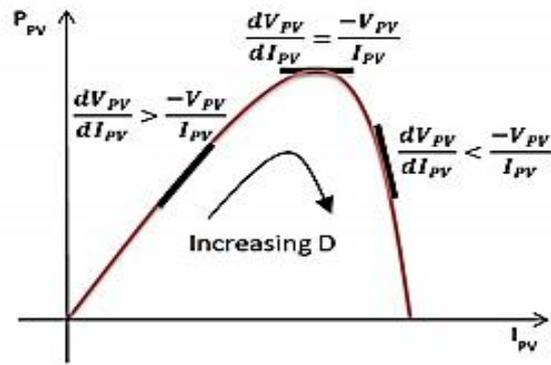
$$e = \frac{dV}{dI} + \frac{V}{I} \quad (4)$$

Oleh karena itu, memperbarui pelacakan titik daya maksimum pada saat MPP menggunakan persamaan (5)-(7)

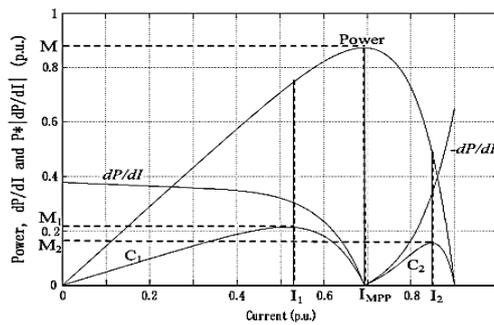
$$D(k) = D(k - 1) + N \quad \frac{dP_{PV}}{dI_{PV}} > \frac{-V_{PV}}{I_{PV}} \quad (5)$$

$$D(k) = D(k - 1) \quad \frac{dP_{PV}}{dI_{PV}} = \frac{-V_{PV}}{I_{PV}} \quad (6)$$

$$D(k) = D(k - 1) - N \quad \frac{dP_{PV}}{dI_{PV}} < \frac{-V_{PV}}{I_{PV}} \quad (7)$$



Gambar 2 Kurva Kinerja MPPT *Incremental Resistance*



Gambar 3 Daya yang Dinormalisasi, Kemiringan pada Daya Melawan Arus, Hasil dari Daya dan Kemiringannya ($C_1 = P * (dP/dI)$ dan $C_2 = P * (-dP/dI)$)

Pada Gambar 3 M_1 adalah titik puncak dari C_1 pada arus I_1 , M_2 adalah titik puncak dari C_2 pada arus I_2 , dan M adalah titik puncak pada arus I_{MPP} [6]. dP/dI adalah kemiringan dari daya melawan arus dan $|dP/dI|$ dapat diekspresikan sebagai

$$\left| \frac{dP}{dI} \right| = |\tan \theta|, -90^\circ < \theta < 90^\circ \quad (8)$$

Dimana :

$$\sin \theta = \tan \theta / \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \quad (9)$$

Sehingga :

$$0 < \sin \theta = |dP/dI| / \sqrt{1 + |dP/dI|^2} < 1 \quad (10)$$

Besar nilai *step size* (ΔI_{ref}) adalah pemilihan awal untuk nilai *step size* yang tetap pada operasi MPPT. Dengan $(\Delta I_{ref})_{max}$ dipilih sebagai batas atas untuk *variable step-size* MPPT INR, maka dapat dinyatakan :

$$S_k = (\Delta I_{ref})_{max} * \sin \theta_k, \quad k = 0, 1, \dots \quad (11)$$

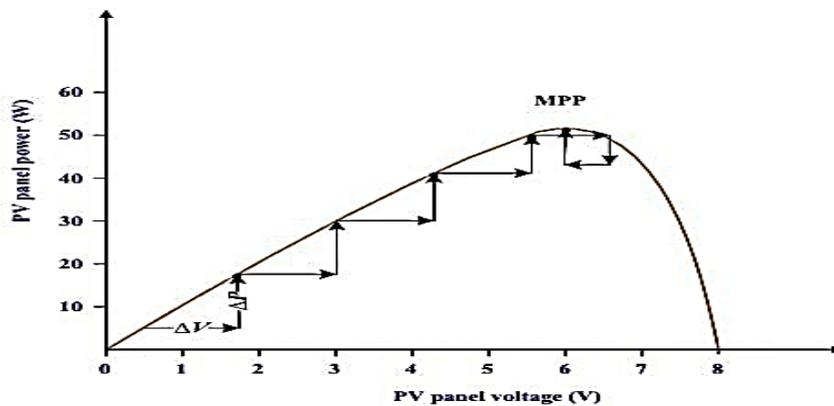
Berdasarkan persamaan (11), didapatkan :

$$S_k = (\Delta I_{ref})_{max} * \sin \theta_k < (\Delta I_{ref})_{max} \quad (12)$$

Dimana $S_k(k=0, 1, \dots)$ adalah variabel *step-size* pada waktu k . Persamaan (11) menunjukkan sebuah algoritma variabel *step-size* yang sederhana dan efektif. Perubahan nilai S_k akan menjadi sangat kecil seperti $\sin \theta_k$ menjadi sangat kecil disekitar MPP.

2.3 MPPT Hill Climbing

Metode ini membandingkan keluaran daya saat ini dari panel PV PPV (n) dengan output daya pada sampel PPV sebelumnya ($n-1$), yang diperoleh dengan tegangan sampel dan arus secara berkala. Menurut perubahan daya, *duty cycle* (D) dari konverter DC / DC diubah, proses berulang sampai MPP tercapai, sehingga titik daya maksimum tercapai jika perubahan daya sehubungan dengan siklus tugas dipaksa ke nol oleh Pengontrol MPPT.

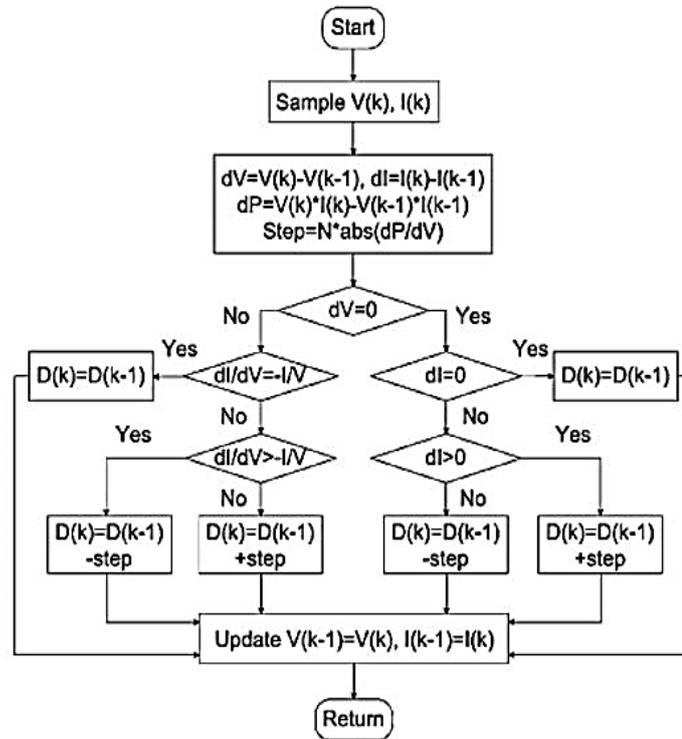


Gambar 4 Proses Perubahan Power Output dari PV Step by Step

3 Metode Penelitian

3.1 Flowchart Metode MPPT Incremental Conductance

Step size untuk MPPT dengan metode *Incremental Conductance* pada umumnya memiliki karakteristik tetap. Daya yang diambil dari PV array dengan *Step size* berkontribusi terhadap dinamika yang lebih cepat, tetapi akan terjadi osilasi. Situasi ini berbalik jika MPPT berjalan dengan *step size* lebih kecil, dengan demikian, MPPT dengan ukuran *step size* tetap harus membuat sesuai *tradeoff* antara dinamika dan osilasi. Seperti itu desain dapat diselesaikan dengan iterasi *variable step size*. Namun, semua strategi ini diusulkan untuk metode P & O / *Hill Climbing* MPPT dan derivasi dari parameter *variable step size* tidak disediakan. Banyak penelitian yang menggunakan suatu algoritma variabel *Step size* dimodifikasi untuk metode *Incremental Conductance* MPPT dan didedikasikan untuk menemukan cara yang sederhana dan efektif untuk meningkatkan akurasi pelacakan seperti halnya pelacakan dinamis. Pada sebagian besar aplikasi, pelacak MPP dicapai dengan menghubungkan sebuah konverter dc-dc antara array PV dan beban. Daya output PV digunakan untuk mengendalikan secara langsung siklus daya konverter daya untuk mengurangi dengan baik kompleksitas sistem. Diagram alur dari *Step size* variabel yang diubah menjadi *Incremental Conductance* Algoritma MPPT ditunjukkan pada Gambar 5, di mana tugas *duty cycle* konverter diatur secara otomatis.



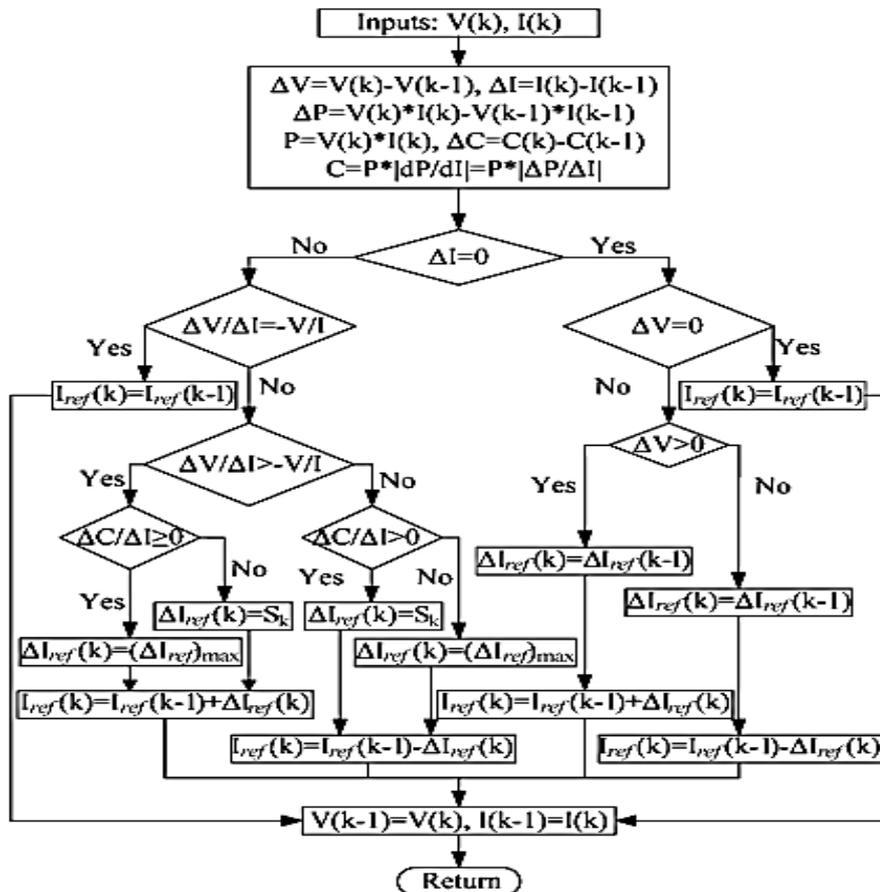
Gambar 5 Flowchart Variable Step Size Algoritma Incremental Conductance

3.2 Flowchart Metode MPPT Incremental Resistance

Sebuah algoritma variable *step size* untuk MPPT INR dan dikhususkan untuk lebih efektif memperbaiki antara perubahan *tracking* dan akurasi *tracking*. Perbedaan utama yang berbeda di antara algoritma ini dengan yang lainnya adalah *step size* untuk MPPT INR yang dapat diubah dengan nilai-nilai ekstrim pada sebuah fungsi ambang yang menghasilkan produk (C) pada eksponensial daya keluaran panel surya (P^n) dan penurunan absolut dari daya panel surya ($|dP/dI|$) seperti:

$$C = P^n * \left| \frac{dP}{dI} \right| \quad (13)$$

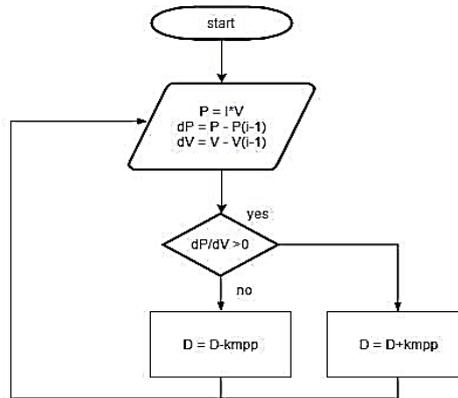
Dimana n adalah sebuah index, hasil pada eksponetial derajat pertama (n=1) pada daya di PV array dan penurunan ($|dP/dI|$) yang diaplikasikan pada mengatur *step size* untuk MPPT INR.



Gambar 6 Flowchart Variabel Step Size Algoritma Incremental Resistance

3.3 Flowchart Metode MPPT Hill Climbing

Metode ini membutuhkan dua parameter untuk menentukan nilai *slope*, yaitu tegangan *input converter* (V_{in}) dan arus *input converter* (I_{in}). Lalu membandingkan daya yang didapatkan oleh panel PV ($\Delta P_{PV-n} / \Delta V_{PV-n}$) pada pencuplikan *real time* dengan daya output PV dari data sebelumnya ($\Delta P_{PV-(n-1)} / \Delta V_{PV-(n-1)}$). *Duty Cycle* dari PWM yang di set ke MOSFET pada rangkaian DC-DC konverter akan berubah, seiring berubahnya perbedaan nilai P_{PV}/V_{PV} ini. MPPT dikatakan telah tercapai ketika perubahan P_{PV} / V_{PV} antar sampling sudah 0 atau mendekati 0 (bisa ditentukan pada *software*).

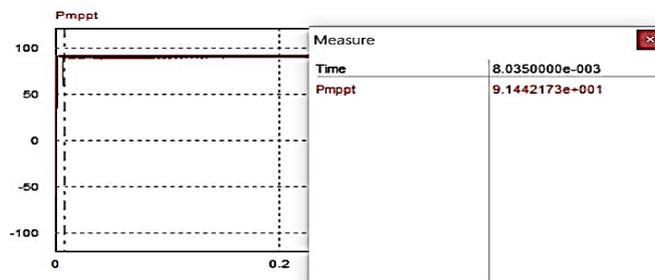


Gambar 7 Flowchart Algoritma MPPT Hill Climbing

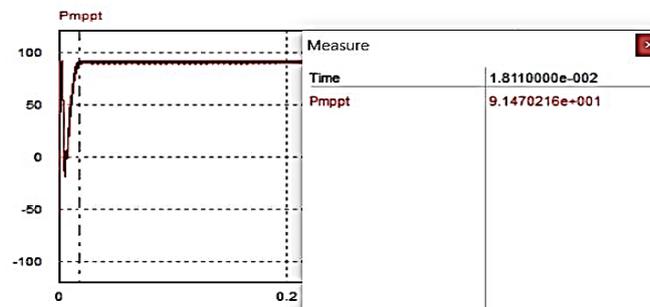
4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Pengujian Metode MPPT *Incremental Conductance* pada PSIM

Dalam pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan variable *step size* dan tanpa memberikan variable *step size* sehingga di dapatkan Gambar 8 dan tanpa variable *step size* pada Gambar 9 dan ditabulasikan pada Table 1.



Gambar 8 Gelombang MPPT *Incremental Conductance*



Gambar 9 Gelombang MPPT *Incremental Conductance* Variabel *Step Size*

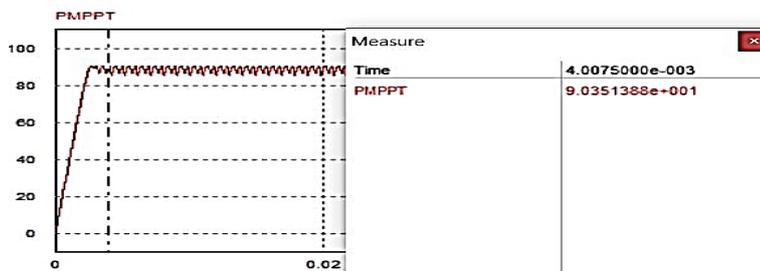
Tabel 1 Respon Kecepatan Pengujian Metode *Incremental Conductance*

| <i>Incremental Conductance</i> | Waktu(s) | Daya Maksimal(Watt) |
|----------------------------------|----------|---------------------|
| Tanpa Variable <i>Step size</i> | 0,008 | 91,44 |
| Dengan Variable <i>Step size</i> | 0,018 | 91,47 |

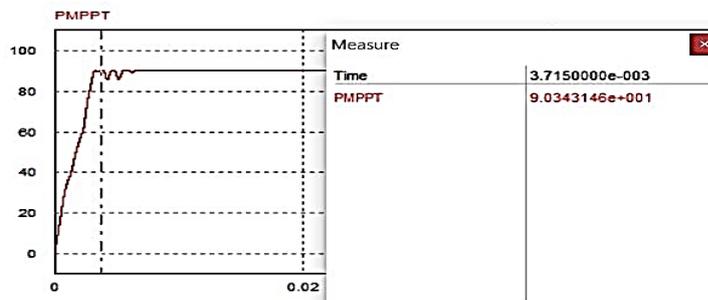
Metode *Incremental Conductance* dengan variable *step size* memiliki selisih waktu untuk mencapai daya maksimal lebih lambat (0,01 s) dan memiliki selisih daya maksimal lebih tinggi (0,03 Watt) dibandingkan dengan metode *Incremental Conductance* tanpa variable *step size*. Hal ini menunjukkan bahwa metode *Incremental Conductance* dengan *step size* sedikit lebih lambat akan tetapi daya yang dihasilkan bisa lebih maksimal.

4.2 Pengujian Metode MPPT *Incremental Resistance* pada PSIM

Dalam pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan variable *step size* dengan dan tanpa memberikan variable *step size* sehingga di dapatkan Gambar 10 dan tanpa variable *step size* pada Gambar 11 dan ditabulasikan pada Tabel 2.



Gambar 10 Gelombang MPPT *Incremental Resistance*



Gambar 11 Gelombang MPPT *Incremental Resistance* dengan Variabel *Step Size*

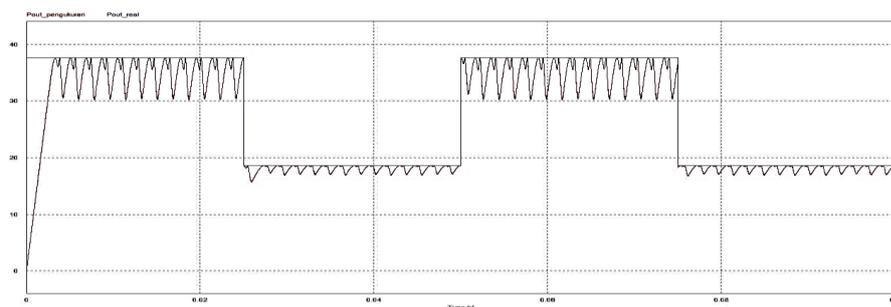
Tabel 2 Respon Kecepatan Pengujian Metode *Incremental Resistance*

| <i>Incremental Resistance</i> | Waktu(s) | Daya Maksimal(Watt) |
|----------------------------------|----------|---------------------|
| Tanpa Variable <i>Step size</i> | 0,004 | 90,35t |
| Dengan Variable <i>Step size</i> | 0,003 | 90,34 |

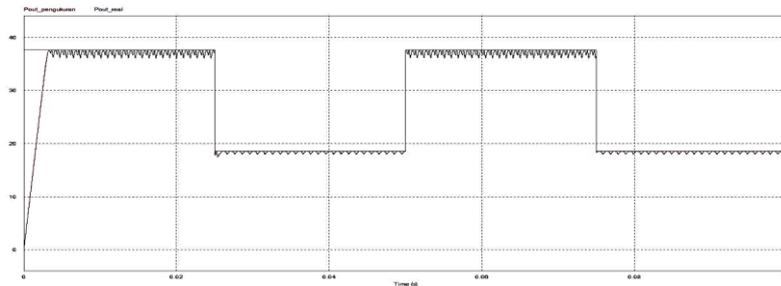
Metode *Incremental Resistance* tanpa variable *step size* memiliki selisih waktu untuk mencapai daya maksimal lebih cepat (0,001 s) dan memiliki selisih daya maksimal lebih tinggi (0,01 Watt) dibandingkan dengan metode *Incremental Resistance* dengan variable *step size*. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa variable *step size* daya maksimum yang dicapai lebih tinggi dari pada dengan *step size* walaupun memiliki waktu yang lebih lama. Akan tetapi jika tanpa variabel *step size* daya maksimal yang didapatkan akan terus beresilasi.

4.3 Pengujian Metode MPPT *Hill Climbing* pada PSIM

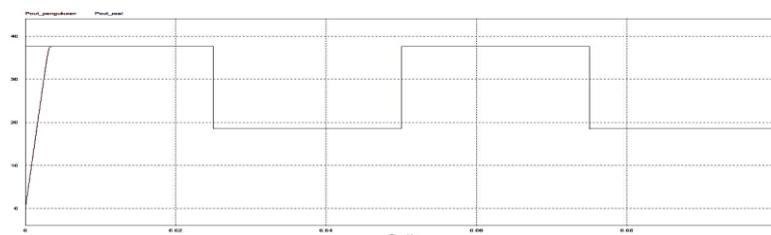
Pada simulasi metode MPPT *Hill Climbing* akan dilakukan pengujian dengan 3 nilai KMPP, yaitu $KMPP = 0,5$, $KMPP = 1$ dan $KMPP = 0,5$. KMPP merupakan variable yang digunakan untuk menambah & mengurangi *duty cycle* atas terjadinya perubahan pada DP. Sehingga didapatkan Gambar 12 untuk $KMPP = 0,5$, Gambar 13 untuk $KMPP = 1$, dan Gambar 14 untuk $KMPP = 5$.



Gambar 12 Gelombang MPPT *Hill Climbing* dengan Nilai $KMPP = 0,5$



Gambar 13 Gelombang MPPT *Hill Climbing* dengan Nilai KMPP = 1



Gambar 14 Gelombang MPPT *Hill Climbing* dengan Nilai KMPP = 5

Simulasi dijalankan pada periode 0.1 detik (100 ms), dengan *irradiance* pada PV diganti setiap 25ms dengan perbedaan 200 *irradiance* (*max irradiance* 1000, *min irradiance* 800). Konstanta perubahan *duty cycle* KMPP dicoba pada 3 nilai yang diambil secara acak dari nilai terendah ke nilai yang tinggi, nilai yang diambil adalah 0.5, 1, dan 5. Hasil yang didapat dari simulasi menunjukkan saat KMPP diset diangka 0.5, osilasi terjadi di sekitar MPP dan sistem tidak mampu mencapai *Maximum Power Point*. Saat KMPP diset diangka 1, osilasi yang terjadi lebih kecil. Hasil terbaik didapat di KMPP = 5, dimana sistem dapat dengan cepat beradaptasi dengan perubahan dan mencapai *Maximum Power Point*.

5 Kesimpulan

Dari simulasi yang dijalankan pada PSIM, setiap metode MPPT memiliki kelebihan bisa memaksimalkan daya *solar cell* dari energi cahaya matahari. Tiap metode memiliki ciri khas tersendiri, seperti Metode *Incremental Conductance*, jika metode tersebut digunakan maka di dapatkan daya maksimal sebesar 91,44 Watt, dan jika ditambahkan dengan *variable step size* maka daya maksimal yang di dapatkan

lebih besar yaitu 91,47 Watt. Untuk metode *Incremental Resistance* daya maksimal yang didapatkan hanya sebesar 90,35 Watt, jika ditambahkan dengan *variable step size* daya maksimal yang didapatkan akan turun sehingga menjadi 90,34 Watt, akan tetapi jika ditambahkan *variable step size* osilasi akan hilang dari metode ini. Sedangkan pada Metode *Hill Climbing* untuk mencari daya maksimal diharuskan mencari nilai KMPP atau *variable* yang digunakan untuk menambah & mengurangi *duty cycle* atas terjadinya perubahan pada DP sehingga daya yang didapatkan bisa maksimal dan tidak mengalami osilasi pada metode ini. Jadi dari metode *Incremental Conductance*, *Incremental Resistance* dan *Hill Climbing* ini jika untuk mencari daya maksimal sebaiknya menggunakan metode *Incremental Resistance*, hanya saja harus menambahkan *variable step size* supaya daya yang dihasilkan bisa sangat maksimal seperti pada yang sudah dilakukan simulasinya di PSIM.

Daftar Pustaka

- [1] E. Indonesia, "Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Energi Baru Terbarukan Indonesia Energy," vol. 3804242, 2017.
- [2] R. S. Lewis, "Antarctic Research and the Relevance of Science," *Bull. At. Sci.*, vol. 26, no. 10, pp. 2–4, 1970.
- [3] Y. H. Chang and C. Y. Chang, "A maximum power point tracking of PV system by scaling fuzzy control," *Proc. Int. MultiConference Eng. Comput. Sci. 2010, IMECS 2010*, vol. II, no. c, pp. 1212–1216, 2010.
- [4] S. Mekhilef, "Performance of grid connected inverter with maximum power point tracker and power factor control," *Int. J. Power Electron.*, vol. 1, no. 1, pp. 49–62, 2008.
- [5] S. Mekhilef, "Design and implementation of a multi level three- phase inverter with less switches and low output voltage distortion," 2009.
- [6] A. B. G. Bahgat, N. H. Helwa, G. E. Ahmad, and E. T. El Shenawy, "Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks," *Renew. Energy*, vol. 30, no. 8, pp. 1257–1268, 2005.

- [7] V. Salas, E. Olías, A. Barrado, and A. Lázaro, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 11, pp. 1555–1578, 2006.
- [8] T. Eswam and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [9] J. J. Schoeman and J. D. van Wyk, “Simplified Maximal Power Controller for Terrestrial Photovoltaic Panel Arrays,” *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 361–367, 1982.
- [10] T. Noguchi, S. Togashi, and R. Nakamoto, “Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 217–223, 2002.
- [11] T. Hiyama, S. Kouzuma, and T. Imakubo, “Identification of Optimal Operating Point of PV Modules using Neural Network for Real Time Maximum Power Tracking Control,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 10, no. 2, pp. 360–367, 1995.
- [12] A. K. Abdelsalam, A. M. Massoud, S. Ahmed, and P. N. Enjeti, “High-performance adaptive Perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1010–1021, 2011.
- [13] M. Krstić, “Performance improvement and limitations in extremum seeking control,” *Syst. Control Lett.*, vol. 39, no. 5, pp. 313–326, 2000.
- [14] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, and Y. Kang, “A variable *step size* INC MPPT method for PV systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2622–2628, 2008.
- [15] K. Kobayashi, I. Takano, and Y. Sawada, “A Study of a Two Stage Maximum Power Point Tracking Control of a Photovoltaic System under Partially Shaded Insolation Conditions,” *IEEJ Trans. Ind. Appl.*, vol. 124, no. 8, pp. 774–783, 2004.