

Desain Optimum Proportional-Integral-Derivative Pada Maximum Power Point Tracking Sistem Photovoltaic

Denny Irawan¹⁾, Soedibyo²⁾

Jurusan Teknik Elektro – FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Kampus ITS, Keputih – Sukolilo, Surabaya 60111
den2mas@gmail.com, dibyo_55@yahoo.com

Abstrak – Energi terbarukan menjadi solusi dengan menipisnya sumber energi tak terbarukan. Energi matahari, disamping energi angin adalah sumber energi yang paling banyak dikembangkan, berbagai metode yang efisien dikembangkan untuk diterapkan seperti pada sistem photovoltaic. Pada penelitian ini akan mendesain Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada sistem photovoltaic berbasis algoritma optimasi untuk tuning parameter Proportional Integral Derivative (PID) controller. Hasil simulasi menggunakan MATLAB SIMULINK dengan berbagai algoritma komputasi cerdas.

Kata Kunci: Photovoltaic, MPPT, PID, komputasi cerdas

I. PENDAHULUAN

Cahaya matahari adalah sumber energi yang melimpah, bersih, dapat diperbarukan dan bebas untuk dieksploitasi. Kendala pada sistem photovoltaic sebagai konversi daya adalah efisiensi yang rendah dan harga yang relatif mahal. Tegangan output yang dihasilkan PV sangat tergantung pada cahaya, *ambient temperature*, *shading* atau penghalang. Faktor yang mempengaruhi efisiensi proses koleksi dari photovoltaic adalah efisiensi sel surya, intensitas sumber radiasi, dan teknik penyimpanan [2,3] sehingga membutuhkan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) kontroler untuk mendapatkan daya maksimum [1,2,3,4]. Pada sistem photovoltaic yang kompleks, kondisi *partial shading* terjadi apabila modul photovoltaic menerima radiasi surya yang tidak sempurna atau menutupi sebagian modul photovoltaic seperti bayangan dari photovoltaic lain, bangunan atau pepohonan, atau awan yang bergerak menutupi sebagian modul photovoltaic [4,5]. Kondisi *partial shading* menyebabkan output daya dari photovoltaic array menurun sehingga menimbulkan efek langsung yaitu kurva karakteristik photovoltaic yang dihasilkan menjadi beberapa puncak [4,5].

Beberapa metode MPPT yang sudah digunakan antara lain : *Perturb and Observe (PO)*, *incremental conductance (INC)*, *fuzzy logic*, *neural network (NN)*,

adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) dan *current/voltage feedback*.

Kontroler PID merupakan kontroler *feedforward* yang berfungsi mengolah sinyal *error* menjadi sinyal kontrol dalam bentuk hubungan *proportional-integral-derivative*. Optimasi parameter PID secara signifikan meningkatkan performansi konverter dc-dc dengan meminimalisasi *overshoot*, *settling/rising time* dan *steady state error*.

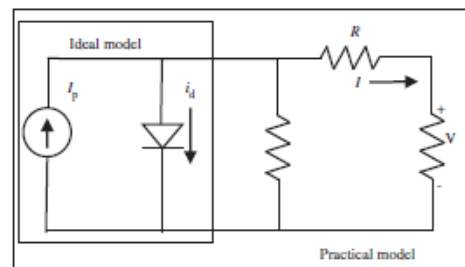
Dalam paper ini akan disajikan respon dari kontroler PID pada konverter dc-dc, dimana parameter PID akan ditala/*tuning* dengan berbagai algoritma komputasi cerdas/*computational intelligence* yaitu : *imperialist competition algorithm*, *cuckoo search algorithm*, *differential evolution*, *ant colony optimization*, *firefly algorithm*, *particle swarm optimization*, *bat algorithm*, *flower pollination*.

Paper ini terdiri dari beberapa bab : Bab 1. Pendahuluan, Bab 2. Sistem Photovoltaic, Bab 3. Metode MPPT, Bab 4. MPPT Berbasis Optimal PID Bab 5. Penalaan/*Tuning Parameter PID* 6. Hasil Simulasi dan Diskusi Bab 7. Referensi.

II. SISTEM PHOTOVOLTAIC

2.1 Konfigurasi Rangkaian PV

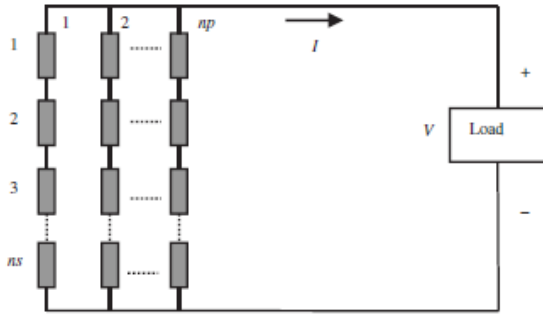
Sel surya/PV dapat dimodelkan dengan rangkaian pengganti berupa sumber arus dan dioda yang dihubungkan paralel sebagai berikut :



Gambar.1 Model ekivalen sel PV

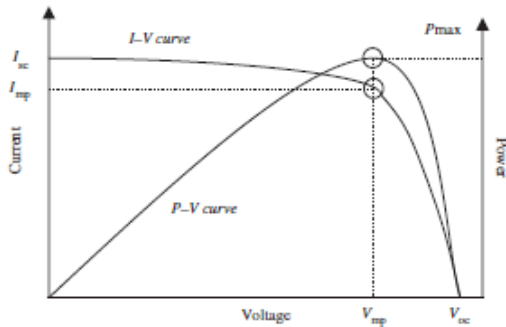
Resistansi seri untuk lintasan elektron dari sambungan n ke p atau aliran arus, dan resistansi paralel untuk menggambarkan arus bocor.

Modul PV terdiri dari beberapa sel PV yang dihubungkan paralel untuk menaikkan rating arus, dan dihubungkan seri untuk menaikkan *rating* tegangan seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar.2 Sel PV yang dihubungkan Seri dan Paralel

Karakteristik arus-tegangan (I-V) dan daya-tegangan (P-V) yang non linear dari sel surya pada *ambient temperature* dan radiasi yang tetap ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar.3 Karakteristik arus-tegangan (I-V) dan daya-tegangan (P-V) dari sel surya

Rentang kurva I-V ditentukan mulai dari arus hubung singkat I_{sc} sampai tegangan terbuka V_{oc} , dan daya maksimal dihasilkan pada saat V_{mp} dan I_{mp} (Marcelo, Gazoli, & Filho, 2009). Persamaan matematis arus output dari PV pada gambar 2 dapat ditulis :

$$I = n_p I_{pv} - n_p I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT_a n_s} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

Dimana :

- I = arus output
- V = tegangan output PV
- I_{pv} = arus PV
- I_0 = arus saturasi balik
- n_p = jumlah sel terhubung paralel

- n_s = jumlah sel terhubung seri
- q = Elektron charge (1.602×10^{-19} C)
- k = Konstanta Boltzman (1.381×10^{-23} JK⁻¹)
- α = Faktor ideal sambungan p-n

Secara praktek, persamaan diatas harus ditambahkan parameter sebagai berikut (Marcelo et al., 2009) :

$$I = n_p I_{pv} - n_p I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t \alpha} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}, \quad (2)$$

Dimana $V = N_s k T / q$ adalah tegangan thermal, N_s adalah sel yang terhubung seri, R_s dan R_p adalah tahanan ekivalen seri dan paralel.

Arus PV yang tergantung radiasi cahaya dan temperatur dapat ditulis dalam persamaan berikut :

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I (T - T_n)) \frac{S}{S_n}, \quad (3)$$

Dimana :

- I_{pv} = arus output pada kondisi nominal (25^0 C dan 1000 W/m²)
- T = temperatur aktual
- T_n = temperatur nominal
- S = radiasi aktual
- S_n = radiasi nominal
- K_I = Koefisien temperature / arus hubung singkat

Arus saturasi dioda yang tergantung dari radiasi cahaya dan temperatur sesuai persamaan berikut :

$$I_0 = I_{0,n} \left[\frac{T_n}{T} \right]^3 \exp \left(\frac{q E_g}{k a} \left[\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right] \right), \quad (4)$$

Dimana E_g adalah energy lebar pita (*band-gap*) bahan semi konduktor dan $I_{0,n}$ adalah arus saturasi nominal :

$$I_{0,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp(V_{oc,n} / a V_t,n) - 1} \quad (5)$$

Dengan $V_{t,n}$ adalah tegangan thermal pada nominal temperatur T_n .

Arus hubung singkat dapat ditentukan berdasarkan persamaan (Zhou, Yang, & Fang, 2007) :

$$I_{sc} = I_{sc,n} \left(\frac{S}{S_n} \right)^\alpha, \quad (6)$$

Dimana $I_{sc,n}$ adalah arus hubung singkat pada saat radiasi nominal S_n dan I_{sc} dari PV tergantung dari besar S dan α .

Parameter α dapat ditentukan sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{\ln(I_{sc,n} / I_{sc,1})}{\ln(S_n / S_1)}, \quad (7)$$

Dimana $I_{sc,n}$ dan $I_{sc,1}$ adalah arus hubung singkat untuk kondisi masing-masing radiasi S_n dan S_1 .

Untuk tegangan rangkaian terbuka dapat ditulis dalam persamaan dibawah :

$$V_{oc} = \frac{V_{oc,n}}{1 + \beta \ln(S_n/S)} \left(\frac{T_n}{T} \right)^\gamma, \quad (8)$$

Dimana V_{oc} dan $V_{oc,n}$ adalah tegangan hubungan terbuka dari PV pada kondisi masing-masing radiasi S_n dan S_1 . β adalah koefisien spesifik teknologi PV (Dyk, 2002) dan γ adalah derajat ketidak linearan.

Besar α , β dan γ dapat dilihat dari *datasheet* modul PV. *Fill factor* adalah juga parameter yang mempengaruhi karakteristik I-V yang menyebabkan penyimpangan jika dibandingkan dengan kondisi ideal.

$$FF = FF_0 \left(1 - \frac{R_s}{V_{oc}/I_{sc}} \right), \quad (9)$$

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \quad (10)$$

Dimana FF_0 adalah *fill factor* untuk ideal PV tanpa efek resistansi, sehingga tegangan thermal rangkaian terbuka adalah :

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{nkT/q}. \quad (11)$$

Daya output maksimum P_{max} dapat ditulis dalam persamaan berikut (Zhou et al., 2007) :

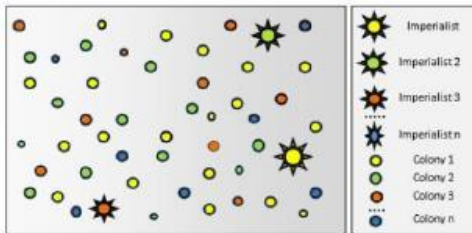
$$P_{max} = FF \times V_{oc} \times I_{sc},$$

$$P_{max} = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \left(1 - \frac{R_s}{V_{oc}/I_{sc}} \right) \times \frac{V_{oc,n}}{1 + \beta \ln(S_n/S)} \left(\frac{T_n}{T} \right)^\gamma I_{sc,n} \left(\frac{S}{S_n} \right)^\alpha. \quad (12)$$

III. METODA MPPT

3.1. Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

ICA merupakan metode model matematis yang ditemukan oleh Esmail Atashpaz Gargari pada tahun 2007 menggunakan inisial negara penjajah (*imperialist*) dan negara jajahan (*colony*).



Gambar.4 Imperialist dan colony

Jika disusun dalam bentuk array untuk N negara :

$$\text{country} = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_N] \quad (13)$$

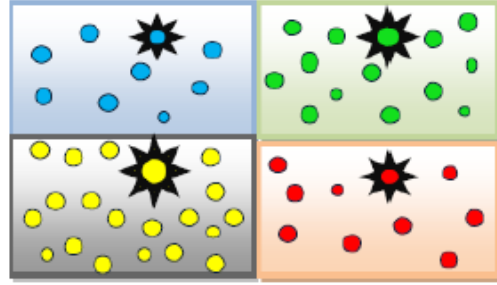
Fungsi *fitness* untuk tiap negara :

$$c_i = (\text{country}) = f(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN}) \quad (14)$$

Kekuatan dari *imperialist* :

$$P_i = \left\lfloor \frac{c_i}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} c_i} \right\rfloor, \quad \sum_{i=1}^{N_{imp}} P_i = 1 \quad (15)$$

Sehingga akan terbentuk beberapa *imperialist* dan *colony* yang mendekati imperialist tersebut.



Gambar.5 Pergerakan Colony

3.2. Cuckoo Search Algorithm (CSA)

Cuckoo atau adalah sejenis burung yang biasa disebut dengan burung tekukur, algoritma CS dibuat berdasarkan perilaku dari burung ini. Terdapat tiga aturan utama dalam algoritma CS (X.S. Yang and S. Deb, 2009, 2010), yaitu (1) Setiap burung tekukur akan meletakkan satu telur pada setiap waktu, dan telur itu diletakkan pada sebuah sarang yang dipilih secara acak. (2) Sarang yang terbaik dengan telur yang berkualitas tinggi akan melahirkan generasi berikutnya. (3) Jumlah rumah sarang adalah terbatas, telur yang diletakkan oleh tekukur akan ditemukan oleh burung pemilik sarang dengan probabilitas sebesar $p_a \in [0,1]$.

Algoritma CSA dapat ditulis sebagai berikut :

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \alpha \oplus Levy(\lambda) \quad (16)$$

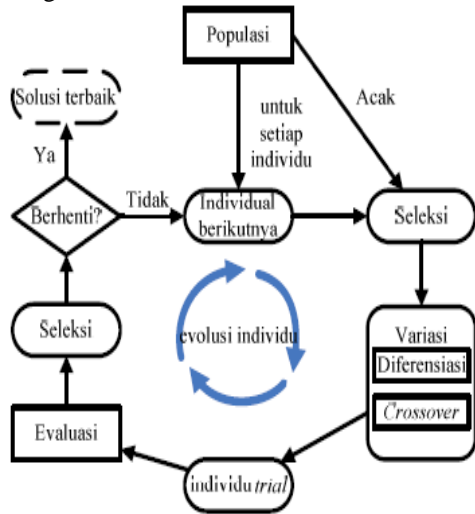
dimana $\alpha > 0$ adalah step-size yang berhubungan dengan masalah yang terkait. Pda kebanyakan kasus, dapat digunakan nilai $\alpha = 1$. Persamaan-3 di atas adalah merupakan persamaan stokastik dalam kasus '*random walk*'. Secara umum sebuah '*random-walk*' adalah sebuah '*Markov chain*' yang memiliki status atau lokasi selanjutnya tergantung pada status/lokasi yang sekarang ($(t) i x$), dan probabilitas transisi ($\alpha \oplus Levy(\lambda)$). Symbol \oplus berarti sebuah operasi perkalian '*entrywise*'.

3.3. Differential Evolution

Differential Evolution (DE) adalah sebuah metode yang dikembangkan oleh Kenneth Price dan dipublikasikan pada Oktober 1994 dalam majalah *Dr. Dobb's Journal* (Price et al., 2005). Metode ini merupakan metode optimasi matematis fungsi multi dimensional dan termasuk dalam kelompok *evolutionary algorithm*. DE menjadi salah satu algoritma genetika terbaik dan dapat menemukan

global optimum yang multidimensi (yaitu menunjukkan lebih dari satu nilai optimum) dengan probabilitas yang baik.

Algoritma DE dapat dijelaskan dengan diagram alir sebagai berikut :



Gambar.6 Siklus Evolusi Individu *Differential Evolution* (Sumber: Feoktistov. 2006)

3.4. Ant Colony Optimization (ACO)

Ant Colony Optimization (ACO) diadopsi dari perilaku koloni semut yang dikenal sebagai system semut (Dorigo, M., dan Gambardella, L., 1996). Semut k yang berada di titik r , akan memilih titik berikutnya s , menurut persamaan berikut :

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in J_r^k} \{ \tau_{ru} [\eta_{ru}]^\beta \} & \text{jika } q \leq q_0 \text{ (eksploitasi)} \\ J, & \text{jika tidak (eksplorasi)} \end{cases} \quad (17)$$

Dimana q adalah bilangan random dalam $[0,1]$, $0 < q < 1$) $0 \leq q \leq 1$ adalah sebuah parameter pembanding bilangan acak, dan $J = \{s \in N \mid (r,s) \in E\}$ probabilitas dari semut k pada titik r yang memilih untuk menuju ke titik s .

Dengan kata lain, Jika $q \leq q_0$ maka semut tersebut akan memanfaatkan pengetahuan heuristik tentang jarak antara titik tersebut dengan titik-titik lainnya dan juga pengetahuan yang telah didapat dan disimpan dalam bentuk *Pheromone*. Hal ini mengakibatkan *edge* terbaik dipilih. Jika sebaliknya maka sebuah *edge* dipilih berdasarkan persamaan diatas.

3.4.1 Global Pheromone Update

Setelah semua semut menyelesaikan sebuah *tour*, tingkat *Pheromone* di-update dengan mengaplikasikan

global updating rule (Dorigo, M., dan Gambardella, L., 1996) menurut persamaan berikut :

$$\tau_{rs} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{rs} + \rho \cdot \Delta \tau_{rs}^{bs} \quad (18)$$

$$\text{dengan } \Delta \tau_{rs}^{bs} = \begin{cases} \frac{1}{C^{bs}} & \text{jika } (r,s) \in \text{lintasan terbaik keseluruhan} \\ 0 & \text{jika tidak} \end{cases} \quad (19)$$

Dimana ρ adalah parameter evaporasi global, yang mempunyai nilai $0 < \rho < 1$. C^{bs} adalah $1/\text{panjang lintasan terbaik keseluruhan}$, bernilai 1 jika (i,j) merupakan bagian panjang lintasan terbaik keseluruhan (C^{bs}), dan 0 jika tidak.

3.4.2 Local Pheromone Update

Ketika membangun solusi (*tour*) dari TSP, semut mengaplikasikan *local updating rule* (Dorigo, M., dan Gambardella, L., 1996) menurut persamaan berikut :

$$\tau_{rs} \leftarrow (1 - \xi) \cdot \tau_{rs} + \xi \cdot \tau_0 \quad (20)$$

ξ adalah parameter *evaporasi* lokal $0 < \xi < 1$. τ_0 adalah nilai awal jejak *Pheromone*, $\tau_0 = 1/n \cdot C_{nn}$ dimana n adalah jumlah titik dan C_{nn} adalah panjang sebuah *tour* terbaik yang diperoleh dari metode *nearest neighbourhood heuristic* [Rosenkrantz, D.J, Stearns, R.E, dan Lewis, P.M. (1977)]. Persamaan *update Pheromone online* ini diaplikasikan saat semut membangun *tour* TSP, yaitu ketika melewati *edge* dan mengubah tingkat *Pheromone* pada *edge* (r,s). Tujuannya untuk membantu melewati sebuah *edge*, *edge* ini menjadi kurang diinginkan (karena berkurangnya jejak *Pheromone* pada *edge* yang bersesuaian).

3.5. Firefly Algorithm

Ada dua hal yang berkaitan dan sangat penting dalam *firefly algorithm* yaitu intensitas cahaya dan fungsi keatraktifan.

tingkat intensitas cahaya pada sebuah kunang-kunang x dapat dilihat sebagai,

$$I(x) = f(x) \quad (21)$$

Dengan nilai I merupakan tingkat intensitas cahaya pada x kunang-kunang yang sebanding terhadap solusi fungsi tujuan permasalahan yang akan dicari $f(x)$. Keatraktifan β yang bernilai relatif, karena intensitas cahaya yang harus dilihat dan dinilai oleh kunang-kunang lain. Dengan demikian, hasil penilaian akan berbeda tergantung dari jarak antara kunang-kunang yang satu dengan yang lainnya r_{ij} . Selain itu, intensitas cahaya akan menurun dilihat dari sumbernya

dikarenakan terserap oleh media contohnya udara γ (Yang X.S, 2010).

Fungsi keatraktifan ialah sebagai berikut (Yang X.S, 2010) :

$$b(r) = b_0 * e^{-\gamma r^m}, \quad (m \geq 1) \quad (22)$$

3.5.1 Jarak Antara Kunang-Kunang

Jarak antara kunang-kunang i dan j pada lokasi x_i dan x_j dapat ditentukan ketika dilakukannya peletakan titik dimana firefly tersebut disebar secara random dalam diagram kartesius dengan rumus (Yang X.S, 2010).

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (23)$$

Dimana selisih dari koordinat lokasi kunang-kunang i terhadap kunang-kunang j merupakan jarak diantara keduanya (r_{ij}).

3.5.2 Pergerakan Kunang-Kunang

Pergerakan kunang-kunang i yang bergerak menuju tingkat intensitas cahaya yang terbaik dapat dilihat dari persamaan berikut (Yang X.S, 2010) :

$$x_i = x_i + \beta_0 * \exp(-\gamma r_{ij}^2) * (x_j - x_i) + \alpha * (\text{rand} - \frac{1}{2}) \quad (24)$$

Dimana variable awal x_i menunjukkan posisi awal kunang-kunang yang berada pada lokasi x , kemudian persamaan kedua yang terdiri dari variable $\beta_0 = 1.0$ variabel ini merupakan nilai keatraktifan awal pada firefly, variabel (\exp) bilangan eksponensial, variabel $\gamma = 1.0$ merupakan nilai untuk tingkat penyerapan pada lingkungan sekitar kunang-kunang yaitu udara dan terakhir r_{ij} merupakan variabel selisih jarak awal antara kunang-kunang i dan j . Semua variabel pada persamaan kedua tersebut diberikan dari fungsi keatraktifan kunang-kunang yang mana menentukan tingkat kecerahan. Selanjutnya persamaan ketiga terdiri dari selisih nilai solusi pada kunang-kunang i terhadap kunang-kunang j . Kemudian fungsi persamaan pergerakan kunang-kunang secara acak (rand) yang menunjukkan adanya bilangan acak yang kisarannya antara $[0,1]$. variabel α yang memiliki kisaran antara $[0,1]$ biasa ditentukan dengan nilai $0,2$. Semua variabel yang terbentuk pada persamaan pergerakan kunang-kunang menjamin cara kerja algoritma cepat menuju solusi yang optimal (Broersma H, 2010).

3.6. Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO adalah teknik penentuan populasi berdasarkan optimasi stokastik yang dikembangkan oleh Dr. Eberhart dan Dr. Kennedy pada tahun 1995. Teknik

penentuan ini terinspirasi oleh perilaku sosial sekawanan burung atau sekawan hewan yang sedang mencari makanan.

Masing-masing individu bertanggung jawab untuk mendapatkan calon solusi untuk menyelesaikan permasalahan yang ada. Individual-individual dalam suatu kawanan didekati untuk mendapatkan titik optimum dengan mempertimbangkan kecepatan, percobaan sebelumnya, dan percobaan yang dilakukan oleh tetangganya. Dalam sebuah ruang pencarian fisik dengan n -dimensi, posisi dan kecepatan individu i digambarkan sebagai vektor kecepatan. Dengan menggunakan informasi tersebut, individu i dan $update$ kecepatannya akan dapat dimodifikasi dengan menggunakan persamaan berikut :

$$v_i^{k+1} = v_i^k + \alpha_i(x_i^{lbest} - x_i^k) + \beta_i(x_i^{gbest} - x_i^k) \quad (23)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (18) \quad (24)$$

Dimana :

x_i^k adalah individual i pada iterasi k

x_i^{k+1} adalah individu i pada iterasi sesudahnya ($k+1$)

v_i^k adalah $update$ kecepatan individual i pada iterasi k

v_i^{k+1} adalah $update$ kecepatan individual i pada iterasi sesudahnya

α_i, β_i adalah nilai random yang tak berbentuk antara $[0,1]$

x_i^{lbest} adalah individu terbaik dari individual i

x_i^{gbest} adalah global terbaik dari kawanan

3.7. Bat Algorithm

Bat algorithm merupakan tipe algoritma heuristik baru yang diperkenalkan oleh Xin She Yang pada tahun 2010an. Perilaku kelelawar didasarkan pada 3 aturan ideal sebagai berikut :

- Kelelawar menggunakan ekolokasi untuk mensensor jarak dan membedakan antara makanan dan rintangan bahkan didalam kegelapan.
- Kelelawar terbang secara acak untuk mencari makanan dengan kecepatan v_i pada posisi x_i dengan frekuensi tetap f_i , variasi gelombang λ_i dan tingkat kebisingan A_i untuk mencari makanan.
- Tingkat kebisingan dapat bervariasi melalui berbagai cara, dapat diasumsikan dari maksimum (positif) A_0 ke nilai konstan minimum A_{min} .

Untuk tiap posisi kelelawar X_i yang terbang dengan kecepatan V_i dalam tiap waktu t dapat dituliskan persamaan :

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta, \quad (25)$$

$$(26)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i^t &= \mathbf{v}_i^{t-1} + (\mathbf{x}_i^t - \mathbf{x}_*)f_i, \\ \mathbf{x}_i^t &= \mathbf{x}_i^{t-1} + \mathbf{v}_i^t, \end{aligned} \quad (27)$$

Dan posisi terbaik dapat ditulis dengan persamaan :

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{x}_{\text{old}} + \epsilon A^t, \quad (28)$$

Dimana $\epsilon \in \Sigma [-1, 1]$ adalah bilangan acak pada saat $A^t = \langle A_i^t \rangle$ adalah kebisingan rata-rata yang ditimbulkan. Kebisingan A_i dan pembangkitan pulsa r_i di update tiap iterasi sesuai persamaan :

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, \quad r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)], \quad (29)$$

Dimana α dan β adalah konstanta, untuk $0 < \alpha < 1$ dan $\beta > 0$ dapat ditulis persamaan :

$$A_i^t \rightarrow 0, \quad r_i^t \rightarrow r_i^0, \quad \text{as } t \rightarrow \infty. \quad (30)$$

3.8. Artificial Bee Colony

Algoritma ini berdasarkan pergerakan lebah dalam mencari sumber makanan, secara umum dapat dibagi dalam 3 tahap :

- Inisialisasi

$$Y_i = (Y_{i,1}, Y_{i,2}, \dots, Y_{i,D}) \quad (31)$$

- Pergerakan lebah

$$Y_{i,j} = Y_{\min,j} + \text{rand}(0, 1)(Y_{\max,j} - Y_{\min,j}) \quad (32)$$

- Fungsi fitness

$$\text{Fitness} = \begin{cases} 1/(1 + f_i), & f_i \geq 0 \\ 1 + \text{abs}(f_i), & f_i < 0 \end{cases} \quad (33)$$

3.9. Flower Pollination

Algoritma *flower pollination* dapat dijelaskan sesuai dengan karakteristik dan perilaku perkawinan / penyerbukan pada bunga sebagai berikut :

- Botik dan penyerbukan silang diasumsikan sebagai proses penyerbukan global dengan serbuk sari yang terbang sesuai aturan Levy.
- Abiotik dan penyerbukan dirinya sendiri diasumsikan sebagai penyerbukan lokal.
- Bunga hasil perkawinan adalah mengikuti probabilitas reproduksi, yaitu mengalami kemiripan dengan 2 induknya.
- Penyerbukan lokal dan global mempunyai probabilitas $p \in [0,1]$.

Aturan 1 dari algoritma ini adalah sebagai berikut :

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + L(\mathbf{x}_i^t - \mathbf{g}_*), \quad (34)$$

Dimana X_i^t adalah serbuk sari i untuk solusi vektor X_i dengan iterasi t dan \mathbf{g}_* adalah solusi terbaik diantara solusi-solusi lain yang dihasilkan, sedangkan L adalah kekuatan penyerbukan. Jika serangga pengganggu

diperhitungkan, maka aturan Levy dapat digunakan, untuk $L > 0$ maka distribusi Levy adalah :

$$L \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi\lambda/2)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}}, \quad (s \gg s_0 > 0).$$

Dan aturan 2 adalah sebagai berikut :

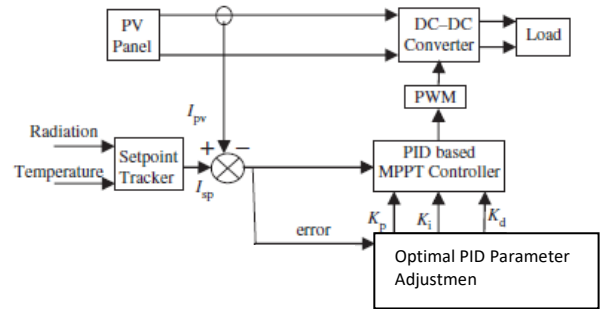
$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \epsilon(\mathbf{x}_j^t - \mathbf{x}_k^t), \quad (36)$$

Dimana X_j^t dan X_k^t adalah serbuk sari dari bunga lain dengan spesies yang sama.

IV. MPPT BERBASIS OPTIMAL PID

4.1 Diagram blok MPPT Berbasis Optimal PID

Perancangan model MPPT dapat digambarkan sebagai berikut, dimana konstanta PID akan ditala dengan algoritma komputasi cerdas :



Gambar.7 Diagram Blok MPPT Berbasis Optimal PID

4.2 Desain Set Point Tracker

Tracking set-point yang dinamis akan menjamin besar I_{mp} selalu dalam harga maksimumnya, dimana hubungan antara I_{sc} dan I_{mp} adalah sebagai berikut :

$$I_{mp} = k \times I_{sc} \quad (37)$$

Dimana harga faktor k selalu < 1 dan bervariasi antara 0,78 dan 0,92, secara umum digunakan 0,9 (Kumari, Babu, & Yugandar, 2011). Dalam praktek, pengukuran I_{sc} sulit sehingga ditentukan sesuai persamaan (6) dan (7) dan besar $I_{sc,1}$ dan $S1$ diperoleh dari kurva I-V *datasheet* pabrik pembuatnya.

4.3 Desain PID

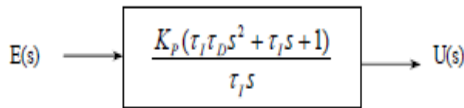
Kontroler PID merupakan kontroler *feed-forward* yang berfungsi mengolah sinyal error menjadi sinyal kontrol, dimana hubungan sinyal kontrol terhadap sinyal error berupa gabungan proporsional, integral dan differensial yang dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int e(t) dt + \tau_D \frac{d}{dt} e(t)] \quad (38)$$

Atau dalam bentuk fungsi alih :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s\right) \quad \text{atau} \quad \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p (\tau_I \tau_D s^2 + \tau_I s + 1)}{\tau_I s} \quad (39)$$

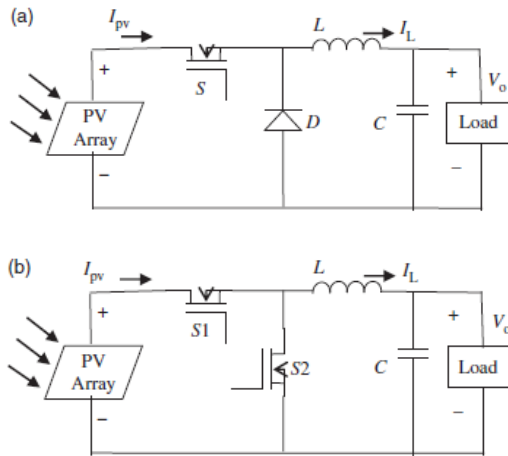
Dan dalam bentuk diagram blok :



Gambar.8 Diagram Blok Kontroler PID

V. PENALAN/TUNING PARAMETER PID

Konverter DC-DC adalah sistem yang non linear, dan desain yang digunakan untuk MPPT adalah konverter buck sinkron karena mempunyai efisiensi yang lebih tinggi daripada yang asinkron (Jain, 2013). Sistem untuk masing-masing konverter buck, asinkron maupun sinkron adalah sebagai berikut :



Gambar.9 (a) dan (b) Konfigurasi konverter buck asinkron dan sinkron untuk sistem PV

Pada regulator buck asinkron, tegangan output dikontrol dengan mengubah *duty-cycle* melalui saklar S. Saat saklar on, dioda D terhubung *reverse* sehingga induktor dan beban mendapat energi dari sel surya. Selama periode saklar off, dioda terhubung *forward* sehingga beban hanya mendapat energi dari induktor karena input terisolasi. Total energi output selalu lebih

kecil daripada energi input, sehingga rasio output terhadap input adalah *duty-cycle* (Rashid, 2001).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D, \quad (40)$$

Untuk konverter buck tipe sinkron, dioda D diganti dengan MOSFET S₂. S₁ disebut *high side* MOSFET dan S₂ disebut *low side* MOSFET. Kedua MOSFET bekerja komplementer atau kebalikan (saat satu MOSFET on, maka MOSFET yang lain dalam kondisi off). Dalam desain ini, konverter buck sinkron bekerja pada mode konduksi dengan parameter sebagai berikut :

Tabel 1. Parameter konverter buck

Input voltage (V_{in})	21.8 Volt
Output voltage (V_{out})	17.4 Volt
Input current (I_{in})	2.5 Amp
Switching frequency (f_s)	120 KHz
Max. inductor current ripple	30%
Inductor (L)	7 μ H
Maximum load resistance (R)	7.55 Ω
Output capacitor (C)	2200 μ F
Nominal duty ratio (D)	0.8

Fungsi alih sinyal kecil/*small signal* (G_{vg}) yang menghubungkan output dengan variasi input dan variasi *duty-cycle* adalah sebagai berikut :

$$G_{vg} = \frac{D}{1 + s/(R\sqrt{C/L})(1/\sqrt{LC}) + s^2/(1/\sqrt{LC})}, \quad (41)$$

Dimana D adalah nominal *duty-cycle*, R adalah resistansi beban maksimum, L adalah induktor dan C adalah kapasitor. Konstanta parameter PID yang ditentukan dengan aturan Ziegler-Nichols adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Parameter PID

K_p	T_i	T_d
0.6 K_u	$P_u/2$	$P_u/8$

Sehingga persamaan (41) dapat ditulis ulang sebagai berikut :

$$G_{vg} = \frac{0.8}{1 + (3.5 \times 10^{-7})s + (1.54 \times 10^{-8})s^2}. \quad (42)$$

Kestabilan dari fungsi alih *open loop* dapat dilihat dengan memeriksa kutub-kutubnya.

Untuk sistem ini sesuai dengan persamaan (25), kedua kutubnya berada pada sisi kanan *s-plane* sehingga stabil untuk sistem *open loop* nya.

VI. HASIL SIMULASI DAN DISKUSI

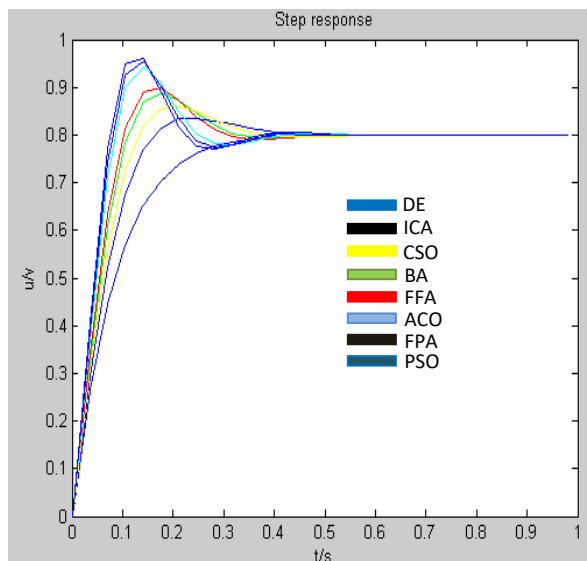
Simulasi dilakukan menggunakan software MATLAB 2013 dengan hasil sebagai berikut :

Parameter K_p , K_i dan K_d yang dihitung dengan masing-masing algoritma komputasi cerdas dengan iterasi sampai 50 dapat dilihat dalam tabel 3.

Tabel 3. Optimal PID

Parameter	ICA	CSA	DE	ACO
K_p	34.7941	4.36	40	39.7801
K_i	0.0953	9.1	9.9951	9.1684
K_d	1	0.59	1	0.9775
Parameter	FF	PSO	BA	FPA
K_p	40	37.6829	25.2082	39.6776
K_i	2.817	1.4529	7.2255	2.8930
K_d	1	0.4777	0.0648	0.0052

Respon kontroler PID pada MPPT dengan penalaan sesuai hasil optimasi masing-masing algoritma sesuai gambar berikut :



Gambar.10 Step Response kontroler PID

Dari 8 algoritma komputasi cerdas yang diterapkan pada MPPT untuk penalaan/*tuning* kontroler PID, *Differential Evolution* memberikan *performance index* yang paling baik dengan *settling time* = 0.4, *rising time* = 0.3 dan *overshoot* = 0.

VII. KESIMPULAN

Semua algoritma komputasi cerdas memberikan *performance* yang memuaskan untuk penalaan kontroler PID pada MPPT dibandingkan penalaan secara *trial and error*.

VIII. REFERENSI

Brito, M., Galotto, L., Sampaio, L., Melo, G., & Canesin, C. (2013, March). Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(3), 1156-1167.

Dnyaneshwar S. Karanjkar, S. Chatterji, Amod Kumar, S.L. Shimi, "Fuzzy adaptive proportional-integral-derivative controller with dynamic set-point adjustment for maximum power point tracking in solar photovoltaic system", *Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal*, Vol.2, August 2014, 562-582.

Hui, J., & Sun, X. (2010). MPPT strategy of PV system based on adaptive fuzzy PID algorithm. In *Proceedings of international conference on intelligent computing for sustainable energy and environment* (pp. 220-228). Wuxi, China.

Jain, A. (2013). *Synchronous vs asynchronous buck regulators* (pp. 1-5). Camarillo, CA: Semtech Corp. Retrieved August 2013, from url: http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Semtech_600/PDF/Semtech_synchronous_vs-asynchronous-buck-regulators.pdf?redirected=1

Jantsch, M., Real, M., Haberlin, H., Whitaker, C., Kurokawa, K., Blasser, G., & Kremer, P. (1997). Measurement of PV maximum power point tracking performance. *Proceedings of photovolt. solar energ. Conf*, Barcelona.

Marcelo, M. G., Gazoli, J., & Filho, E. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24, 1198-1208.

Swati signh, Lini Mathew, Simi S.L, "Desain and Simulation of Intelligent Control MPPT Technique for PV Module Using MATLAB/SIMSCAPE",

International Journal of Advance Research in Electrical, Electronics, and Instrumentation Engineering Vol.2, Issue 9 September 2013, 4554-4566

Salhi, M., & Bachtiri, R. (2011, June). A maximum power point tracking photovoltaic system using a proportional integral regulator. *Science Academy Transactions on Renewable Energy Systems Engineering and Technology*, 1(2), 37–44.

Subudhi, B., & Pradhan, R. (2013). A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4, 89–98.

Zhang, F., Thanapalan, K., Procter, A., Carr, S., & Maddy, J. (2013, June). Adaptive hybrid maximum power point tracking method for a photovoltaic system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28(2), 353–360.

Zhou, W., Yang, H., & Fang, Z. (2007). A novel model for photovoltaic array performance prediction. *Journal of Applied Energy*, 84, 1187–1198. Down