

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

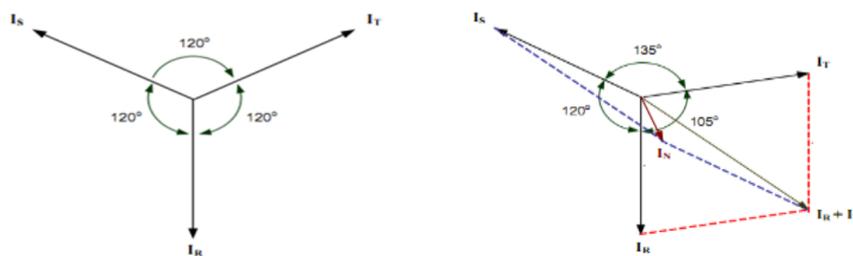
#### 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik ke konsumen. Berdasarkan susunan rangkaiannya, jaringan distribusi terbagi menjadi dua bagian, yaitu: jaringan distribusi primer (JDP) yang merupakan jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu induk sub transmisi ke gardu distribusi. Jaringan ini termasuk jaringan distribusi tegangan menengah (JDTM) dengan tegangan 6 kV atau 20 kV. Dan jaringan distribusi sekunder (JDS) yaitu jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi ke konsumen. Jaringan ini sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah (JDTR) dengan tegangan 220 V atau 380 V [9].

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, sering terjadi permasalahan kualitas daya listrik yang disebabkan oleh fenomena elektromagnetik yang terjadi seperti: ketidakseimbangan tegangan dan arus, faktor daya, dan total harmonik distorsi tegangan dan arus [10]. Sementara dampak dari kualitas daya listrik yang buruk dapat berpengaruh langsung terhadap peralatan listrik yang terhubung.

#### 2.2 Ketidakseimbangan Beban

Masalah yang sering timbul pada sistem tiga fasa yaitu ketidakseimbangan beban yang memperburuk kualitas daya listrik yang diterima konsumen. Hal ini biasanya terjadi karena beban pada salah satu fasa lebih mendominasi dari ketiga fasa tersebut. Sedangkan keadaan beban seimbang adalah suatu keadaan dimana ketiga vektor arus/tegangan sama besar dengan membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain. Jika terjadi ketidakseimbangan beban, sudut beban per fasa akan tidak sama dengan  $120^\circ$  yang mengakibatkan mengalirnya arus pada kawat netral.



Gambar 2.1 Vektor Diagram Arus [11]

Dari diagram vektor arus diatas, bagian kiri menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang dimana penjumlahan vektor arusnya ( $I_R, I_S, I_T$ ) yaitu sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral ( $I_N$ ). Beda halnya dengan vektor diagram bagian kanan merupakan vektor diagram arus yang tak seimbang. Terlihat bahwa penjumlahan setiap masing-masing vektor arusnya ( $I_R, I_S, I_T$ ) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral ( $I_N$ ) yang besarnya tergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

Dalam menentukan besar nilai persentase ketidakseimbangan beban, digunakan beberapa persamaan sebagai berikut:

Pertama, mencari arus rata – rata ( $I_{avr}$ ) dengan menggunakan persamaan berikut :

$$I_{avr} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2.1)$$

Keterangan:

$I_{avr}$  = Arus rata - rata (A)

$I_R, I_S, I_T$  = Arus per fasa (A)

Setelah itu, mencari nilai koefisien a, b, dan c menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} a &= \frac{I_R}{I_{avr}} \\ b &= \frac{I_S}{I_{avr}} \\ c &= \frac{I_T}{I_{avr}} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Dan persentase ketidakseimbangan beban dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut:

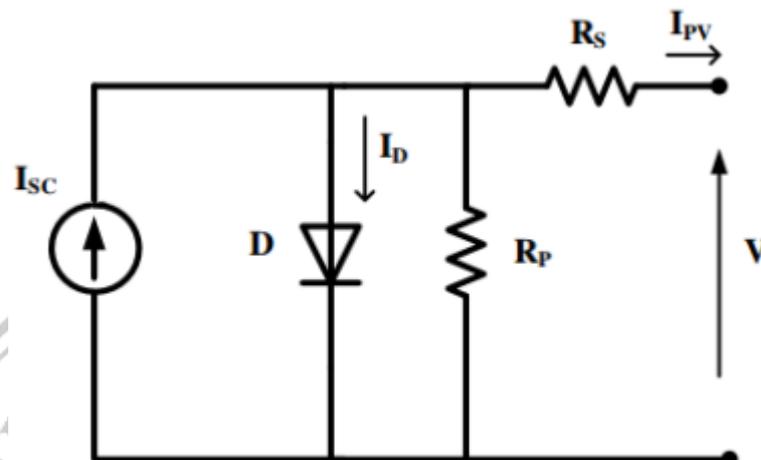
$$\% \text{ Faktor Ketidakseimbangan /Phasa} = \frac{|I_{RST} - I_{avr}|}{I_{avr}} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\% \text{ Ketidakseimbangan Beban} = \frac{\{|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|\}}{3} \times 100\% \quad (2.4)$$

### 2.3 Photovoltaic (PV)

*Photovoltaic* adalah perangkat nonlinier yang mampu mengkonversi energi yang terkandung dalam *foton* cahaya menjadi tegangan listrik dan arus. Parameter PV bergantung pada sinar matahari dan suhu. Sinar matahari diubah menjadi listrik oleh sel *photovoltaic*. Setiap sel PV hanya menghasilkan tegangan senilai 0,5 Volt [12]. Array *photovoltaic* terdiri dari modul PV yang disusun secara paralel maupun

seri. Hal ini menjadi salah satu faktor penting dalam mendesain sistem PV agar energi yang diperlukan dapat tercapai. Tidak hanya beban DC yang dapat diumpankan oleh tegangan dan arus yang dihasilkan pada terminal PV tetapi juga dapat dihubungkan ke inverter untuk menghasilkan arus bolak-balik. Rangkaian ekuivalen panel surya ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Rangkaian Ekuivalen Surya [13]

Model sel PV dapat didefinisikan menggunakan persamaan berikut:

$$I_{PV} = N_P I_{SC} - N_S I_D [\exp\{q(V_{PV} + I_{PV} R_S) / N_S A k T\} - 1] - V_{PV} + (I_{PV} R_S) / R_P \quad (2.4)$$

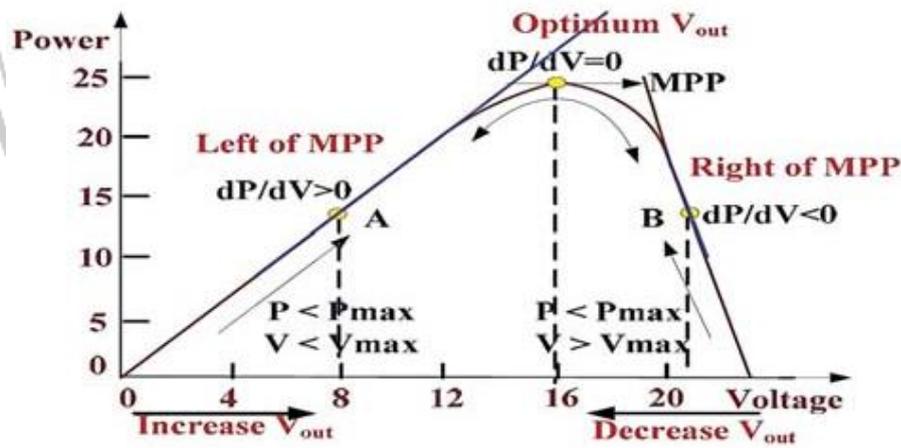
dimana :

- k = Konstanta Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$ ) JK<sup>-1</sup>
- q = Muatan elektronik ( $1.602 \cdot 10^{-19}$ )
- T = Suhu sel (K)
- A = Faktor idealitas dioda
- R<sub>S</sub> = Hambatan seri (Ω)
- R<sub>P</sub> = Hambatan shunt (Ω)
- N<sub>S</sub> = Jumlah sel yang terhubung seri
- N<sub>P</sub> = Jumlah sel yang terhubung paralel
- I<sub>SC</sub> = Arus hubung singkat (A)
- T = Suhu operasi modul (K)
- I<sub>PV</sub> = Arus keluaran sel PV
- I<sub>D</sub> = Arus saturasi dioda

Penggabungan resistansi seri dan resistansi shunt memberikan peluang pemodelan yang akurat dari sel PV.  $R_s$  sesuai dengan kerugian internal karena aliran arus dan  $R_p$  sesuai dengan arus bocor ke tanah. Penggabungan modul seri ( $N_s$ ) meningkatkan tegangan *output array photovoltaic* dan penggabungan modul paralel  $N_p$  meningkatkan arus *output* dari *array photovoltaic*.

#### 2.4 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT adalah perangkat kontrol yang digunakan untuk melacak (*Maximum Power Point*) MPP dari PV *array* selama perubahan radiasi sinar matahari dan meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem PV yang terhubung ke jaringan [13]. Untuk mendapatkan daya maksimum dari panel surya, diperlukan algoritma pelacak yang efisien untuk MPPT. Tugas algoritma pelacak adalah melacak titik daya maksimum panel surya seakurat mungkin. Adapun algoritma yang dapat digunakan salah satunya adalah *perturb and observe* (P&O). Teknik P&O adalah salah satu algoritma MPPT yang paling umum karena kesederhanaannya, kemudahan implementasi, dan kebutuhan daya komputasi yang kecil. Titik Daya Maksimum diperoleh ketika gradien kurva PV seperti nol sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 2.3 berikut.



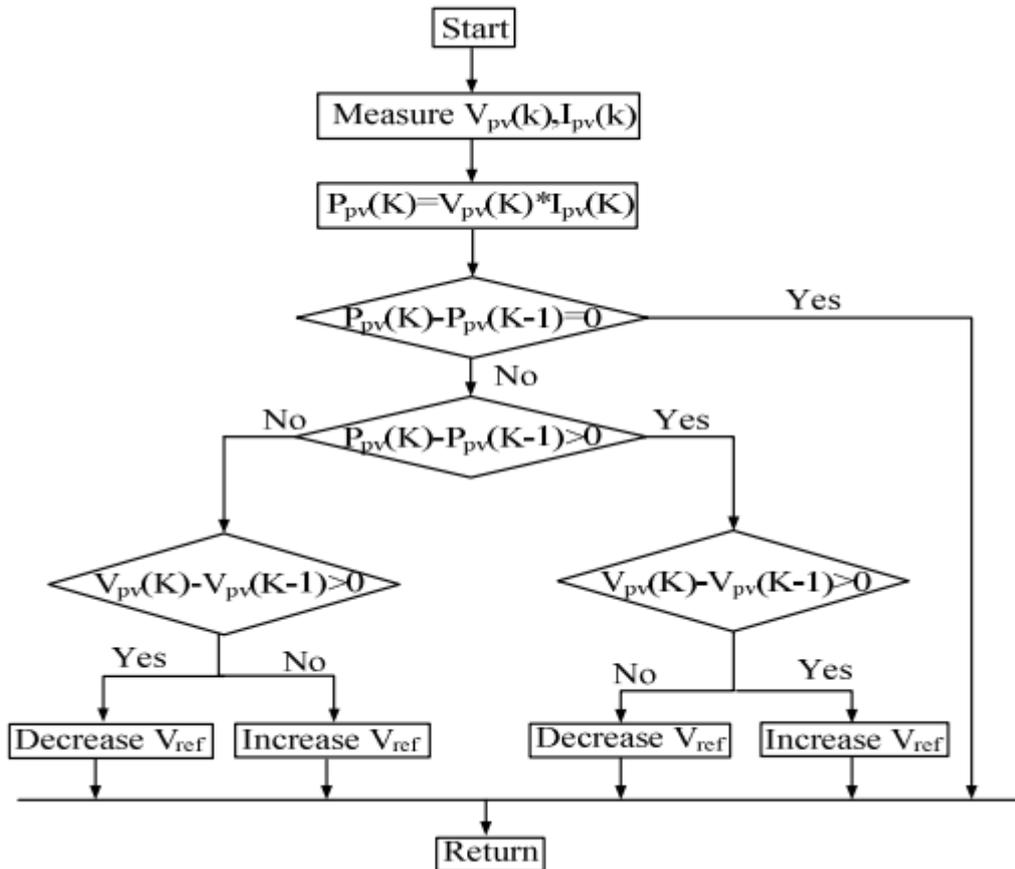
**Gambar 2.3** Prinsip Dasar MPPT dalam Sistem Konversi PV [14]

Jadi, untuk melacak MPP, tegangan PV ( $V_{PV}$ ) diatur meningkat ketika turunan daya sehubungan dengan tegangan positif ( $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0$ ) dan berkurang ketika turunan daya sehubungan dengan tegangan negatif ( $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0$ ) Algoritma kontrol

yang menyediakan *tracking* berkelanjutan terhadap MPP dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{MPP} = K_1 \int \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} dt \quad (2.4)$$

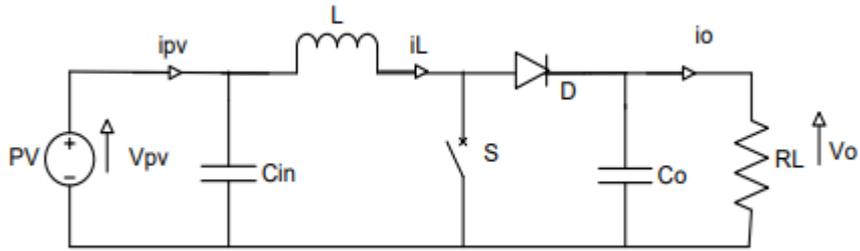
Berikut merupakan bagan alur algoritma P&O.



**Gambar 2.4** Bagan Alur Algoritma P&O MPPT [14]

## 2.5 DC to DC Boost Converter

DC/DC *boost converter* adalah rangkaian elektronika daya yang biasanya digunakan untuk menaikkan tegangan input DC rendah ke tegangan output DC lebih tinggi dari beban yang diinginkan [15]. *Boost converter* memiliki dua mode operasi yaitu mode arus terputus-putus (DCM) dan mode arus kontinu (CCM). Dalam aplikasi daya, *boost converter* dapat beroperasi dalam mode operasi apa pun di bawah tingkat daya yang berubah, dan setiap mode memiliki karakteristik varians. Prinsip operasi dari *boost converter* ditunjukkan pada Gambar 2.5 sebagai berikut.



**Gambar 2.5** Rangkaian *Boost Converter* [15]

Saat sakelar hidup, dioda menjadi bias mundur, sehingga mengisolasi tahap beban. Sumber input menyimpan energi dalam induktor. Setelah sakelar daya mati, tahap beban mendapat energi dari induktor dan juga dari sumber, oleh karena itu tegangan beban lebih besar dari tegangan sumber. Konverter *boost* konvensional memiliki rangkaian sederhana dan biaya rendah. Kerugian dari konverter *boost* konvensional adalah arus *ripple* yang tinggi pada komponen aktif dan pasif, tegangan tegangan yang besar untuk sakelar daya, dan membutuhkan nilai kapasitor yang besar untuk menjaga agar tegangan output tetap stabil. Adapun persamaan untuk mendapatkan nilai induktor (L) dan kapasitor (C) yang digunakan pada rangkaian *boost converter* agar bekerja secara kontinu sebagai berikut [16]:

$$L = \frac{V_{in} \times D}{\Delta I_L \times f_{sw}} \quad (2.5)$$

$$C = \frac{I_o \times D}{\Delta V_o \times f_{sw}} \quad (2.6)$$

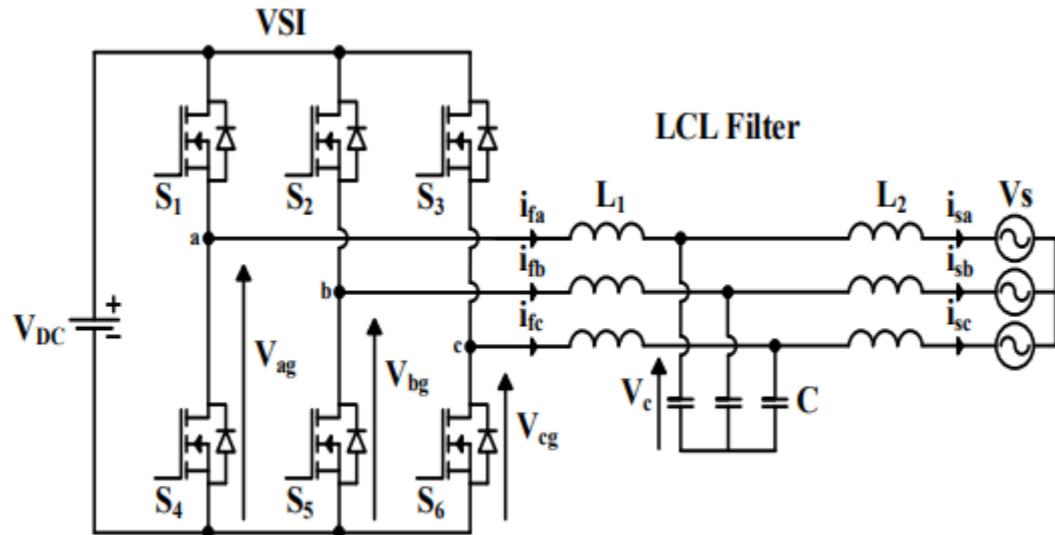
dimana:

- $V_{in}$  : Tegangan Masukan (V)
- D : *Duty cycle*
- $I_o$  : Arus keluaran (A)
- $f_{sw}$  : Frekuensi *switching* (Hz)
- $\Delta I_L$  : Riak arus induktor (A)
- $\Delta V_o$  : Riak tegangan keluaran (V)

## 2.6 Inverter

Dalam sistem PV yang terhubung ke jaringan, inverter berperan penting untuk mengubah daya DC yang dihasilkan *array* PV menjadi daya AC dengan sinkronisasi jaringan [17]. Inverter tiga fasa yang digunakan pada sistem PV yang

terhubung ke jaringan adalah tipe *voltage source inverter* (VSI) yang dilengkapi dengan perangkat pemindah daya (*Insulated gate bipolar transistors* (IGBT), *Gate turn of thyristor* (GTO) atau *Metal-Oxide semiconductor field-effect transistor* (MOSFET)).



**Gambar 2.6** Rangkaian Grid terhubung Inverter dengan Filter LCL [18]

## 2.7 Filter

Dalam pengaplikasiannya, filter berperan penting dalam hal meminimalisir harmonisa frekuensi tinggi yang timbul akibat *switching* inverter sebelum disuntikkan ke jaringan. Mempertahankan jumlah nilai induktor filter LCL lebih rendah dari 0,1 pH menjamin penurunan voltase pada frekuensi fundamental dapat diabaikan dan meningkatkan laju respons sistem [19]. Dalam penyetapan ukuran kapasitas filter yang diaplikasikan, baik itu filter L, LC maupun LCL memerlukan aturan untuk memastikan filter dapat menyaring komponen harmonik yang diinginkan. Sehingga berlaku beberapa persamaan dalam menentukan kapasitas filter, yaitu:

Menentukan nilai induktor total maksimum ( $L_{t_{max}}$ ), sebagai berikut:

$$L_{t_{max}} = 10\% \frac{V_{sn}^2}{2\pi f_s P_n} \quad (2.7)$$

dimana:

$V_{sn}$  : Tegangan RMS nominal *line to line* (V)

$f_s$  : Frekuensi *grid* nominal (Hz)  
 $P_n$  : Daya Aktif Sistem (W)

Nilai kapasitor filter yang lebih tinggi mempengaruhi faktor daya secara negatif. Untuk topologi wye, nilai kapasitor batas ( $C_f$ ), yang mempertahankan faktor daya kesatuan, dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_f = 5\% \frac{P_n}{2\pi f_s V_{sn}^2} \quad (2.8)$$

Dan untuk nilai minimum induktor pada sisi inverter ( $L_{i_{min}}$ ) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$L_{i_{min}} = \frac{V_{dc}}{6f_{sw}\Delta I_{max}} \quad (2.9)$$

dimana:

$V_{dc}$  : Tegangan DC-link  
 $f_{sw}$  : Frekuensi *switching* (Hz)

Nilai  $L_{i_{min}}$  harus lebih rendah dari  $L_{t_{max}}$ . Nilai induktor sisi grid ( $L_g$ ) dapat dicari menggunakan nilai 3-5 kali lebih kecil dari  $L_{i_{min}}$ . Dan untuk nilai resistor filter dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

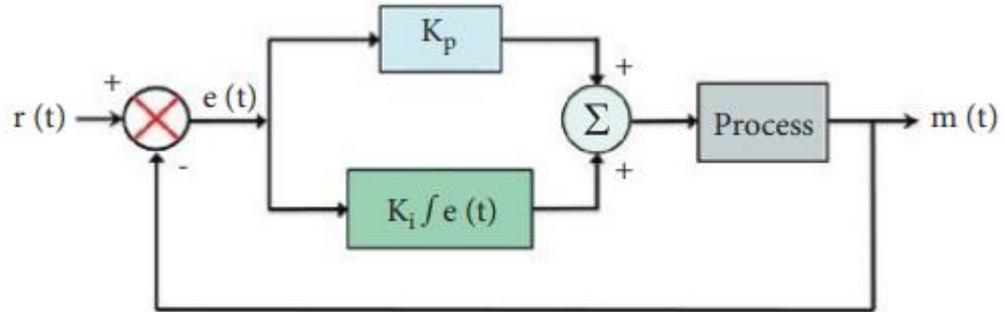
$$R = \frac{1}{3\omega_{res}C_f} \quad (2.10)$$

## 2.8 PI Controller

Pengontrol (*propotional – integral*) PI adalah skema kompensasi kesalahan integral, respon *output* tergantung dalam beberapa cara pada integral dari sinyal penggerak. Kompensasi pengontrolan PI menghasilkan sebuah sinyal keluaran terdiri dari dua suku, satu berbanding lurus dengan sinyal penggerak dan yang lainnya berbanding lurus dengan integralnya [20].

Pengontrol PI memiliki  $K_p$  sebagai gain proporsional dan  $K_i$  sebagai gain integral [21]. Pengontrol PI akan meminimalkan osilasi paksa dan kesalahan keadaan tunak, memungkinkan pengontrol on-off dan P berfungsi dengan baik. Di sisi lain, mode integral memiliki dampak negatif pada waktu respons sistem dan stabilitas keseluruhan. Akibatnya, pengontrol PI tidak akan menambah waktu reaksi. Pengontrol PI gagal ketika objek yang dikontrol sangat nonlinier dan tidak pasti. Adapun persamaan pengontrolan PI sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (2.10)$$



**Gambar 2.7** Diagram Blok PI Controller [21]

Dalam domain frekuensi, bentuk persamaannya sebagai berikut:

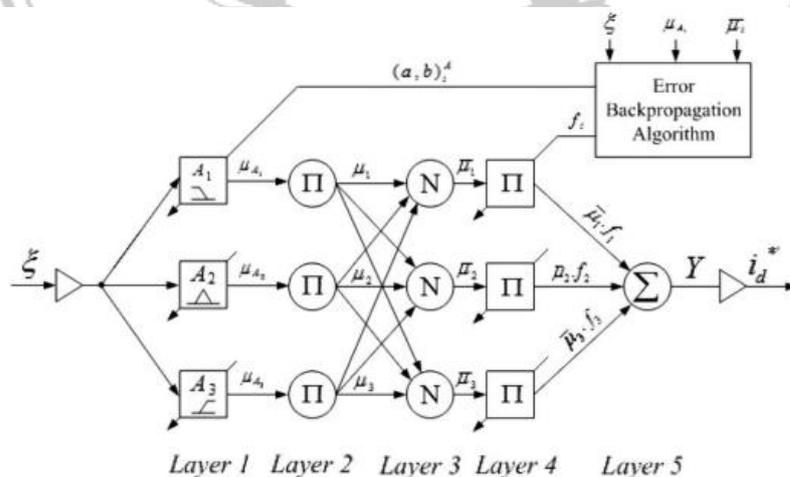
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.11)$$

Adapun fungsi alih dari pengontrolan PI sebagai berikut:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (2.12)$$

## 2.9 Artificial Neuron Network Fuzzy Interface (ANFIS)

ANFIS adalah penggabungan dari mekanisme *Fuzzy Inference System* (FIS) yang dijelaskan dalam arsitektur Neural Network (NN). FIS yang digunakan adalah model fuzzy tingkat pertama dari model Takagi Sugeno Kang (TSK) dengan pertimbangan kesederhanaan dan kemudahan komputasi.



**Gambar 2.8** Skema Arsitektur Kontrol ANFIS [22]

Lapisan 1: Lapisan ini juga dikenal sebagai lapisan fuzzifikasi dimana setiap node diwakili oleh sebuah persegi. Parameter pada layer ini disebut sebagai parameter premis atau parameter prakondisi.

Lapisan 2: Setiap node di lapisan ini adalah lingkaran berlabel  $\Pi$  yang mengalikan sinyal yang masuk dan meneruskannya ke lapisan berikutnya. Di sini, output dari setiap node merepresentasikan kekuatan tembak dari suatu aturan.

$$\mu_i = \mu_{A_i}(\xi_1) \cdot \mu_{B_i}(\xi_2) \dots, \quad i = 1,2,3 \quad (2.13)$$

Lapisan 3: Setiap simpul di lapisan ini diwakili oleh sebuah lingkaran. Lapisan ini menghitung kekuatan tembak yang dinormalisasi dari setiap aturan seperti yang diberikan berikut ini:

$$\bar{\mu}_i = \frac{\mu_i}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}, \quad i = 1,2,3 \quad (2.14)$$

Lapisan 4: Setiap node pada layer ini adalah node persegi dengan fungsi node

$$O_i = \bar{\mu}_i \cdot f_i = \bar{\mu}_i (a_0^i + a_1^i \cdot \xi), \quad i = 1,2,3 \quad (2.15)$$

dimana parameter  $\{a_0^i, a_1^i\}$  disetel sebagai fungsi input ( $\xi$ ). Parameter pada lapisan ini juga disebut sebagai parameter konsekuen.

Lapisan 5: Lapisan ini juga disebut lapisan keluaran yang menghitung keluaran seperti yang diberikan berikut ini:

$$Y = \bar{\mu}_1 \cdot f_1 + \bar{\mu}_2 \cdot f_2 + \bar{\mu}_3 \cdot f_3 \quad (2.16)$$

Keluaran dari lapisan ini dikalikan dengan faktor normalisasi untuk mendapatkan komponen arus daya aktif ( $id^*$ ).