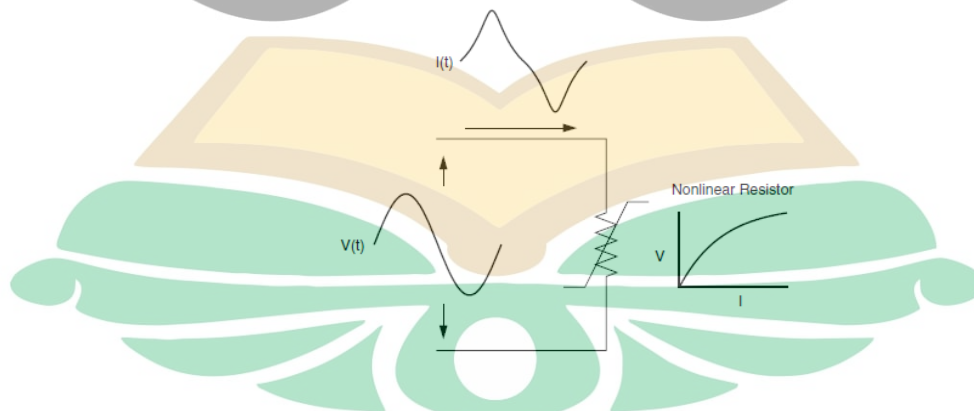


Bab 2 memuat tentang dasar teori dan literasi terkait dengan harmonisa, indeks harmonisa, beban non linier, *Shunt Active Power Filter* (SAPF), teori daya sesaat, *hysteresis current control*, indeks harmonisa, sistem uji IEEE 14 Bus, pengendali PI, ITAE, dan algoritma optimasi GWO.

## 2.1 Harmonisa

Harmonisa adalah komponen sinusoidal dari suatu gelombang periodik yang memiliki frekuensi besarnya kelipatan bilangan bulat positif dari frekuensi fundamental (IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1993). Harmonisa dapat juga didefinisikan sebagai komponen dengan frekuensi berkelipatan bilangan bulat terhadap frekuensi dasarnya. Harmonisa pertama adalah frekuensi dasar yaitu 50 atau 60 Hz, harmonisa kedua adalah komponen dengan frekuensi dua kali frekuensi dasar yaitu 100 atau 120 Hz, dst (Baggini, 2008).

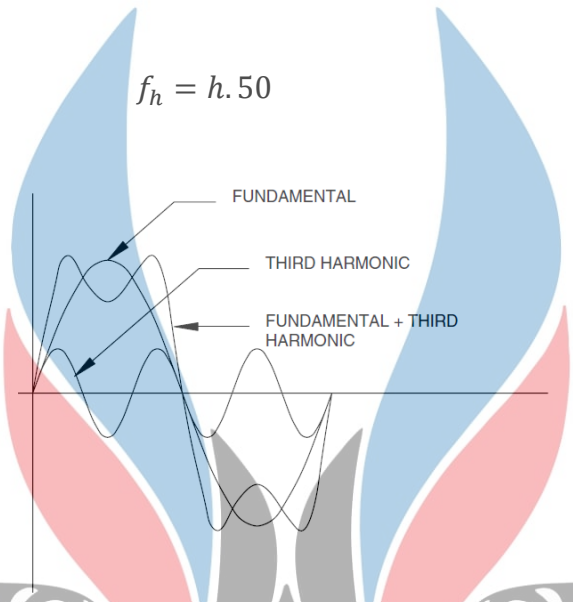
Distorsi harmonisa disebabkan oleh perangkat non linier pada sistem tenaga listrik. Perangkat non linier adalah perangkat dengan arus tidak proporsional (linier) terhadap tegangan. Gambar 2.1 adalah contoh ketika sumber tegangan sinusoidal murni diberikan kepada beban resistor non linier, maka arus akan terdistorsi (Dugan, 2004).



**Gambar 2. 1** Grafik Distorsi Gelombang akibat Beban Non Linier (Dugan, 2004)

Gelombang terdistorsi merupakan penjumlahan dari beberapa gelombang sinusoidal yang berbeda frekuensi. Sistem tenaga listrik di Indonesia menggunakan frekuensi fundamental 50 Hz, sehingga frekuensi harmonisa dapat dituliskan melalui Persamaan (2.1):

$$f_h = h \cdot 50 \tag{2.1}$$



**Gambar 2. 2** Gelombang Frekuensi Fundamental Terdistorsi oleh Harmonisa Ketiga (Dugan, 2004)

Harmonisa dapat dibedakan menjadi harmonisa ganjil dan harmonisa genap. Berdasarkan namanya, harmonisa ganjil adalah harmonisa yang terjadi pada orde bilangan ganjil (3, 5, 7, 9, 11, dan seterusnya) dan harmonisa genap adalah harmonisa pada orde bilangan genap (2, 4, 6, 8, dan seterusnya). Dalam kondisi sistem tenaga listrik yang normal dan seimbang harmonisa yang terjadi ialah harmonisa ganjil. (Sankaran, 2002). Keberadaan harmonisa genap justru mengindikasikan bahwa terdapat sesuatu yang salah pada suatu sistem tenaga listrik (Dugan, 2004).

### 2.2 Indeks Harmonisa

Harmonisa memiliki beberapa indeks yang umumnya digunakan sebagai indikator seberapa besar dampak harmonisa yang terjadi. Indeks harmonisa dapat diamati melalui *individual harmonic distortion (IHD)* dan *total harmonic distortion (THD)*. IHD adalah rasio antara nilai RMS dari masing-masing arus harmonisa dibandingkan dengan nilai RMS arus fundamental atau harmonisa pertama.

Berdasarkan metode ini, maka harmonisa pertama atau arus fundamental selalu bernilai 100% (Rosyadi, 2017). Berikut adalah persamaan (2.2) untuk menghitung nilai IHD:

$$IHD_n = (I_n/I_1) \times 100\% \tag{2.2}$$

Sementara itu, THD adalah rasio antara nilai RMS dari seluruh komponen harmonisa dan nilai RMS dari fundamental yang dinyatakan dalam persen (%). THD dapat diamati melalui besaran THD arus dan tegangan. Indeks harmonisa THDi dan THDv dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.4), (2.5), dan (2.6):

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + \dots + I_n^2)} \tag{2.3}$$

$$THD_i = (I_H/I_1) \times 100\% \tag{2.4}$$

$$THD_v = (V_H/V_1) \times 100\% \tag{2.5}$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \times 100\% \tag{2.6}$$

dimana:

$V_n$  = tegangan rms pada harmonisa ke n (V)

$V_1$  = tegangan fundamental

$I_1$  = arus fundamental

$N$  = maksimum harmonisa

### 2.3 Standar Harmonisa

Terdapat suatu standar batasan untuk nilai distorsi arus yang diizinkan pada suatu sistem tenaga listrik. Standar ini yang akan menjadi seberapa besar nilai harmonisa yang diperbolehkan pada suatu sistem tenaga listrik. Regulasi harmonisa di setiap negara berbeda-beda tergantung pembuat kebijakan. Secara umum standar harmonisa untuk sistem distribusi dapat mengacu pada standar IEEE Std 519-2014 (IEEE Std 519, 2014). Tabel 2.1 adalah tabel standar harmonisa arus yang terdistorsi:

**Tabel 2. 1** Standar Harmonisa untuk Sistem 120 V s.d 69 kV

Distorsi maksimum arus harmonisa dalam persentase $I_L$						
Orde harmonisa individu (harmonisa ganjil)						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Dimana:

$I_{sc}$  = arus *short-circuit* maksimum di PCC

$I_L$  = arus beban maksimum (komponen frekuensi fundamental) di PCC

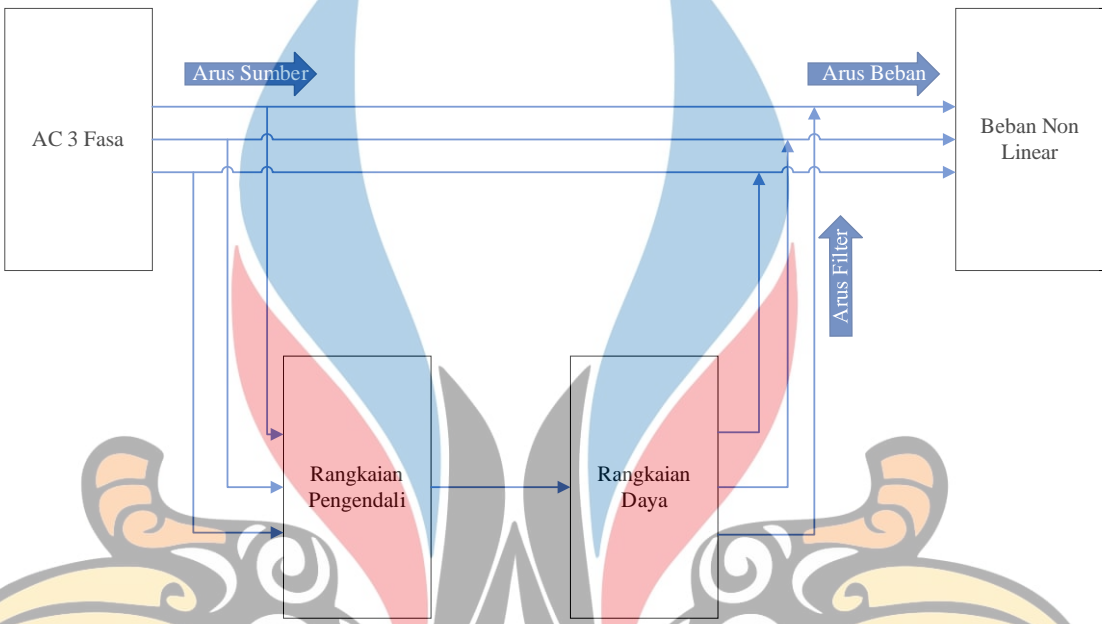
## 2.4 Shunt Active Power Filter (SAPF)

*Shunt active power filter* (SAPF) merupakan mekanisme yang digunakan untuk menghilangkan harmonisa arus dan tegangan pada sistem tenaga listrik. Mekanisme filter ini tergantung pada perangkat berbasis elektronika daya yaitu konverter, perangkat penyaklaran, dan inverter. Keuntungan utama dari SAPF yaitu mampu bekerja secara mandiri dan menangani lebih dari satu harmonisa dalam satu waktu (Vasuniya & Sahajwani, 2020).

SAPF bekerja dengan cara menyuntikan arus kompensasi untuk memperbaiki arus yang terdistorsi akibat sumber yang menyuplai beban non linier. Kompensasi didasarkan pada prinsip penyuntikan arus terdistorsi yang sama dan berlawanan di saluran sistem tenaga listrik. Komponen arus harmonisa yang dihasilkan beban non linier dihilangkan dan arus sumber menjadi sinusoidal setelah dikompensasi (Thajeel et al., 2015).

Secara umum, SAPF terdiri dari dua rangkaian utama yaitu rangkaian daya dan rangkaian kontrol. Rangkaian daya adalah rangkaian yang bertanggungjawab untuk menginjeksikan arus kompensasi yang dibutuhkan. Rangkaian daya terdiri dari *voltage source inverter* (VSI) berbasis *pulse width modulation* (PWM) dan kapasitor *DC-link* untuk menjaga dan mengatur tegangan DC, serta menyimpan energi. Sementara itu,

rangkaian kontrol adalah rangkaian yang secara kontinu melacak variasi arus harmonisa yang terjadi untuk menentukan arus kompensasi referensi sesaat dan juga untuk mengontrol rangkaian daya agar menginjeksikan arus harmonisa yang dibutuhkan secara tepat (Imam et al., 2020).



**Gambar 2. 3** Ilustrasi Rangkaian Pengendali dan Rangkaian Daya (Penulis, 2021)

Kapasitor *DC-link* berperan untuk meminimalkan variasi tegangan pada VSI saat terjadi perubahan kondisi beban dan menyediakan impedansi rendah untuk arus *ripple* yang dibangkitkan oleh penyaklaran pada VSI. Kompensasi arus harmonisa ditentukan oleh tegangan kapasitor *DC-link*. Ketika tegangan dijaga sesuai dengan nilai yang ditetapkan, pembangkitan arus kompensasi harmonisa untuk beban non linier akan tepat (Imam et al., 2020).

Untuk mendesain SAPF terdapat beberapa aspek yang harus diperhatikan yaitu pemilihan perangkat, tegangan referensi kapasitor, induktor, kapasitor *DC-link*, dan unit pengendali. Tegangan *DC-link* kapasitor harus lebih besar dari nilai maksimum tegangan saluran sistem distribusi (Kumaresan & Habeebullah Sait, 2020). Pada penerapan SAPF yang menggunakan PWM dalam modulasi linier dan faktor amplitude

modulusnya bernilai 1, maka tegangan *DC-link* kapasitor dapat diperoleh dengan Persamaan (2.9):

$$V_{DC} = 2\sqrt{2} V_C \quad (2.7)$$

$$V_S < V_C \leq V_S \quad (2.8)$$

$$2\sqrt{2} V_S < V_{DC} \leq 4\sqrt{2} V_S \quad (2.9)$$

Dimana:

$V_{DC}$  = tegangan *DC-link* kapasitor (V)

$V_C$  = tegangan AC keluaran inverter (V)

$V_S$  = tegangan fasa di PCC (V)

Kemudian untuk menentukan besarnya kapasitansi kapasitor dan induktansi induktor agar SAPF dapat mengkompensasi harmonisa dapat menggunakan persamaan (2.10) dan (2.11):

$$C_f = \frac{P \times T}{\frac{1}{2} \times V_{DC}^2} \quad (2.10)$$

$$L_f = \frac{\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} - \frac{V_{line}}{\sqrt{2}}}{\sum_3^{19} n \times \omega \times I_{nh}} \quad (2.11)$$

Dimana:

$C_f$  = kapasitansi kapasitor *DC-link* (F)

$P$  = daya kompensasi (W)

$V_{line}$  = tegangan saluran (V)

$T$  = periode 1 siklus tegangan AC (s)

$I_{nh}$  = rms arus beban (A)

## 2.5 Teori Daya (P-Q) Sesaat

Teori daya sesaat adalah teori yang digunakan untuk mengubah arus dan tegangan dari koordinat a-b-c ke koordinat  $\alpha - \beta$ . Koordinat a-b-c bersifat tetap

pada bidang yang sama, namun berbeda sudut 120°. Langkah transformasi koordinat ini digunakan untuk mendapatkan nilai arus harmonik yang diinjeksikan ke sistem tenaga melalui filter aktif sehingga arus yang diinjeksikan tersebut akan membentuk suatu hubungan yang saling meniadakan dengan arus harmonisa dasarnya karena perbedaan sudut 180° (Afonso et al., 2003). Dalam penerapannya pada sistem seimbang, komponen nol (0) diabaikan karena penjumlahan dari masing-masing komponen arus maupun tegangan ialah nol (Clarke, 1950). Transformasi tegangan dan arus dilakukan berdasarkan persamaan Transformasi Clarke dengan persamaan (2.12) dan (2.13):

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Selanjutnya, berdasarkan persamaan (2.13) dan (2.14), maka komponen daya (P dan Q) sesaat dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\alpha & v_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

Keberadaan beban non linier menyebabkan komponen daya aktif dan reaktif sesaat terdiri dari bagian AC dan DC. Bagian DC ( $\bar{p}$ ) dari daya aktif sesaat (P) merepresentasikan komponen arus dan tegangan fundamental serta berkaitan dengan daya yang dipindahkan dari dari sumber tegangan menuju beban. Sementara itu, bagian AC ( $\tilde{p}$ ) berkaitan dengan pertukaran energi antara sumber tegangan dan beban.

Komponen DC ( $\bar{p}$ ) merupakan satu-satunya daya yang seharusnya disuplai oleh sumber AC tiga fasa diekstraksi dengan menggunakan sebuah *low-pass filter* berorde tinggi (Imam et al., 2020).

$$P = \bar{p} + \tilde{p} \quad (2.15)$$

$$Q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2.16)$$

Untuk menghasilkan arus referensi harmonisa, dibutuhkan komponen AC ( $\tilde{p}$ ) dari daya aktif dan daya reaktif (Q) total. VSI membutuhkan sejumlah kecil daya aktif ( $\bar{p}_{loss}$ ) dari sumber tegangan AC tiga fasa untuk mengatur ulang rugi-rugi penyaklaran dan menjaga agar tegangan DC-link pada level tertentu (Imam et al., 2020). Adapun persamaan komponen AC ( $\tilde{p}$ ) daya aktif, arus komponensasi harmonisa pada koordinat  $\alpha - \beta$  dan a-b-c secara matematis dituiskan berdasarkan persamaan (2.17), (2.18) dan (2.19):

$$\tilde{p} = P - \bar{p} + \bar{p}_{loss} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ Q \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

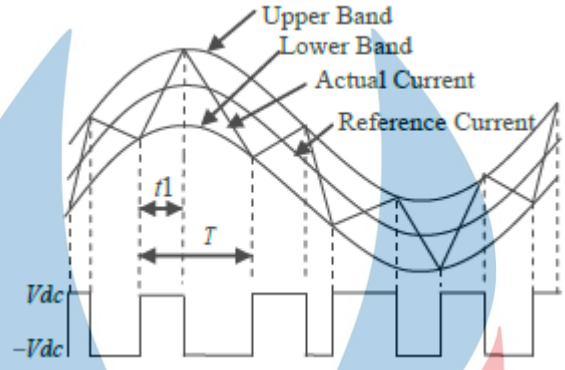
$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

## 2.6 Hysteresis Current Control

Metode pengendalian arus histerisis atau konvensional untuk SAPF digunakan untuk membangkitkan Gelombang penyaklaran pada *voltage source inverter* (VSI). Pengendali arus histerisis mengoperasikan VSI dengan membandingkan *error* arus  $e(t)$  terhadap pita histerisis tetap. Jika nilai kesalahan arus melebihi batas atas dari pita histerisis, maka saklar bagian atas VSI dalam kondisi OFF dan saklar bagian bawah menjadi ON sehingga arus akan meluruh. Jika kesalahan arus melewati batas bawah pita histerisis, maka saklar bagian bawah VSI akan OFF dan saklar atas ON sehingga



arus akan kembali kepada pita histeresis. Oleh karena itu, arus aktual digunakan untuk menjaga agar arus referensi tetap di dalam pita histeresis (Karuppanan, 2012).



Gambar 2. 4 Pola Penyaklaran HCC (Karuppanan, 2012)

### 2.7 Pengendali PI

Kontroler atau pengendali proporsional integral (PI) adalah suatu sistem pengendali gabungan antara pengendali proporsional dan integral. Persamaan (2.20) dan (2.21) adalah persamaan sinyal keluaran pengendali PI dalam waktu kontinu (Darjat et al., 2008):

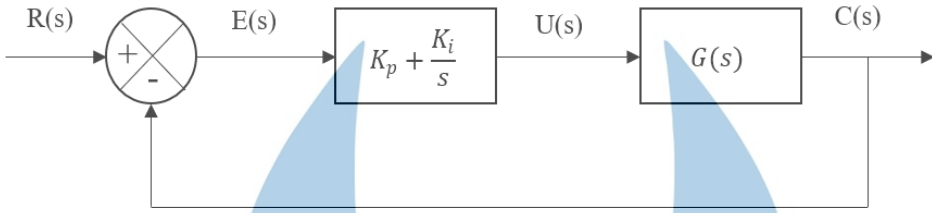
$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \tag{2.20}$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \tag{2.21}$$

dimana:

- $u(t)$  = Gelombang keluaran pengendali PI
- $K_p$  = konstanta proporsional
- $T_i$  = waktu integral
- $K_i$  = konstanta integral
- $e(t)$  = Gelombang kesalahan ( $e(t) = \text{referensi} - \text{keluaran plant}$ )

Sementara itu, Gambar 2.5 dan persamaan (2.22) adalah diagram blok dan fungsi alih dari pengendali PI:



Gambar 2.5 Diagram Blok Pengendali PI (Darjat et al., 2008)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{2.22}$$

### 2.8 ITAE

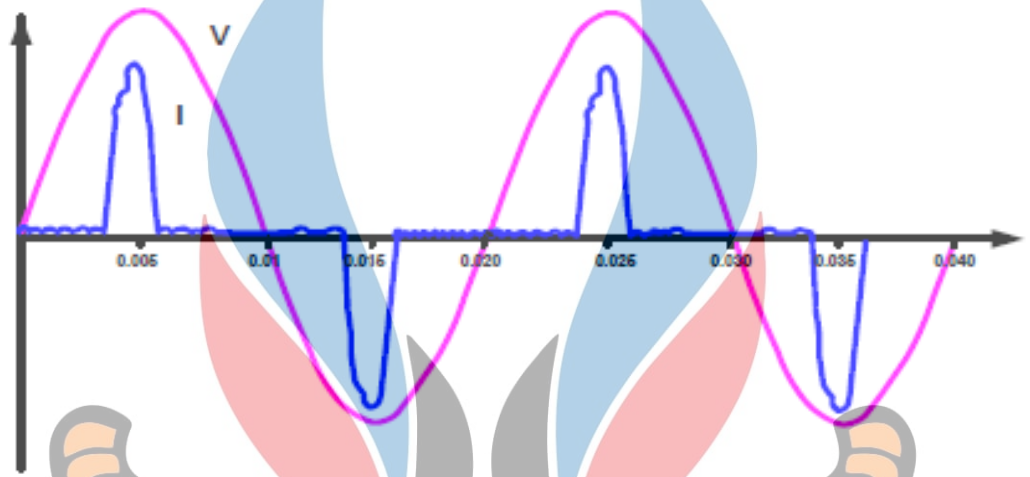
Sistem kendali membutuhkan kriteria performansi sebagai indikator kemampuannya dalam mengendalikan suatu nilai. *Error* dan waktu adalah faktor yang harus diperhatikan secara bersamaan. Sebuah kriteria performansi yang sangat berguna untuk kondisi transien berdurasi panjang adalah *integral of time multiplied by the absolute value of error* (ITAE). Indeks ITAE lebih banyak digunakan dibandingkan indeks performansi lain seperti IAE ataupun ISE. Untuk sistem orde 2, ITAE memiliki nilai *damping ratio* sekitar 0,7 (Hussain et al., 2014). Persamaan ITAE dituliskan dengan persamaan (2.23).

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \tag{2.23}$$

### 2.9 Beban Non Linier

Beban kelistrikan secara umum terbagi menjadi dua yaitu beban linier dan beban non linier. Beban linier adalah beban yang nilai impedansinya konstan setiap waktu, sehingga arus akan selalu berbanding lurus dengan tegangan. Sementara itu, beban non linier adalah beban kelistrikan yang nilai impedansinya tidak konstan dalam setiap periode tegangan masukan, sehingga arus yang dihasilkan tidak sebanding dengan tegangan (Alit et al., 2016).

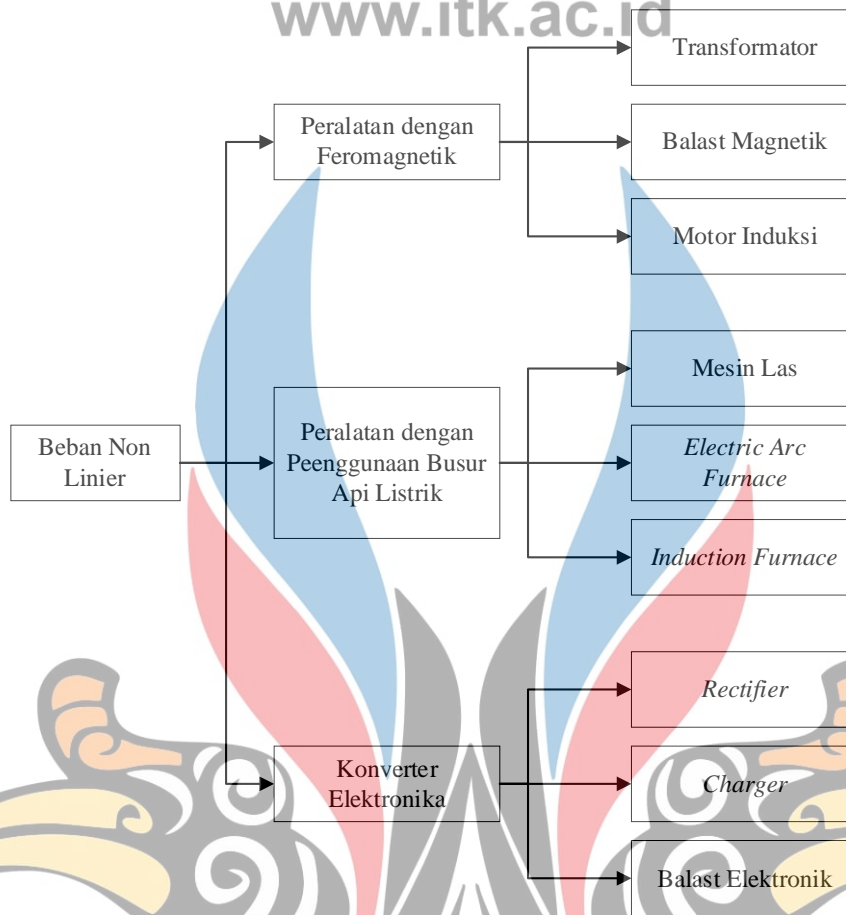
Beban non linier adalah beban yang gelombang arus yang dihasilkan tidak sama bentuknya dengan gelombang tegangan, sehingga memicu terjadinya distorsi gelombang (Amalia, 2015). Distorsi gelombang yang dihasilkan oleh beban non linier dapat diilustrasikan melalui Gambar 2.6 di bawah ini:



**Gambar 2. 6** Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Beban Non Linier (Amalia, 2015)

Penggunaan beban non linier sangat luas, dari sektor industri, komersil, hingga rumah tangga telah memanfaatkan peralatan non linier. Penggunaan beban non linier banyak digunakan di hampir setiap sektoral karena kemampuannya yang sangat tinggi dalam membantu mengefisienkan pekerjaan. Klasifikasi beban non inier secara umum dapat diilustrasikan melalui Gambar 2.7:

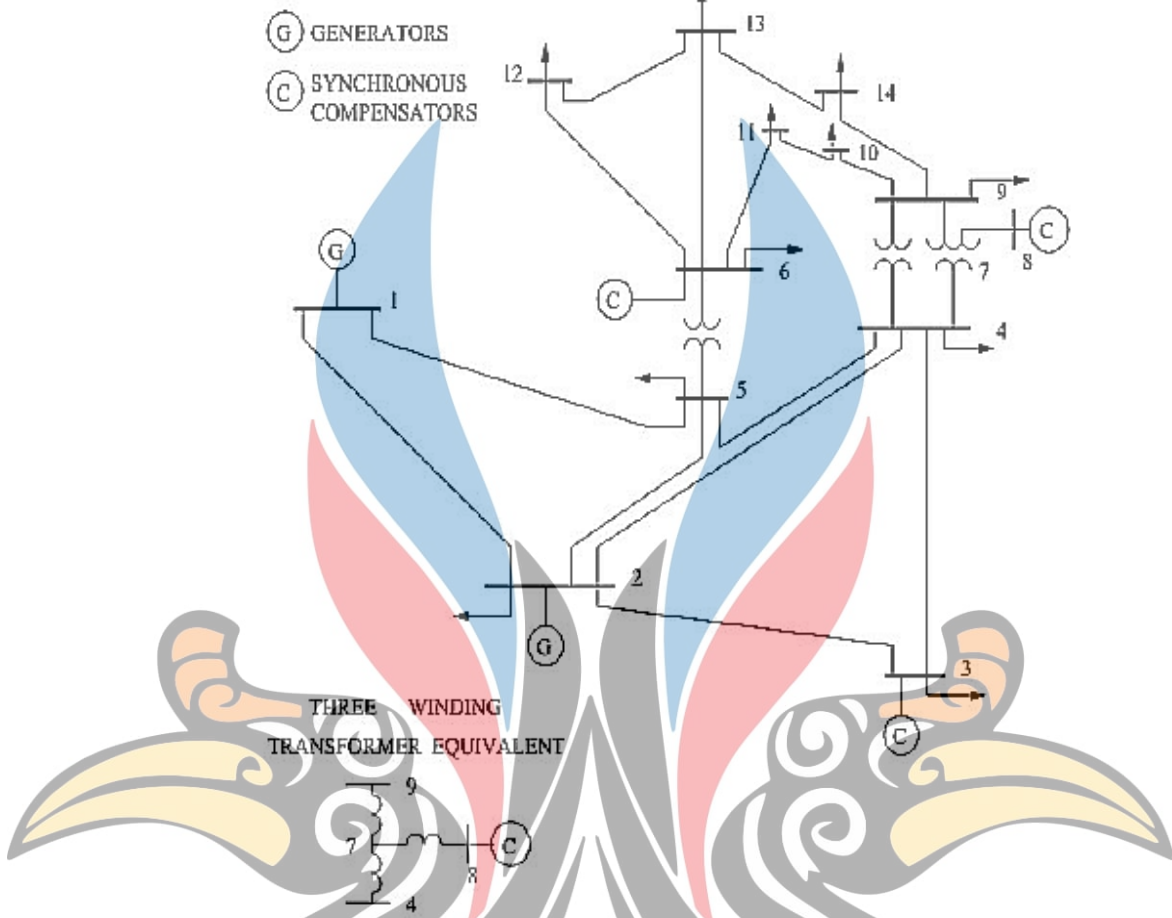




Gambar 2. 7 Klasifikasi Beban Non Linier (Amalia, 2015)

## 2.10 Sistem Uji 14 Bus IEEE

Sistem tenaga listrik 14 bus IEEE adalah sebuah sistem yang digunakan untuk melakukan percobaan terhadap suatu metode. Pada sistem ini, bus-1 dan bus-2 adalah bus generator. *Synchronous compensators* terhubung dengan bus-3 dan bus-8. Sementara itu, beban terhubung ke semua bus kecuali pada bus-1, 7 dan 8. Terdapat empat buah transformator yang terhubung dengan sistem yang terdiri dari sebuah trafo tiga-belitan dan trafo dua-belitan (Patel et al., 2017)



Gambar 2. 8 Sistem Tenaga Listrik IEEE 14-Bus (Patel et al., 2017)

Tabel 2. 2 Data Bus

Nomor Bus	Tegangan Base (kV)	$V_0$ (pu)	$\theta_0$ (rad)
1	69	1	0
2	69	1	0
3	69	1	0
4	69	1	0
5	69	1	0
6	13,8	1	0
7	13,8	1	0
8	18	1	0
9	13,8	1	0
10	13,8	1	0
11	13,8	1	0
12	138	1	0
13	13,8	1	0
14	13,8	1	0

Tabel 2. 3 Data Transformator

Dari Bus	Ke Bus	Rating Daya (MVA)	Rating Tegangan (kV)	Rating Frekuensi (Hz)	Rasio Tegangan (kV/kV)	R (pu)	X (pu)	Rasio Tap Tetap (pu/pu)
5	6	100	69	60	5	0	0,25202	0,932
4	9	100	69	60	5	0	0,55618	0,969
4	7	100	69	60	5	0	0,29012	0,978
8	7	100	18	60	1,304348	0	0,17615	0

Tabel 2. 4 Data Generator

Nomor Bus	Rating Daya (MVA)	Rating Tegangan (kV)	Daya Aktif (pu)	Vo (pu)	Qmax (pu)	Qmin (pu)	Vmax (pu)	Vmin (pu)
2	100	69	0,4	1,045	0,5	-0,4	1,0451	0,8
6	100	13,8	0	1,07	0,24	-0,06	1,0701	0,6
3	100	69	0	1,01	0,4	0	1,0101	0,6
8	100	18	0	1,09	0,2517	-0,06	1,0901	0,6

Tabel 2. 5 Data Beban

Nomor Bus	Rating Daya (MVA)	Rating Tegangan (kv)	Daya Aktif (pu)	Daya Reaktif (pu)	Vmax (pu)	Vmin (pu)
11	100	13,8	0,035	0,018	1,2	0,6
13	100	13,8	0,135	0,058	1,2	0,6
3	100	69	0,942	0,19	1,5	0,8
5	100	69	0,076	0,016	1,2	0,6
2	100	69	0,217	0,127	1,2	0,8
6	100	13,8	0,112	0,075	1,5	0,6
4	100	69	0,478	0,04	1,2	0,6
14	100	13,8	0,149	0,05	1,2	0,5
12	100	13,8	0,061	0,016	1,2	0,6
10	100	13,8	0,09	0,058	1,2	0,6
9	100	13,8	0,295	0,166	1,2	0,6

Tabel 2. 6 Data Saluran

From Bus	To Bus	Power Rating (MVA)	Voltage Rating (kV)	Frequency Rating (Hz)	R (Pu)	X (Pu)	B(Pu)
2	5	100	69	60	0,05695	0,17388	0,03400
6	12	100	13,8	60	0,12291	0,25581	0,00000
12	13	100	13,8	60	0,22092	0,19988	0,00000

Tabel 2.6 Data Saluran (lanjutan)

From Bus	To Bus	Power Rating (MVA)	Voltage Rating (kV)	Frequency Rating (Hz)	R (Pu)	X (Pu)	B(Pu)
6	13	100	13,8	60	0,06615	0,13027	0,00000
6	11	100	13,8	60	0,09498	0,19890	0,00000
11	10	100	13,8	60	0,08205	0,19207	0,00000
9	10	100	13,8	60	0,03181	0,08450	0,00000
9	14	100	13,8	60	0,12711	0,27038	0,00000
14	13	100	13,8	60	0,17093	0,34802	0,00000
7	9	100	13,8	60	0,0000	0,11001	0,00000
1	2	100	69	60	0,01938	0,05917	0,05280
3	2	100	69	60	0,04699	0,19757	0,04380
3	4	100	69	60	0,06701	0,17103	0,03460
1	5	100	69	60	0,05403	0,22304	0,04920
5	4	100	69	60	0,01335	0,04211	0,01280
2	4	100	69	60	0,05811	0,17632	0,03740
5	6	100	69	60	0,0000	0,25202	0,00000
4	9	100	69	60	0,0000	0,55618	0,00000
4	7	100	69	60	0,0000	0,20912	0,00000
8	7	100	18	60	0,0000	0,17615	0,00000

### 2.11 Algoritma GWO

GWO merupakan metode optimasi metaheuristik yang terinspirasi dari serigala *grey wolf*. *Grey wolf (Canis Lupus)* merupakan predator puncak pada rantai makanan. Umumnya *grey wolf* hidup secara berkelompok dimana rata-rata terdiri dari 5 hingga 12 individu di setiap kelompoknya. Sekelompok *grey wolf* memiliki hierarki sosial yang menunjukkan peran dan pengaruhnya terhadap kelompok ketika dalam perburuan mangsa. Berdasarkan dari yang teratas maka tingkatannya ialah alpha, beta, delta, dan omega. Pada metode GWO alpha ( $\alpha$ ) merupakan solusi terbaik. Sementara itu, solusi terbaik kedua dan ketiga ialah beta ( $\beta$ ) dan delta ( $\delta$ ) (Mirjalili et al., 2014).



Gambar 2. 9 Hierarki Sosial Grey Wolf (Mirjalili et al., 2014)

Saat sedang melakukan perburuan mangsa, *grey wolf* memiliki beberapa langkah yaitu pengepungan (*encircling*), perburuan (*hunting*) dan penyerangan mangsa (*attacking prey*). Secara matematis proses pengepungan dapat dituliskan dalam persamaan (2.24) sebagai berikut:

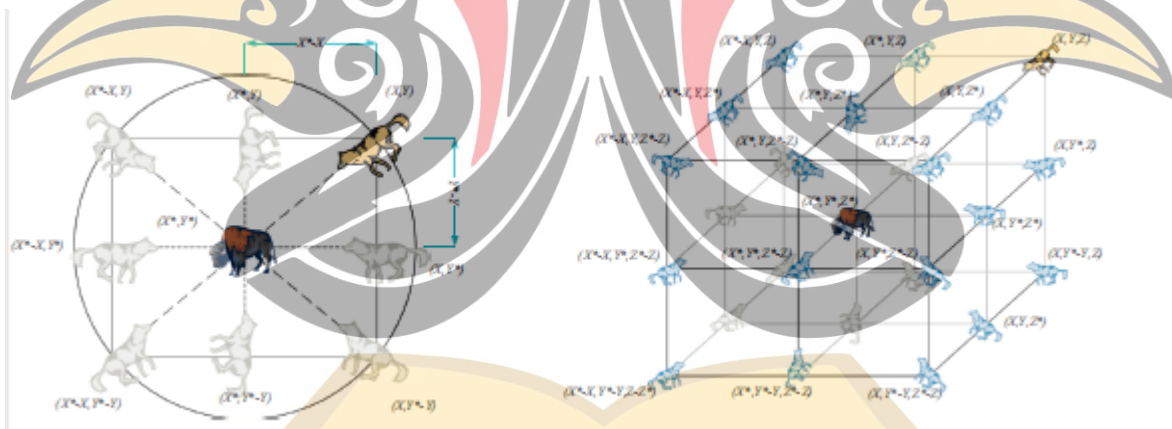
$$\vec{D} = |\vec{C} \times \vec{X}_p(t) - \vec{X}_t(t)| \tag{2.24}$$

$$\vec{X}(t+1) = |\vec{X}_p(t) - \vec{A} \times \vec{D}| \tag{2.25}$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \times \vec{r}_1 - \vec{a} \tag{2.26}$$

$$\vec{C} = 2 \times \vec{r}_2 \tag{2.27}$$

Dengan  $t$  menunjukkan iterasi,  $\vec{A}$  dan  $\vec{C}$  adalah vektor koefisien,  $\vec{X}_p$  adalah vektor posisi dari mangsa, dan  $\vec{X}$  adalah vektor posisi dari *grey wolf*. Komponen  $\vec{a}$  nilainya menurun secara linier dari 2 hingga 0 seiring bertambahnya iterasi. Sedangkan  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$  adalah vektor acak  $[0, 1]$  (Mirjalili et al., 2014).



**Gambar 2. 10** Visualisasi 2D dan 3D Vektor Posisi dan Kemungkinan Posisi Selanjutnya (Mirjalili et al., 2014)

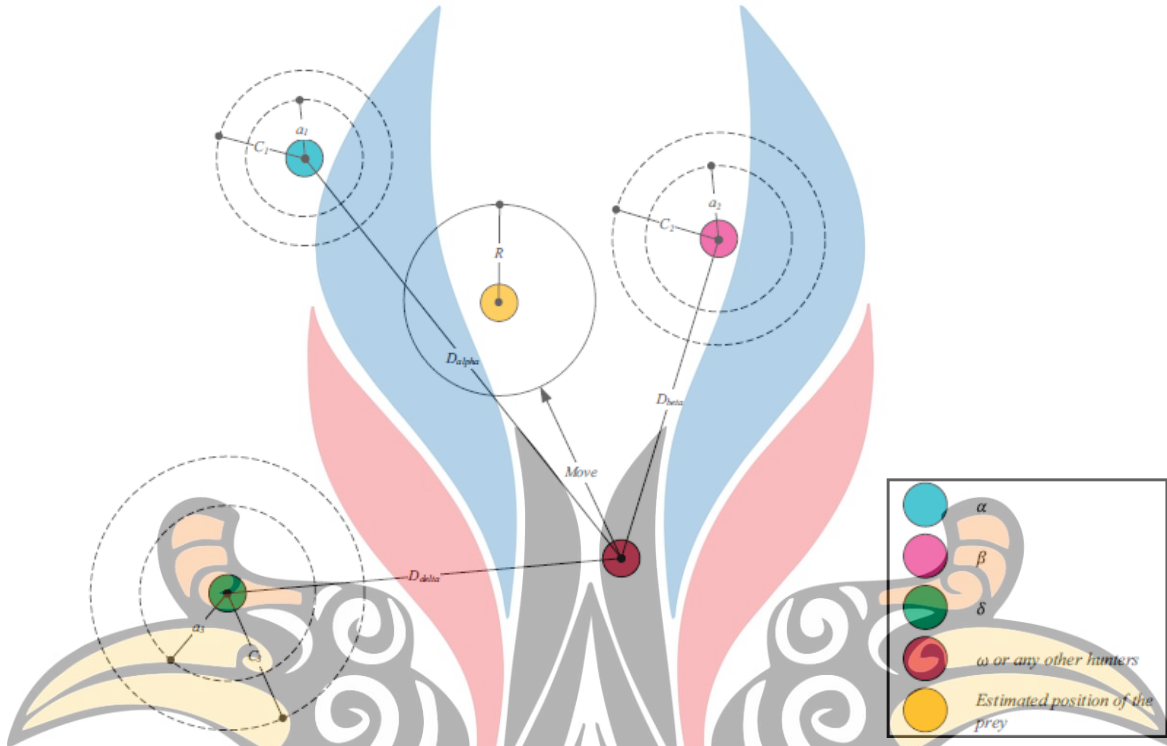
Lokasi perburuan ditentukan oleh posisi dari alpha, beta dan delta karena ketiga golongan inilah yang dianggap memiliki kemampuan dan pengetahuan terkait posisi mangsa. Maka untuk memperbarui posisi digunakan persamaan (2.30) sebagai berikut:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \times \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \times \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \times \vec{X}_\delta - \vec{X}| \tag{2.28}$$



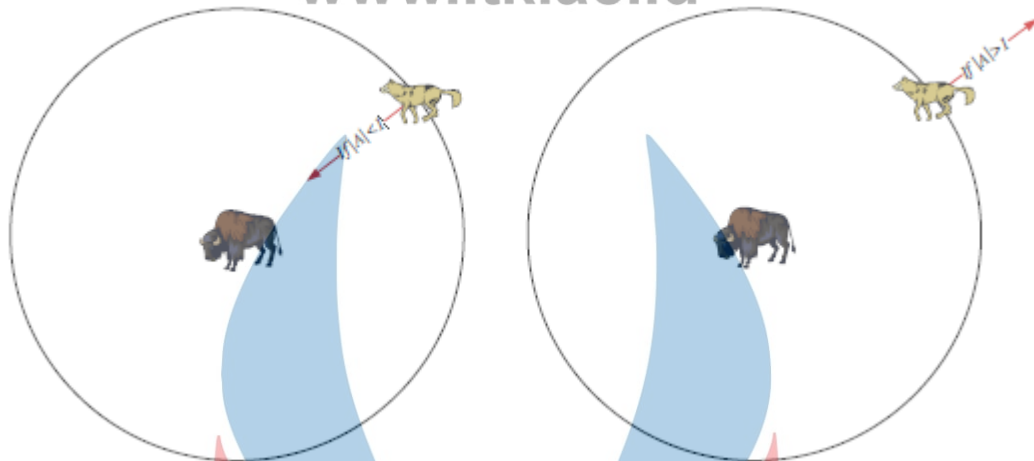
$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \times (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \times (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \times (\vec{D}_\delta) \quad (2.29)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (2.30)$$



**Gambar 2. 11** Proses Memperbarui Posisi GWO (Mirjalili et al., 2014)

*Grey wolf* berhenti melakukan perburuan dengan menyerang mangsanya ketika mangsanya sudah tidak bergerak. Secara matematis pendekatan terhadap mangsa memiliki nilai yang menurun yaitu  $\vec{a}$ . Perubahan nilai  $\vec{A}$  juga dipengaruhi oleh penurunan nilai  $\vec{a}$ . Dengan kata lain,  $\vec{A}$  adalah nilai interval anatar  $[-2a, 2a]$  dimana  $a$  mengalami penurunan nilai dari 2 menuju 0. Ketika nilai acak  $\vec{A}$  pada interval  $[-1,1]$ , maka posisi grey wolf selanjutnya ialah antara posisinya saat itu dan posisi mangsa. Gambar 2.10 menunjukkan saat nilai  $|A| < 1$  akan membuat grey wolf menyerang mangsanya (Mirjalili et al., 2014).



**Gambar 2. 12** Perbandingan Kondisi Menyerang atau Mencari Mangsa (Mirjalili et al., 2014)

## 2.12 Penelitian Sebelumnya

Berikut Tabel 2.7 adalah hasil rangkuman dari penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan.

**Tabel 2. 7** Penelitian Sebelumnya Terkait SAPF

Peneliti	Judul	Metode	Hasil
Thajeel et al., 2015	<i>Performance analysis of active power filter for harmonic compensation using PI-PSO</i>	Menggunakan metode PI-PSO dan teori d-q	Penelitian ini menggunakan sistem uji coba yaitu sistem 3 fasa seimbang dengan bebabn non linier yaitu <i>non controller bridge rectifier</i> dan orde harmonisa yang dihasilkan ialah harmonisa orde 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, dan 25. Penggunaan metode PSO memberikan kompensasi harmonisa yang lebih baik dan lebih dinamis dibandingkan metode konvensional. Saat arus beban 10,5 A, THD ketika menggunakan pengendalian PI-PSO adalah 3,6%, sedangkan ketika menggunakan kontroler PI konvensional sebesar 4,15%.

Tabel 2.7 Penelitian Sebelumnya Terkait SAPF

Peneliti	Judul	Metode	Hasil
Srivastava et al., 2018	<i>A whale optimization algorithm based shunt active power filter for power quality improvement</i>	Menggunakan algoritma optimas WOA	Harmonisa yang diatasi adalah harmonisa orde 5, 7, 11, 13, 17, dan 19. Pengendali PI yang ditala dengan algoritma optimasi WOA bukan hanya memiliki kemampuan pengaturan <i>overshoot</i> yang baik, namun juga mampu mengkompensasi harmonisa secara lebih efektif. THD ketika menggunakan pengendalian PI-WOA adalah 3,07%, sedangkan ketika menggunakan kontroler PI konvensional sebesar 4,61%.
Imam et al., 2020	<i>Modeling and simulation of a PI controlled Shunt Active Power Filter for power quality enhancement based on p-q theory</i>	Menggunakan metode control PI dengan berdasarkan teori daya (p-q) sesaat	Penelitian ini menggunakan beban non linier <i>universal diode bridge</i> 3 fasa. Harmonisa yang dikompensasi ialah harmonisa orde 3, 5, 7, 11, 13, 15, 17, dan 19. THD berhasil direduksi dari 30,88% menjadi 1,18% saat sistem seimbang dan 12,97% menjadi 1,13% saat sistem tak seimbang.

