

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Daya Listrik

Daya ialah sejumlah energi yang dipakai atau dipindahkan dalam satu periode waktu tertentu. Daya listrik juga dapat diartikan sebagai jumlah energi listrik yang digunakan dalam melakukan sebuah upaya dalam sistem tenaga listrik. Watt merupakan satuan dari daya listrik [9]. Daya listrik sendiri memiliki tiga macam yakni daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S).

2.1.1 Daya Aktif (P)

Daya aktif adalah daya rata-rata yang memiliki nilai sama dengan penggunaan sebenarnya yang ditransmisikan maupun dikonsumsi oleh suatu beban [10]. Daya aktif memiliki beberapa contoh yaitu energi panas, mekanik, dan cahaya. Watt (W) merupakan satuan dari daya aktif. Pada daya aktif memiliki beberapa persamaan seperti diuraikan dibawah :

Persamaan daya aktif untuk satu fasa

$$P = V.I.\cos\varphi \quad (2.1)$$

Persamaan daya aktif untuk tiga fasa

$$P = 3.VL.IL.\cos\varphi \quad (2.2)$$

Dimana :

P : daya aktif (watt)

V : tegangan (volt)

I : arus (ampere)

$\cos\varphi$: faktor daya

VL : tegangan jaringan (volt)

IL : arus jaringan (ampere)

2.1.2 Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif ialah sejumlah daya yang dipakai untuk menciptakan medan magnet. Medan magnet tersebut menciptakan fluks medan magnet. *Volt Ampere Reactive* (VAR) merupakan satuan dari daya reaktif. Pada daya reaktif memiliki beberapa persamaan seperti diuraikan dibawah :

Persamaan daya aktif untuk satu fasa

$$Q = V.I.\sin\varphi \quad (2.3)$$

Persamaan daya aktif untuk tiga fasa

$$Q = 3.VL.IL.\sin\varphi \quad (2.4)$$

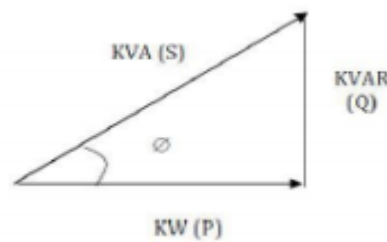
2.1.3 Daya Semu (S)

Daya semu ialah hasil perkalian antara tegangan dan arus dalam suatu sistem atau dapat diperoleh melalui penjumlahan daya aktif dan daya reaktif dengan metode trigonometri. Daya yang dihasilkan oleh daya semu bisa menjadi sumber *alternation current* (AC) atau diserap oleh beban. Satuan dari daya semu ialah *Volt Ampere* (VA). Persamaan dari daya semu seperti diuraikan dibawah :

$$S = V.I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.5)$$

2.2 Faktor Daya

Perbandingan antara daya aktif dengan daya semu disebut dengan faktor daya atau *power factor*(pf). Sudut phasa antara daya aktif dan daya semu dinyatakan sebagai faktor daya. Daya aktif sebagai pengoperasian beban kepada konsumen. Dari generator pembangkit menghasilkan daya semu yang ditransmisikan ke konsumen. Turunnya faktor daya listrik diakibatkan oleh daya reaktif yang bertambah.



Gambar 2.1 Segitiga Daya

Pada **Gambar 2.1** merupakan faktor daya yang menunjukkan hasil bagi antara daya nyata P (Watt) dan daya semu S (VA). Sehingga mendapatkan persamaan yang dapat dijabarkan menjadi :

$$Pf = \frac{P}{S} \quad (2.6)$$

$$Pf = \cos\varphi$$

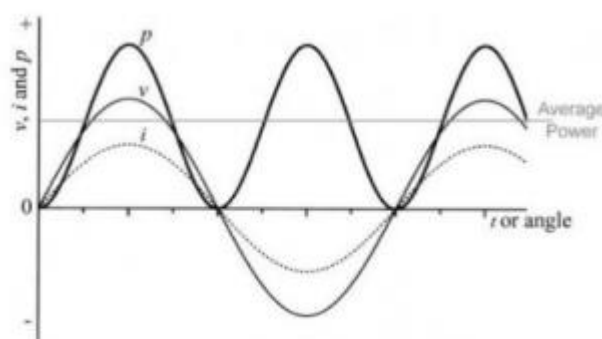
Sudut $\cos \varphi$ ialah sudut yang tersusun diantara resultan daya aktif dan daya semu. Di sisi lain, daya reaktif akan tegak lurus terhadap daya aktif. Ada tiga kategori jenis faktor daya dalam sistem tenaga listrik yaitu faktor daya unity, faktor daya terbelakang (*lagging*) dan faktor daya terdahulu (*leading*) [11].

2.3 Beban Listrik

Beban listrik merujuk pada semua perangkat atau sistem yang memerlukan energi listrik untuk beroperasi, dan juga beban listrik dapat dikatakan segala sesuatu yang beroperasi memerlukan energi listrik. Dalam konteks hukum Ohm, arus listrik yang mengalir melalui suatu penghantar sebanding dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan hambatan. Beban sendiri dapat ditentukan oleh impedansi [12]. Sehingga beban memiliki tiga macam secara teoritis yakni :

2.3.1 Beban Resistif

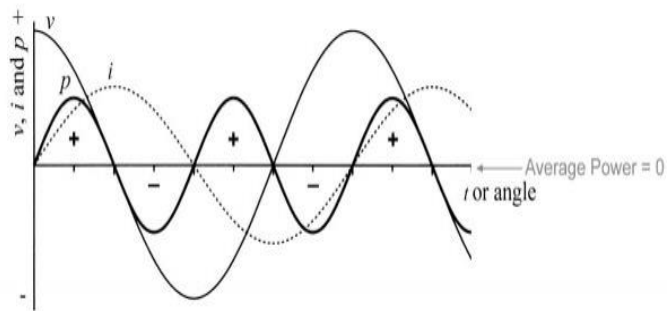
Beban resistif adalah tipe beban yang terbuat dari resistor murni atau komponen tahanan Ohm. Resistor ini tidak menyebabkan perubahan fase antara arus dan tegangan dalam rangkaian AC. Beban resistif akan mengonsumsi daya aktif yang membuat faktor daya menjadi 1.



Gambar 2.2 Gelombang Beban Resistif

2.3.2 Beban Induktif

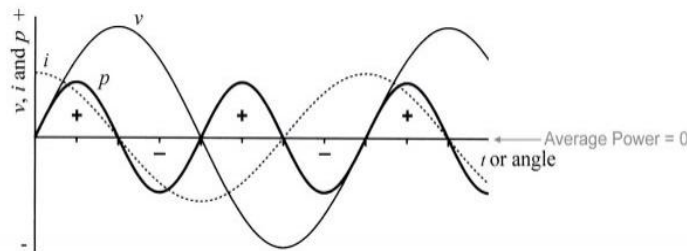
Beban induktif timbul dari kumparan kawat yang terdapat dalam banyak perangkat listrik seperti motor, trafo, dan relay. Kumparan ini diperlukan sebuah perangkat listrik untuk menghasilkan medan magnet. Beban induktif dapat menyerap baik daya aktif maupun daya reaktif. Dengan demikian, induktansi dapat menyerap daya reaktif yang mengakibatkan faktor daya turun kuran dari 1. Lilitan pada beban induktif akan memperlambat pergerakan arus dan menimbulkan pergeseran gelombang arus tertinggal dari tegangan atau disebut dengan *lagging*.



Gambar 2.3 Gelombang Beban Induktif

2.3.3 Beban Kapasitif

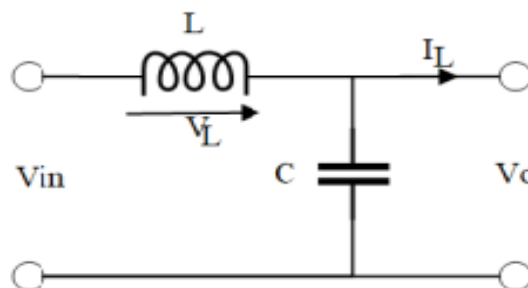
Beban kapasitif ini menyatakan suatu tipe beban yang memiliki kapasitansi yang signifikan yang membuat beban ini menyimpan energi dari pengisian elektrik (*electrical discharge*) dalam suatu sirkuit. Beban kapasitif memiliki faktor daya kurang dari 1 sebab kemampuannya untuk menyediakan daya reaktif. Beban ini menyebabkan arus mendahului tegangan atau yang disebut *leading* dan daya aktif dapat diserap oleh beban kapasitif dan menghasilkan daya reaktif.



Gambar 2.4 Gelombang Beban Kapasitif

2.4 Filter Pasif LC

Filter Pasif LC memuat komponen pasif yaitu, Induktor dan Kapasitor yang disusun secara paralel. Saat merancang filter LC, langkah awalnya adalah menentukan besar nilai kapasitor sesuai dengan kebutuhan faktor daya dan induktor filter [13].



Gambar 2.5 Rangkaian Filter Pasif LC

Dalam mendesain filter LC terlebih dulu menentukan parameter dari komponen filter dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- a. Menghitung daya reaktif kapasitor Q_c untuk memperbaiki factor daya dengan asumsi factor dayanya sebesar 0,98 sehingga digunakan sebuah persamaan sebagai berikut :

$$Q_c = P \left((\tan(\cos^{-1}\theta_{awal})) - (\tan(\cos^{-1}\theta_{akhir})) \right) \quad (2.7)$$

- b. Memakai tuning filter dengan nilai sebesar 5%
- c. Menentukan reaktansi pada kapasitor X_c dengan persamaan :

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c} \quad (2.8)$$

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_c} \quad (2.9)$$

- d. Menentukan nilai induktif dengan persamaan :

$$X_L = \frac{X_c^2}{n} \quad (2.10)$$

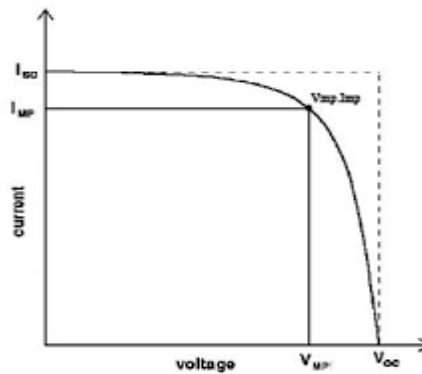
$$L = \frac{X_L}{2 \times \pi \times f} \quad (2.11)$$

2.5 Panel Surya

Suatu perangkat sistem yang mengonversikan energi elektromagnetik yang memanfaatkan energi matahari sebagai sumber mendasar untuk menghasilkan listrik disebut panel surya. Sistem PLTS secara umum diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu PLTS *off-grid* dan *on-grid*. PLTS *off-grid* ialah sistem yang menghasilkan listrik tenaga surya yang hanya menggunakan panel surya sebagai sumber energi dan tidak terkoneksi dengan jaringan. Di sisi lain, PLTS *on-grid* ialah sistem yang menghasilkan listrik tenaga surya yang terkoneksi dengan jaringan listrik [14]. Sistem PLTS adalah satu kesatuan sistem yang terdiri dari berbagai komponen yang dirancang untuk menghasilkan energi listrik, menggunakan panel surya sesuai dengan kebutuhan yang telah direncanakan. Proses ini terjadi saat cahaya matahari, yang mengandung foton diserap oleh panel surya yang berisi sel surya yang tersusun dalam suatu rangkaian. Selanjutnya, energi dari foton diubah menjadi energi listrik dengan memakai prinsip *photovoltaic*. Jumlah energi listrik yang diperoleh dari sel surya ini bervariasi tergantung pada seberapa banyak radiasi matahari yang diterima. Sel surya

menghasilkan tegangan secara konstan, bernilai ± 0.5 volt – 600 mV dengan arus 2 A, pada iridiasi sebesar 1000 W/m² [15].

Pada saat operasi normal, kondisi kerja dari sel surya dapat diilustrasikan dalam grafik I-V curve. Pada grafik ini, yang dimana V_{oc} mewakili tegangan maksimum yang dapat dicapai ketika tidak ada arus yang mengalir, atau dalam sirkuit terbuka. Sementara itu, I_{sc} mengindikasikan kapasitas arus maksimum yang dapat mengalir ketika tidak ada tegangan, atau dalam kondisi sirkuit pendek. V_{mp} dan I_{mp} merujuk pada tegangan dan arus maksimum saat sel surya beroperasi pada titik optimalnya. Maka dari itu, diperlukan suatu teknik pelacakan yang dinamakan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk mendapatkan nilai-nilai ini.



Gambar 2.6 Kurva I-V pada Panel Surya [16]

Keterangan :

- V_{mp} : *Voltage maximum power* (V)
- I_{mp} : *Current maximum power* (A)
- P_{mp} : *Power maximum output* (Watt)
- V_{oc} : *Open-circuit voltage* (V)
- I_{sc} : *Short-circuit current* (A)

Panel surya memiliki opsi untuk disambungkan baik secara seri maupun paralel sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan. Panel surya yang disusun secara seri menghasilkan nilai tegangan yang sesuai dengan total tegangan dari seluruh panel surya, sementara arus tetap. Dalam disusun secara paralel maka menghasilkan tegangan tetap dan arus dihasilkan sejumlah dengan jumlah panel yang dipakai.

2.6 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT merupakan suatu teknik yang dipakai untuk melacak titik daya maksimum atau *Maximum Power Point* (MPP) pada panel surya. Dalam sistem

MPPT, data tegangan dan arus diambil secara berulang untuk mencari nilai keluaran daya yang optimal berdasarkan kondisi lingkungan. Salah satu metode yang umum digunakan adalah *perturb and observe* (P&O), metode ini akan mengatur sistem dengan mengendalikan duty ratio dari konverter dc/dc. Pada dasarnya, dalam metode ini, perubahan daya (dP) dari modul pv. Ketika ini dieksekusi, tegangan modul PV diperiksa untuk menyesuaikan siklus tugas duty untuk pembaruan dan koreksi eventual. Dengan memantau tegangan dan daya yang diperoleh oleh panel surya, sistem akan mengamati perubahan. Jika daya dan tegangan meningkat, rasio tugas akan disesuaikan ke arah yang sama. Sebaliknya, jika tidak terjadi peningkatan, rasio tugas akan diubah ke arah yang berlawanan [17].

2.7 Baterai

Suatu proses elektrokimia yang mengubah energi listrik menjadi energi kimia ketika diisi (*charge*) dan mengubah energi kimia menjadi energi listrik ketika dikosongkan atau (*discharge*) dinamakan dengan baterai. Kapasitas dari sebuah baterai (C) dinyatakan dalam *Ampere Hour* (Ah), dimana tegangan nominal atau tegangan kerja biasanya telah ditentukan oleh pabrikan. Memperhatikan proses pengisian dan pengosongan baterai dengan cermat sangat penting karena dapat mempengaruhi masa pakai baterai secara signifikan. Dengan demikian, pengawasan terhadap baterai dalam kedua proses tersebut menjadi hal yang perlu diperhatikan secara khusus. Status pengisian daya merupakan indikator utama pada baterai adalah status pengisian daya, yang disebut dengan SOC (*State of Charge*). SOC mengutarakan seluruh nilai kapasitas energi yang diperoleh saat dipakai pada baterai dengan keseluruhan jumlah kapasitas baterai [18]. Ketika mendeskripsikan energi yang tersedia, SOC diinterpretasikan selaku persentase sisa kapasitas baterai. Untuk mendapatkan nilai SOC dapat menggunakan metode *coulomb counting* dengan persamaan, yaitu :

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t I dt \quad (2.12)$$

Dimana :

SOC (to) : SOC awal sebelum terjadinya proses *charge/discharge*

C_n : Kapasitas maksimum baterai

I : Arus *charge/discharge* baterai

2.8 Konverter DC-DC

DC to DC converter adalah alat yang dapat mengonversi tegangan DC masukan menjadi keluaran DC yang lebih tinggi atau lebih rendah sesuai dengan kebutuhan. Untuk mengubah tegangan DC tetap menjadi sumber tegangan DC yang bersifat variabel, dibutuhkan penggunaan konverter DC-DC, juga dikenal sebagai *DC Chopper*. Konverter DC-DC bekerja dalam beberapa cara yaitu dengan menaikkan tegangan disebut *boost converter*, menurunkan tegangan disebut *buck converter*, dan menaikkan sekaligus menurunkan tegangan disebut *buck-boost converter*. *Converter bidirectional* merupakan suatu converter yang melewati aliran energi dua arah secara bolak-balik [19].

2.8.1 Boost Converter

Boost converter adalah konverter yang dapat menggunakan sinyal kontrol Pulse Width Modulation (PWM) untuk memberikan keluaran tegangan DC yang lebih tinggi dari tegangan masukannya. Parameter yang diperlukan untuk perancangan boost converter termasuk tegangan input (V_{in}), daya output (P_o), tegangan output (V_o), frekuensi switching (f), riak tegangan induktor (ΔV_C) dan riak arus induktor (ΔI_L) [20]. Persamaan *boost converter* sebagai berikut :

Duty cycle :

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.13)$$

Induktor dan Kapasitor pada rangkaian *boost converter* berguna agar bekerja secara kontinu. Berikut persamaannya :

$$L = \frac{V_{in}(V_{out}-V_{in})}{f_s \cdot \Delta I_L \cdot V_{out}} \quad (2.14)$$

$$C = \frac{I_{out} \cdot D}{\Delta V_{out} \cdot f_s} \quad (2.15)$$

2.8.2 Buck-Boost Converter

Nilai tegangan DC dapat diubah ke arah nilai tegangan yang lebih rendah atau ke arah nilai tegangan yang lebih rendah melalui pengubah *buck-boost converter* [21]. Pada mode buck bekerja sebagai menurunkan tegangan masukan yang disebut *bidirectional converter*. Persamaan *buck converter* sebagai berikut :

Duty cycle

$$V_{out} = D \cdot V_{in} \quad (2.16)$$

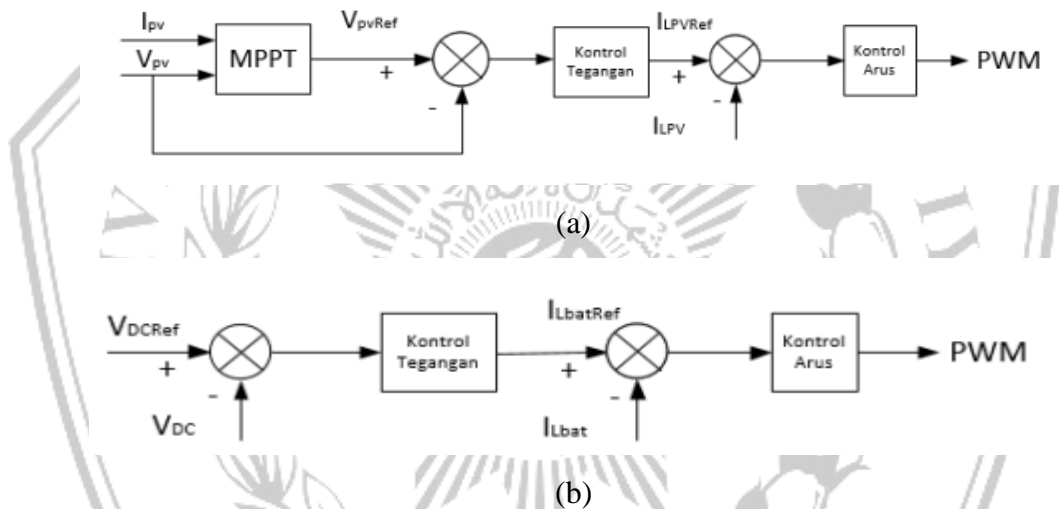
Induktor dan Kapasitor pada rangkain *buck converter*. Berikut persamaannya sebagai berikut :

$$L = \frac{V_{in} \cdot D(1-D)}{f_s \cdot \Delta I_L} \quad (2.17)$$

$$C = \frac{V_{in} \cdot D(1-D)}{8 \cdot L \cdot f_s^2 \cdot \Delta V_{out}} \quad (2.18)$$

2.9 Kontrol Konverter DC-DC

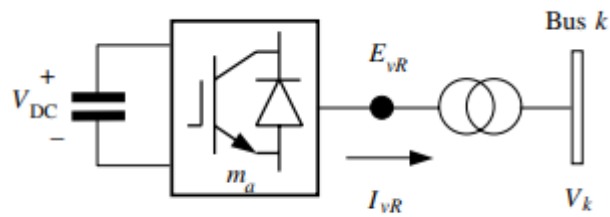
Pada kontrol converter ini digunakan 2 kontrol yaitu kontrol *boost converter* sebagai kontrol pada PV dan kontrol *buck-boost converter* sebagai kontrol pada baterai. Kedua kontrol ini menggunakan metode PI kontrol bertingkat [20], yang melibatkan kontrol tegangan dan arus. Hasil dari kontrol ini memberikan nilai *duty ration* yang digunakan sebagai input PWM seperti pada Gambar



Gambar 2.7 (a) Kontrol PV (b) Kontrol Baterai

2.10 Static Synchronous Compensator (STATCOM)

STATCOM merupakan sebuah perangkat kompensasi daya reaktif yang terhubung secara paralel (*shunt-connected*) yang dapat menghasilkan atau menyerap daya reaktif dan memiliki keluaran yang bervariasi yang digunakan untuk mengendalikan parameter khusus dari sistem tenaga listrik. Penempatan STATCOM ditempatkan secara paralel dengan kapasitor yang dihubungkan pada sisi DC dari VSC yang bekerja sebagai sumber tegangan [2].

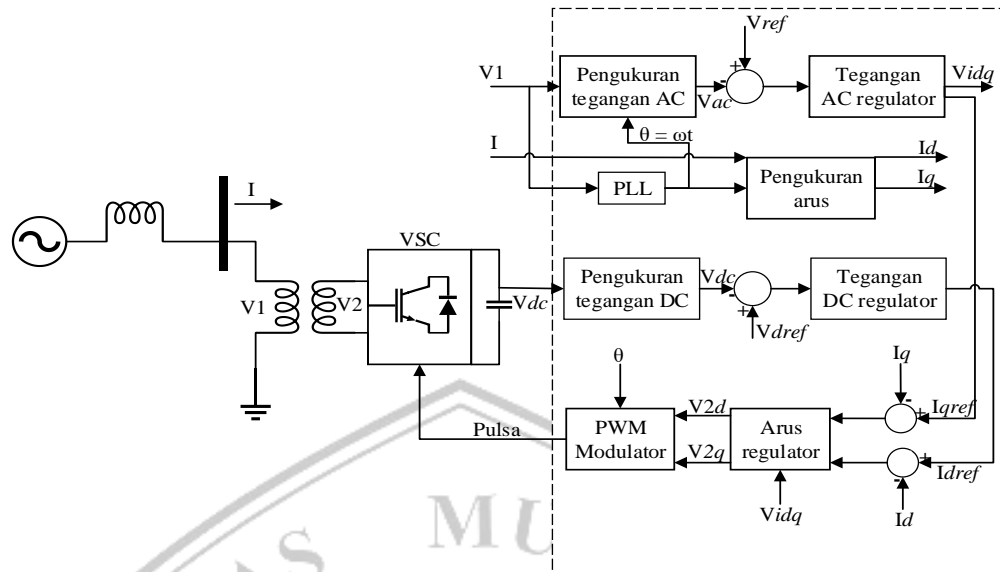


Gambar 2.8 STATCOM terhubung secara paralel [2]

2.10.1 Sistem Kontrol STATCOM

Dalam sistem kontrol pada STATCOM menggunakan sebuah sistem *phase-locked loop* (PLL) yang berfungsi untuk menyinkronkan sebuah komponen dari tegangan primer tiga fasa (V_1). Hasil keluaran yang didapat adalah $\theta = \omega t$, yang digunakan untuk menghitung sebuah komponen pada tegangan dan arus AC tiga fasa (V_d, V_q , atau I_q). Penggunaan komponen d dan q yang digunakan untuk mengukur tegangan positif AC, dengan arus yang dikontrol, dan tegangan V_{dc} . Pada loop terluar terdapat tegangan AC regulator dan juga tegangan DC regulator. Tegangan AC regulator menghasilkan keluaran I_{qref} untuk arus referensi pada regulator arus, dan I_q merupakan arus yang memiliki fase kuadratur dengan tegangan yang mengatur aliran daya reaktif.

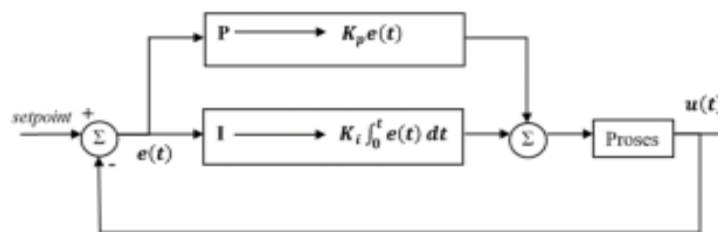
Dalam regulator tegangan DC terdapat keluaran I_{dref} , yang dimana I_d merupakan arus sefasa dengan tegangan yang mengontrol aliran daya aktif. Pada loop dalam memiliki regulator arus yang mengontrol sebuah besaran dan fasa tegangan dari hasil PWM (V_{2d} dan V_{2q}) dari arus I_{dref} dan I_{qref} oleh tegangan AC dan DC regulator. Regulator arus ini juga didukung oleh regulator *feed-forward* dengan memprediksi tegangan keluaran dari V_2 (V_{2d} dan V_{2q}) dari pengukuran V_1 (V_{1d} dan V_{1q}) dan dapat memperhitungkan reaktansi kebocoran transformator [22].



Gambar 2.9 Kontrol STACOM [22]

2.11 Kontrol PI

Kontrol PI ialah kombinasi antara kontrol *Proportional* (P) dan *Integral* (I), dengan dua pengontrol yang memiliki karakteristik berbeda. Keluaran respon yang diperoleh dari kontrol PI sama dengan *setting point* karena memiliki *zero offset*. Secara umum kontroler PI beroperasi berlandaskan perubahan *step* pada pengukuran, maka akan menimbulkan pengontrol memberikan merespon secara proporsional dengan diikuti oleh respon dari integral [23].



Gambar 2.10 Blok Diagram *Feedback* Sistem Pengendali PI

Biasanya, perancangan kontrol PI melibatkan metode *trial and error*. Metode ini melibatkan eksperimen dengan mengubah parameter *Proportional* dan *Integral* hingga menemukan kombinasi terbaik yang memberikan respons sistem yang diinginkan. Salah satu pendekatan lain dalam menentukan nilai parameter kontrol PI adalah menggunakan metode *Ziegler-Nichols*.

Dengan *transfer function* dari PI kontrol seperti yang dijabarkan dalam persamaan berikut :

$$K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (2.19)$$

Keterangan :

K_p : *Propotional Gain*

K_i : *Integral Gain*

s : *Fungsi Laplace*

