

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penghematan energi listrik merupakan salah satu upaya yang perlu dilakukan oleh industri-industri untuk menekan biaya produksi. Besar biaya yang dikeluarkan oleh industri untuk membayar penggunaan energi listrik, khususnya industri yang mengkonsumsi energi listrik dari PLN, ditentukan oleh besar daya aktif dan daya reaktif yang diserap oleh beban, serta kontrak daya kVA. Tarif dasar listrik untuk konsumen industri ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 1.1 Tarif Dasar Listrik Untuk Kperluan Industri

GOLONGAN TARIF	BATAS DAYA	BIAYA BEBAN (Rp./kVA/bulan)	BIAYA PEMAKAIAN (Rp./kWh)		
I-1/TR	s.d. 450 VA	26.000	Blok I :	0 s.d. 30 kWh	160
			Blok II :	di atas 30 kWh	395
I-1/TR	900 VA	31.500	Blok I :	0 s.d. 72 kWh	315
			Blok II :	di atas 72 kWh	405
I-1/TR	1.300 VA	31.800	Blok I :	0 s.d. 104 kWh	450
			Blok II :	di atas 104 kWh	460
I-1/TR	2.200 VA	32.000	Blok I :	0 s.d. 196 kWh	455
			Blok II :	di atas 196 kWh	460
I-1/TR	di atas 2.200 VA s.d. 14 kVA	32.200	Blok I :	0 s.d. 80 jam nyala	455
			Blok II :	di atas 80 jam nyala berikutnya	460
I-2/TR	di atas 14 kVA s.d. 200 kVA	32.500	Blok WBP = $K * 440$ Blok LWBP = 440		
I-3/TM	di atas 200 kVA	29.500	0 s.d. 350 jam nyala		
			Blok WBP = $K * 439$		
			di atas 350 jam nyala		
I-4/TT	30.000 kVA ke atas	27.000	Blok WBP = 439 Blok LWBP = 439		
			434		

Sumber: PT. PLN (Persero)

Seiring dengan bertambahnya beban listrik terpasang yang beroperasi maka daya aktif kW, daya reaktif kVAr, dan daya kompleks kVA juga ikut bertambah besar. Daya reaktif merupakan komponen yang harus diminimalkan karena dapat menaikkan nilai kVA dan memperbesar arus sehingga rugi-rugi daya I^2R (kW) juga akan bertambah seiring dengan bertambahnya arus.

PT. Cheil Jedang Indonesia merupakan salah satu industri yang berusaha menghemat biaya energi listrik. Dengan memperhatikan besar beban pada main feeder trafo 1 150/6,6kV (feeder 90 Project) yaitu 9,51 MW dan 4,35MVar pada sisi beban serta 9,632 MW dan 5,363 MVar pada sisi masukan trafo yang terhubung ke meter



PLN. Maka hal ini perlu diupayakan penekanan nilai daya reaktif yang akan memberikan keuntungan sebagai berikut yaitu: nilai total kVA yang digunakan turun, nilai arus mengecil sehingga rugi-rugi daya I^2R (kW) ikut mengecil, dan total sisa kVA trafo yang belum terpakai makin besar sehingga memungkinkan penambahan beban yang lebih besar.

Cara untuk meminimalkan daya reaktif adalah dengan meningkatkan nilai faktor daya dari nilai sebelumnya. Peningkatan nilai faktor daya dilakukan dengan memasang kompensator daya reaktif pada feeder tersebut. Kompensator daya reaktif yang digunakan adalah *Static VAR Compensator (SVC)* dengan tipe *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang dibahas dalam skripsi ini adalah:

1. Bagaimana dan seberapa besar pengaruh pemasangan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* terhadap penurunan daya reaktif kVAr.
2. Dapatkah *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* mempertahankan faktor daya pada sistem.
3. Bagaimana pengaruh pemasangan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* terhadap biaya energi listrik yang harus dibayar oleh PT. Cheil Jedang Indonesia kepada PLN.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji dalam skripsi ini adalah seberapa besar pengaruh pemasangan kompensator *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* terhadap penghematan penggunaan energi listrik di PT. Cheil Jedang Indonesia dengan pembatasan sebagai berikut:

1. Pemodelan instalasi listrik pada main feeder trafo 1 (feeder 90 Project) dan pemasangan kompensator disimulasikan pada *software Simulink Mathlab*.
2. Dilakukan analisis daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya pada sistem yang disimulasikan akibat pemasangan kompensator *FC-TCR*.
3. Respon *Thyristor Controlled Reactor (TCR)* diperoleh dengan menggunakan kontrol *Proportional Integral (PI)*.

1.4 Tujuan

Skripsi ini bertujuan untuk menganalisis peningkatan faktor daya menggunakan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* yang dikendalikan oleh kontrol *Proportional Integral (PI)* pada suatu sistem agar diperoleh ketepatan dan

kecepatan dalam memberikan kompensasi daya reaktif untuk menghemat biaya energi listrik.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dapat memberikan pemahaman kepada insan akademis teknik elektro mengenai cara peningkatan faktor daya dengan menggunakan *Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*.
2. Hasil penelitian ini juga akan memberikan manfaat kepada PT. Cheil Jedang Indonesia sehingga dapat dijadikan rujukan mengenai teknik peningkatan faktor daya yang dapat meningkatkan efisiensi dan penghematan biaya produksi.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dan penyusunan skripsi ini sebagai berikut:

Bab I: Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang permasalahan, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan, dan sistematika pembahasan.

Bab II: Landasan Teori

Bab ini menjelaskan teori-teori yang mendasari pengerjaan skripsi ini.

Bab III: Metodologi Penelitian

Membahas tentang metode yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini.

Bab IV: Analisis Hasil Penelitian dan Pembahasan

Bab ini membahas mengenai hasil simulasi dan evaluasi terhadap penggunaan kompensator *fixed capacitor-thyristor controlled reactor (FC-TCR)*.

Bab V: Kesimpulan dan Saran

Berisi kesimpulan dari seluruh analisis masalah di skripsi serta saran-saran yang dapat bermanfaat dalam proses pengembangan dan penyempurnaan.

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Faktor Daya

2.1.1. Konsep Dasar Faktor Daya

2.1.1.1. Pengertian Daya Secara Umum

Daya listrik fasa tunggal didefinisikan sebagai perubahan energi terhadap waktu dalam bentuk tegangan dan arus. Satuan daya listrik adalah *voltampere*. Daya yang diserap oleh beban adalah drop tegangan (*volt*) pada beban tersebut dikalikan dengan arus (*ampere*) yang mengalir melalui beban tersebut. Jika arus dan tegangan dinyatakan dengan (Stevensen, Jr.,1983):

$$v_{an} = V_{maks} \cos \omega t \quad (2-1)$$

$$i_{an} = I_{maks} \cos (\omega t - \theta) \quad (2-2)$$

Sehingga diperoleh daya sesaat adalah:

$$S = v_{an} i_{an} = V_{maks} I_{maks} \cos \omega t \cos (\omega t - \theta) \quad (2-3)$$

Sudut θ dalam persamaan di atas adalah positif untuk arus tertinggal (*lagging*) terhadap tegangan dan negatif untuk arus yang mendahului (*leading*) terhadap tegangan.

Persamaan (2-3) dengan menggunakan kesamaan trigonometri dapat diubah menjadi:

$$S = \frac{V_{maks} I_{maks}}{2} \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) + \frac{V_{maks} I_{maks}}{2} \sin \theta \sin 2\omega t \quad (2-4)$$

Dimana $\frac{V_{maks} I_{maks}}{2}$ dapat diganti dengan perkalian $|V_{an}| \cdot |I_{an}|$ dan $|V| \cdot |I|$

Pada persamaan (2-4) terlihat bagian pertama yang mengandung $\cos \theta$ akan selalu positif dan nilai rata-rata adalah:

$$P = \frac{V_{maks} I_{maks}}{2} \cos \theta \quad (2-5)$$

Atau dengan memasukkan nilai rms dari tegangan dan arus,

$$P = |V| \cdot |I| \cos \theta \quad (2-6)$$

P adalah daya rata-rata yang sering disebut daya aktif atau daya nyata. Satuan dari daya aktif adalah *watt*. Dalam sistem tenaga listrik P biasanya terukur dalam *kilowatt* atau *megawatt*.

Bagian kedua dari persamaan (2-4), dimana terdapat $\sin \theta$, selalu berubah-ubah dari positif ke negatif atau sebaliknya dan nilai rata-ratanya adalah nol. Komponen dari daya sesaat ini disebut daya reaktif (Q), dimana (Stevensen, Jr.,1983)

$$Q = \frac{V_{maks} I_{maks}}{2} \sin \theta \text{ atau} \\ Q = |V| \cdot |I| \sin \theta \quad (2-7)$$

Satuan dari daya reaktif adalah VAR (*voltampere reactive*) dan dalam sistem tenaga biasanya dalam $kVAR$ atau $MVAR$.

2.1.1.2. Daya Kompleks

Perhitungan daya aktif dan daya reaktif akan lebih mudah dalam bentuk kompleks jika fasor tegangan dan arusnya diketahui. Jika tegangan dan arus pada suatu beban dinyatakan dengan $V = |V| \angle \alpha$ dan $I = |I| \angle \beta$, hasil perkalian antara tegangan dan konjugat arus adalah (Stevensen, Jr.,1983):

$$VI^* = |V| \angle \alpha \times |I| \angle -\beta \\ = |V| \cdot |I| \angle \alpha - \beta \quad (2-8)$$

Kuantitas ini biasanya ditulis dengan S dan disebut daya kompleks. Dalam bentuk kompleks menjadi:

$$S = |V| \cdot |I| \cos(\alpha - \beta) + j|V| \cdot |I| \sin(\alpha - \beta) \quad (2-9)$$

Karena $\alpha - \beta$ merupakan sudut fasa antara tegangan dan arus, jadi sama dengan θ pada persamaan-persamaan sebelumnya, maka:

$$S = P + jQ \quad (2-10)$$

Daya reaktif Q positif jika sudut fasa $\alpha - \beta$ diantara tegangan dan arus positif yaitu $\alpha > \beta$, berarti arus lagging terhadap tegangan. Sebaliknya Q menjadi negative $\alpha < \beta$, berarti arus leading terhadap tegangan.

2.1.1.3. Daya Pada Rangkaian Tiga Fasa Seimbang

Total daya yang diberikan oleh sebuah generator tiga fasa atau yang diserap beban tiga fasa diperoleh dengan menjumlahkan daya pada ketiga fasanya. Pada suatu rangkaian yang seimbang, daya total adalah tiga kali daya satu fasa karena daya pada semua fasa sama. Besarnya tegangan ke netral V_p untuk beban yang terhubung Y adalah (Stevensen, Jr.,1983):

$$V_p = |V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}|$$

Dan jika besarnya arus fasa I_p untuk beban yang terhubung Y adalah

$$I_p = |I_{an}| = |I_{bn}| = |I_{cn}| \quad (2-11)$$

Maka daya tiga fasa total adalah

$$P = 3V_p I_p \cos \theta_p \quad (2-12)$$

Pada persamaan di atas θ_p adalah sudut antara arus fasa lagging terhadap tegangan fasa. Jika V_L dan I_L adalah besarnya tegangan antar saluran dan arus saluran maka

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \text{ dan } I_p = I_L \quad (2-13)$$

Dengan mensubstitusikan ke persamaan (2-12) diperoleh:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta_p \quad (2-14)$$

Total VARs adalah:

$$Q = \sqrt{3} V_L I_L \sin \theta_p \quad (2-15)$$

Sehingga Volt Ampere dari beban adalah

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} V_L I_L \quad (2-16)$$

Persamaan (2-12), (2-13), (2-14) berlaku juga untuk beban yang dihubungkan Δ . Dengan sedikit perbedaan jika beban dihubungkan secara Δ maka tegangan pada masing-masing impedansi adalah tegangan antar saluran dan arus yang mengalir lewat masing-masing impedansi sama dengan besarnya arus saluran dibagi $\sqrt{3}$ atau:

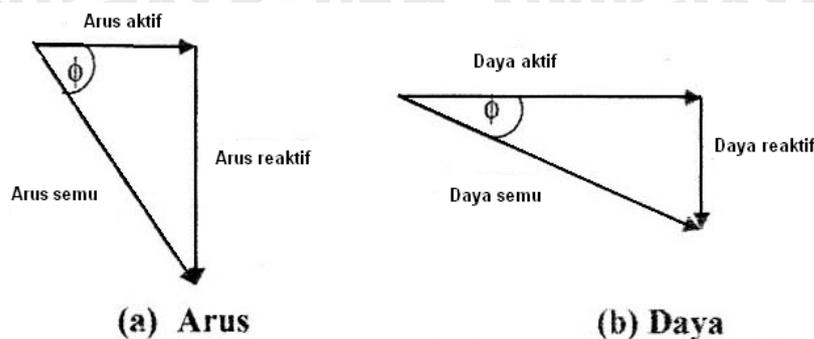
$$V_p = V_L \text{ dan } I_p = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (2-17)$$

2.1.2. Pengertian Faktor Daya

Sebagian besar peralatan memerlukan dua komponen arus. Kedua komponen arus tersebut adalah (Red Book, IEEE Std 1412-1986):

1. Arus yang menghasilkan daya kerja adalah arus yang dikonversikan oleh peralatan menjadi kerja, umum dalam bentuk panas, cahaya dan daya mekanik. Satuan daya kerja yang dihasilkan adalah *watt*.
2. Arus magnitasi adalah arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks untuk pengoperasian peralatan elektromagnetik. Tanpa arus magnetic, energi tidak mengalir melalui transformer atau menembus celah udara pada motor induksi. Daya reaktif yang dihasilkan dalam satuan *VAR*.

Fasor diagram kedua komponen tersebut dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Fasor Rangkaian Arus Bolak Balik

Sumber: Red Book, IEEE Std 141-1986

Gambar di atas memperlihatkan penjumlahan secara vektoris dari arus aktif dan arus reaktif yang menghasilkan arus semu, dinyatakan sebagai berikut (Red Book, IEEE Std 141-1986):

$$I_{total} = \sqrt{(I_{aktif})^2 + (I_{reaktif})^2} \tag{2-18}$$

$$I_{total} = \sqrt{(I \cos \phi)^2 + (I \sin \phi)^2} \tag{2-19}$$

Pada suatu tegangan, daya aktif, daya reaktif dan daya semu adalah sebanding dengan arus dan dinyatakan sebagai berikut (Red Book, IEEE Std 141-1986):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{2-20}$$

$$S = \sqrt{(VI \cos \phi)^2 + (VI \sin \phi)^2} \tag{2-21}$$

Dengan: S = Daya semu (kVA)

P = daya aktif (kW)

Q = Daya reaktif (kVAr)

Ada dua definisi umum untuk faktor daya. Definisi pertama menyatakan faktor daya sebagai cosinus dari sudut beda fasa antara arus dan tegangan dengan arus mendahului atau tertinggal terhadap tegangan. Definisi yang lebih umum digunakan adalah ratio antara daya aktif dan daya semu. Faktor daya bervariasi antara 0 sampai dengan 1, tetapi biasanya dinyatakan dalam persen (%). Faktor daya (pf) = cos sudut antara daya aktif dan daya semu.

$$\cos \phi = PF = \frac{\text{daya}_{aktif}}{\text{daya}_{semu}} = \frac{kW}{kVA} \tag{2-22}$$

$$\tan \phi = \frac{\text{daya}_{reaktif}}{\text{daya}_{aktif}} = \frac{kVAR}{kW} \tag{2-23}$$

Untuk gelombang yang tak sinusoidal, misalnya terdapat harmonisa, maka didefinisikan faktor daya berbanding lurus dengan arus dan tegangan. Secara umum nilai sesaat dari tegangan dan arus dapat ditulis sebagai berikut:



$$v = \sum_1^n \sqrt{2}V_n \sin(n\omega t - \alpha_n) + \sum^m \sqrt{2}I_m \sin(m\omega t + \alpha_m) \quad (2-24)$$

$$i = \sum_1^n \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t + \alpha_n + \phi_n) + \sum^p \sqrt{2}I_p \sin(p\omega t + \alpha_p) \quad (2-25)$$

Dan faktor dayaanya adalah:

$$PF = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v i dt}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{\sum_1^n V_n I_n \cos \phi_n}{\{(\sum_1^n V_n^2 + \sum^m V_m^2)(\sum_1^n I_n^2 + \sum^p I_p^2)\}} \quad (2-26)$$

Jika bentuk tegangannya adalah sinusoidal maka persamaan tersebut dapat disederhanakan:

$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \phi_1}{V_1 I_{rms}} = \frac{I_1}{I_{rms}} \cos \phi_1 = \mu \cos \phi_1 \quad (2-27)$$

Dengan:

$\cos \phi$ = displacement faktor antarakomponen fundamental dari arus dan tegangan.

μ = faktor distorsi arus.

Faktor daya akan tinggi ketika $\mu = 1$ karena $\cos \phi_1$ tidak dapat lebih besar dari satu. Dari hubungan di atas terlihat bahwa penyalura daya dirasakan sangat baik bila digunakan harga faktor daya mendekati maksimum atau mendekati satu.

2.1.3. Faktor Daya Leading dan Lagging

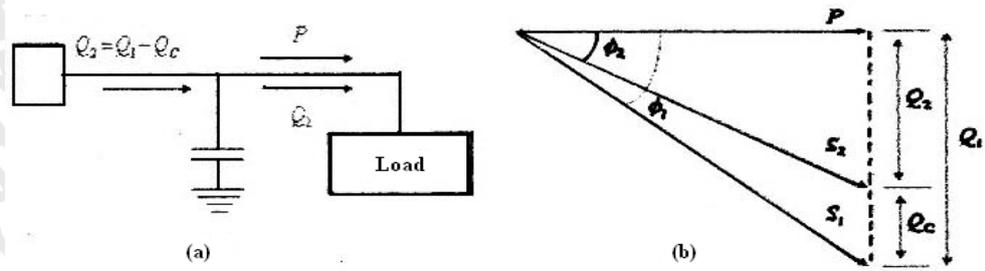
Faktor daya bisa *leading* atau *lagging*. Umumnya pada suatu industri hanya faktor daya beban yang diperhitungkan. Pengertian yang dapat membantu perbedaan antara faktor daya leading dan lagging adalah sebagai berikut: faktor daya leading bila beban menghasilkan daya reaktif (VAr) sedangkan daya lagging jika beban menyerap daya reaktif (VAr).

2.1.4. Perbaikan Faktor Daya

Dari hubungan segitiga yang ditunjukkan gambar 2.2, beberapa persamaan matematika yang sederhana dapat ditulis sebagai berikut (Red Book, IEEE Std 141-1986):

$$\cos \theta = PF = \frac{\text{daya aktif}}{\text{daya semu}} = \frac{kW}{kVA} \quad (2-28)$$

$$\tan \theta = \frac{\text{daya reaktif}}{\text{daya aktif}} = \frac{kVAr}{kW} \quad (2-29)$$



Gambar 2.2 Blok Diagram dan Fasor Perbaikan Faktor Daya

Sumber: Red Book, IEEE Std 141-1986

Karena komponen daya aktif umumnya konstan (komponen kVA dan kVAr berubah sesuai dengan faktor daya), maka:

$$\text{Daya reaktif} = \text{daya aktif} \times \tan\theta = (kW \times \tan\theta) \text{ kVAr} \quad (2-30)$$

Sebagai contoh rating kapasitor yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya beban adalah sebagai berikut:

$$\text{Daya reaktif pada pf awal} = \text{Daya aktif} \times \tan\theta_1 \quad (2-31)$$

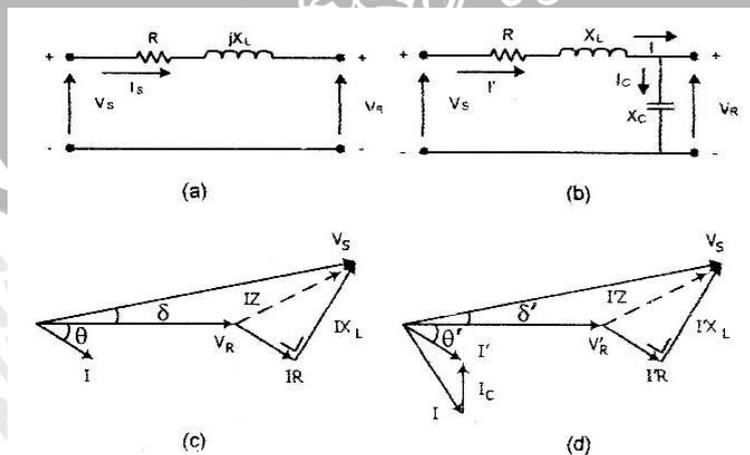
$$\text{Daya reaktif pada pf yang diperbaiki} = \text{Daya aktif} \times \tan\theta_2 \quad (2-32)$$

Sehingga rating kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya adalah:

$$\begin{aligned} \text{Daya reaktif (kVAr)} &= \text{Daya aktif} \times (\tan\theta_1 - \tan\theta_2) \\ \text{kVAr} &= kW \times (\tan\theta_1 - \tan\theta_2) \end{aligned} \quad (2-33)$$

2.1.4.1. Pengaruh Perbaikan Faktor Daya Terhadap Tegangan

Pada gambar 2.3 diperlihatkan kondisi suatu konduktor sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor. Terlihat pada gambar tersebut bahwa pemasangan kapasitor membuat kenaikan pada tegangan di sisi terima (V_R) jika tegangan pengirim (V_S) dipertahankan konstan. Oleh karena itu dalam memperbaiki faktor daya, hal yang perlu dicegah adalah kemungkinan terjadinya fenomena *overvoltage*.



Gambar 2.3 Pemasangan Kapasitor

Sumber: Kennedy, Barry, 1995

2.1.4.2. Pengaruh perbaikan Faktor Daya Terhadap Losses

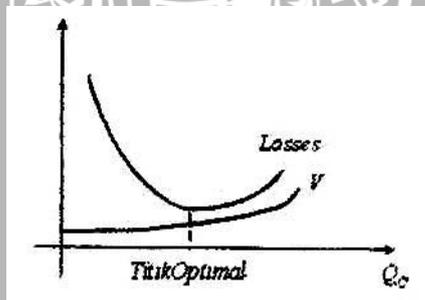
Pemasangan kapasitor untuk memperbaiki faktor daya dapat memperkecil nilai arus dari I menjadi I' seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.4 (c) dan (d). Dengan penurunan nilai arus tersebut maka rugi-rugi I^2R pada jaringan menjadi berkurang. Besarnya penurunan rugi-rugi karena perbaikan faktor daya sebagai berikut (Kennedy, Barry, 1995):

$$\% \Delta P_{\text{loss}} = 100 \cdot \left[1 - \left(\frac{PF_{\text{old}}}{PF_{\text{new}}} \right)^2 \right] \quad (2-34)$$

Persamaan di atas digunakan untuk menghitung penghematan rugi-rugi atau losses (kW). Penurunan rugi-rugi tersebut berdampak pada peningkatan kapasitas sistem, dalam hal ini nilai MVA yang digunakan menjadi semakin kecil. Hal ini sangat menguntungkan karena dengan peningkatan kapasitas sistem maka dapat dimungkinkan untuk menambah beban pada sistem. Sehingga perbaikan faktor daya ini merupakan salah satu langkah yang dapat menghemat penggunaan energi yang berimbas juga pada penghematan biaya produksi.

2.1.4.3. Optimasi Tegangan dan Losses

Telah dijelaskan bahwa perbaikan faktor daya akan menurunkan losses dan menaikkan tegangan. Kenaikan tegangan sendiri juga berdampak pada kenaikan losses. Oleh sebab itu perlu dicari suatu pola pemasangan kapasitor yang dapat menurunkan nilai losses secara signifikan namun tidak menyebabkan *overvoltage*.



Gambar 2.4 Kurva V, Losses terhadap Q_c

Sumber: Kennedy, Barry, 1995

Gambar 2.4 membantu menjelaskan situasi yang terjadi akibat pemasangan kapasitor. Untuk setiap sistem terdapat titik optimal dengan nilai losses terendah. Jika setelah kapasitor itu ditambah maka losses akan kembali naik seiring dengan kenaikan tegangan.

2.2 Sumber Daya Reaktif untuk Perbaikan Faktor Daya

Sebelum dilakukan pemilihan sumber daya reaktif guna perbaikan faktor daya maka harus diketahui komponen-komponen atau peralatan yang menghasilkan daya reaktif. Sebagai pembangkit daya reaktif ini ada beberapa komponen yaitu kondensator sinkron, kapasitor seri, kapasitor shunt.

1. *Kondensator Sinkron*

Adalah suatu mesin sinkron dengan penguatan dc pada kumparan medan rotornya, dan bekerja sebagai motor beban nol. Bila penguatan mesin tersebut di bawah penguatan nominal (*under excited*) maka mesin tersebut memerlukan daya reaktif dari jala-jala dan jika penguatannya di atas penguatan nominal (*over excited*) maka mesin tersebut mengirimkan daya reaktif ke jala-jala. Kondensator sinkron tidak memerlukan daya aktif, daya aktif diperlukan hanya untuk mengatasi rugi-rugi beban nol saja yang besarnya antara 1% sampai dengan 4.5% dari rating MVA-nya. Kondensator sinkron digunakan untuk memenuhi daya reaktif yang relative besar (antara 5-10 MVA_r) pada jala-jala yang cukup luas.

2. *Kapasitor Shunt*

Merupakan komponen pembangkit daya reaktif yang praktis, ringan dan sederhana untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif yang relative kecil. Kapasitor shunt terdiri dari unit-unit standard mulai dari 15 kVA_r sampai 20 MVA_r.

3. *Kapasitor Seri*

Merupakan kapasitor yang terpasang seri dengan jaringan, dapat dipakai untuk memperbaiki faktor daya akan tetapi relatif kecil. Kapasitor seri digunakan untuk mengkompensasi reaktansi induktif pada saluran sehingga dapat meningkatkan transfer daya.

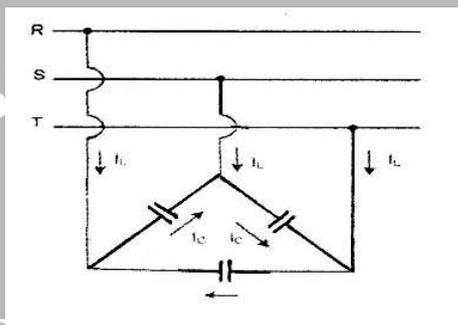
2.3 Kapasitor Shunt

Kapasitor shunt memberikan daya reaktif dan menambah tegangan. kapasitor shunt digunakan pada semua sistem dan dalam rentang yang luas. Keuntungan dari kapasitor shunt adalah biaya rendah dan fleksibilitas pemasangan dan pengoperasian, sehingga dapat digunakan dalam sistem yang berfungsi memberikan efisiensi pada transmisi daya dan distribusi daya. Kerugian-kerugian dari kapasitor shunt adalah daya reaktif yang dikeluarkan sebanding dengan kuadrat tegangan, sehingga daya reaktif menurun pada tegangan rendah, sehingga diperlukan jumlah yang besar.

Kapasitor shunt digunakan sebagai kompensasi terhadap rugi-rugi I^2X dalam transmisi. Kapasitor bank dengan ukuran tertentu dihubungkan secara langsung pada

bus tegangan tinggi atau belitan tersier transformator. Kapasitor shunt dihubungkan melalui *circuit breaker* (CB) secara otomatis atau manual dengan rele tegangan. Switching kapasitor bank memberikan nilai pengaturan yang bagus pada tegangan sistem.

Kapasitor shunt pada sistem tiga fasa dapat dihubungkan delta dan star. Hubungan delata memberikan daya reaktif lebih besar dari hubungan star dengan harga kapasitor yang sama. Ini diakibatkan oleh tegangan antar fasa yang lebih besar pada kapasitor bank dengan hubungan delta.



Gambar 2.5 Kapasitor Hubungan Delta

Sumber: Dugan RC. Mark F., 1996

Dalam kapasitor hubungan delta, daya reaktif yang dibangkitkan oleh kapasitor adalah sebagai berikut (Dugan RC. Mark F., 1996)

$$Q_c = \sqrt{3}VI \sin\phi \quad (2-35)$$

$$Q_c = \sqrt{3}VI_c \quad (\sin\phi = 1.0) \quad (2-36)$$

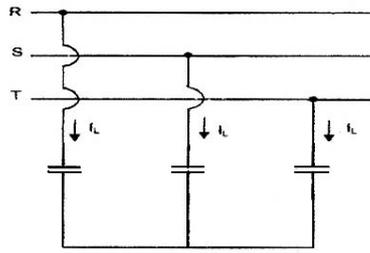
Arus yang mengalir pada kapasitor:

$$I_L = \frac{Q_c}{\sqrt{3}V_{LL}} \quad I_c = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (2-37)$$

$$X_c = \frac{V_{L-L}}{I_c} \quad C = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad I_c = \frac{V}{X_c} = \omega CV \quad (2-37)$$

$$Q_c = 3V^2\omega C \quad (2-38)$$

Dalam kapasitor hubungan star, daya reaktif yang dibangkitkan oleh kapasitor adalah sebagai berikut:



Gambar 2.6 Kapasitor Hubungan Star
 Sumber: Dugan RC. Mark F.,1996

Tegangan pada kapasitor (Dugan RC. Mark F.,1996):

$$V_c^{star} = \frac{V}{\sqrt{3}} \tag{2-39}$$

V: Tegangan antar fasa

$$I_c = I_L \quad X_c = \frac{V_{L-N}}{I_c} \quad C = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

Daya reaktif yang dibangkitkan:

$$Q_c^{star} = V^2 \omega C \tag{2-40}$$

$$Q_c \text{ delta} : Q_c \text{ star} = 3 : 1 \tag{2-41}$$

Walaupun konfigurasi delta memberikan daya reaktif tiga kali lebih besar dari konfigurasi bintang, kapasitor yang terhubung delta besar kemungkinan akan mengalami tegangan lebih, maka konfigurasi delta tidak direkomendasikan pada instalasi tegangan tinggi.

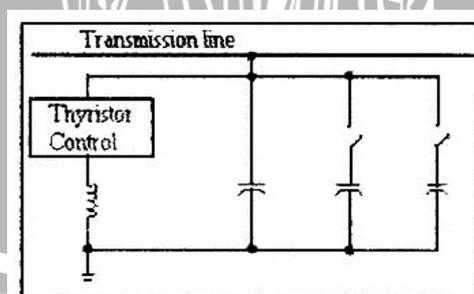
2.4 Kompensasi Daya Reaktif

Pengendalian sistem daya listrik bolak balik (AC) dikenal sebagai hal yang kompleks. Ini disebabkan oleh perubahan secara terus menerus antara medan magnet dan medan listrik. Bergeraknya arus listrik pada suatu transmisi tidak hanya dipengaruhi oleh tahanan tetapi juga dari induktansi dan kapasitansi di sepanjang transmisi tersebut. Kombinasi ketiga hal inilah yang dikenal dengan istilah impedansi. Disamping itu, pada jaringan transmisi listrik AC daya listrik mengalir dari ujung transmisi dengan tegangan fasa *leading* ke ujung yang lain yang bertegangan fasa *lagging*. Besarnya daya listrik yang mengalir pada suatu transmisi akan bertambah dengan semakin besarnya perbedaan sudut fasa antara kedua tegangan tersebut. Konsekuensinya, penambahan daya listrik suatu transmisi dengan demikian dapat dilakukan dengan tiga cara: menaikkan tegangan, menambah selisih sudut antara dua ujung transmisi atau dengan pengurangan impedansi dari transmisi. Teknologi *Flexible AC Transmission Sistem (FACTS)* inilah yang kemudian dikembangkan dengan salah satu tujuan untuk

menyediakan peralatan yang fleksibel dalam pengaturan ketiga parameter aliran daya listrik tersebut. Dengan pengaturan dan pengendalian yang fleksibel ini maka harapan untuk memaksimalkan kapasitas transmisi pada tingkat batas panas (*thermal rating*) akan terwujud.

Ada dua hal yang juga merupakan permasalahan pada sistem jaringan transmisi listrik bolak balik (AC). Yang pertama adalah keberadaan daya reaktif yang membawa dampak negative terhadap sistem jaringan transmisi daya listrik. Sebagai contoh, daya reaktif ini dapat mengakibatkan *voltage sags* pada sistem transmisi. Maka beberapa alat *Flexible AC Transmission Sistem (FACTS)* dirancang dan dibuat untuk menjawab permasalahan yang sering kali timbul pada daya reaktif ini. Permasalahan transmisi listrik AC berikutnya adalah permasalahan berhubungan dengan keberadaan sistem listrik AC yang sensitive terhadap hal-hal yang dapat mengganggu kestabilan sistem.

Salah satu jenis peralatan *FACTS* yaitu *Static VAR Compensator (SVC)*. *SVC* berfungsi sebagai pemelihara kestabilan kondisi mantap dan dinamika tegangan dalam dalam batasan yang sudah ditentukan pada jaringan transmisi berjarak jauh dan berbeban tinggi. Fungsi *SVC* diperoleh dengan menggunakan thyristor yang secara cepat dapat menghubungkan atau memutuskan inductor atau pun kapasitor pada jaringan transmisi. Namun kekurangannya, alat ini tidak dapat digunakan sebagai alat pengendali aliran daya listrik aktif yang sangat vital dalam sistem jaringan transmisi listrik AC. Selain dari itu, *SVC* juga didapati sangat rendah efisiensinya jika terjadi turunnya tegangan dari transmisi secara drastic. Gambar 2.7 menunjukkan contoh dari topologi *SVC*.



Gambar 2.7 *Static VAR Compensator*

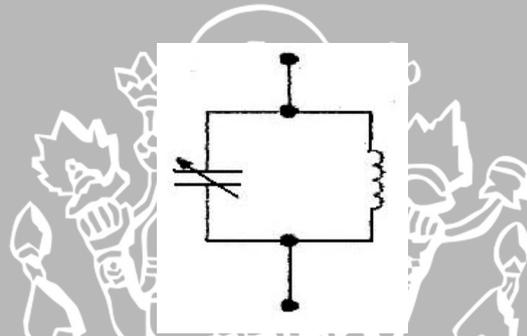
Sumber: Acha, E., Agelidis, V.G., Anaya-Lara, O. & Miller, T.J.E. 2002.

Komponen daya reaktif yaitu peralatan yang mensuplai daya reaktif ke beban. Selanjutnya dalam bab ini akan diuraikan tentang *SVC* yang merupakan salah satu

kompensator statis juga prinsip kerjanya. Dari beberapa tipe utama yang populer digunakan yaitu *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*, *Thyristor Switched Capacitor (TSC)*, *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*.

Peralatan kompensator statis berarti tidak memiliki komponen yang bergerak seperti kondensator sinkron. Disini juga perlu kita ketahui tentang pengertian kompensator ideal (gambar 2.8) yaitu peralatan yang berkemampuan dalam pengaturan kontinyu terhadap daya reaktif tanpa adanya kelambatan respon sehingga jangkauannya tak terbatas (*lagging* atau *leading*).

Sifat-sifat yang sangat penting dari kompensator statis adalah kemampuannya untuk mempertahankan suatu tegangan konstan pada terminalnya dengan adanya pengaturan yang kontinyu terhadap daya reaktif. Sifat penting lainnya adalah kecepatan respon terhadap perubahan kecil pada respon terminal.



Gambar 2.8 Kompensator Ideal

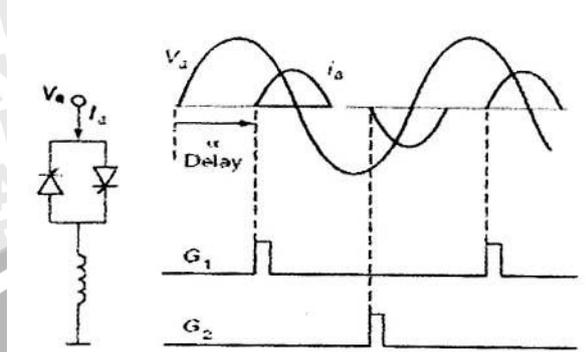
Sumber: Acha, E., Agelidis, V.G., Anaya-Lara, O. & Miller, T.J.E. 2002.

Karakteristik kontrol biasanya memiliki slope positif yang kecil untuk menstabilkan titik kerja. Arus reaktif dibatasi baik pada keadaan *lagging* maupun *leading* dengan faktor-faktor dalam desain kompensator maupun prinsip-prinsip operasinya. Karakteristik ini mengalami deviasi dari garis lurus, mengalami diskontinuitas dan perubahan slope sesuai dengan kecepatan perubahan arus dan tegangan.

2.5 Thyristor Controlled Reactor (TCR)

Thyristor Control Reactor (TCR) merupakan salah satu bagian *SVC*, sehingga jika dihubungkan secara paralel dengan kapasitor tetap pada sistem jaringan listrik maka akan dapat dipakai untuk mengatur daya reaktif (*lagging* atau *leading*) secara kontinyu. Rangkaian dasar *TCR* ini terdiri atas inductor yang dihubungkan secara seri dengan thyristor bidirectional seperti ditunjukkan pada gambar 2.9. Thyristor (T_1 , T_2) yang

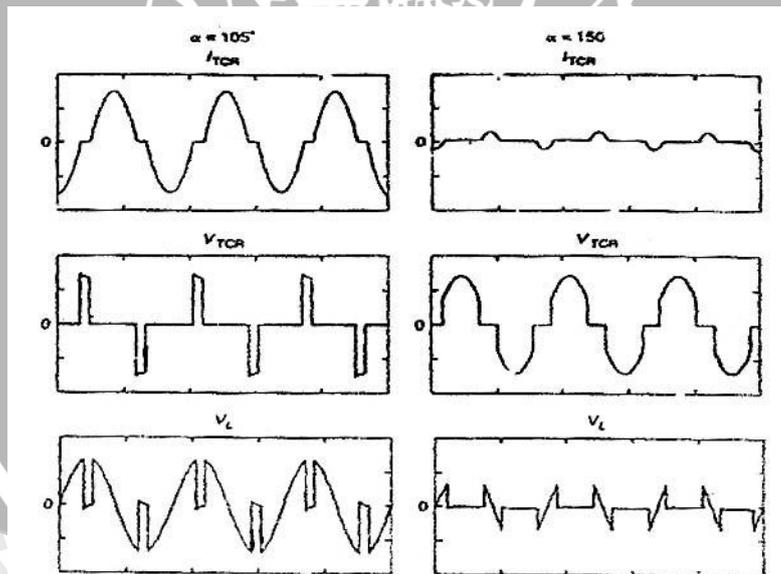
terhubung anti paralel ini bekerja seperti bidirectional switch dimana thyristor T_1 akan berkonduksi pada setengah gelombang positif dan thyristor T_2 akan berkonduksi pada setengah gelombang negative.



Gambar 2.9 Rangkaian TCR dan Gelombang Tegangan-Arus

Sumber: IEEE Transaction on circuit and Sistem, 1996

Dari gambar 2.10 range untuk pengaturan sudut penyalan mulai dari 90° sampai 180° . pada sudut penyalan 90° menyebabkan thyristor akan konduksi secara penuh dan pada sudut penyalan 180° thyristor tidak berkonduksi atau dalam kondisi *blocked mode*. Konduksi secara parsial diperoleh dengan sudut penyalan antara 90° - 180° . Sudut penyalan anantara 0° - 90° tidak diijinkan karena akan menghasilkan arus tak simetris dengan adanya komponen DC (Sasan Jajali, Jan Dobson dan Robert Lasseter, 1996).



Gambar 2.10 Arus dan Tegangan pada Thyristor Controlled Reactor (TCR)

Sumber: IEEE Transaction on Circuit and Sistem, 1996

Penyalan (pengurangan sudut konduksi) mengakibatkan berkurangnya rugi-rugi daya pada thyristor, tetapi disamping itu juga mengakibatkan bentuk gelombang sinusoidal menjadi kurang sempurna. Masing-masing gambar berhubungan dengan

harga tertentu dari sudut penyalan α yang diukur dari titik nol. Tegangan konduksi sebagian didapat dengan sudut penyalan antara 90° - 180° . pengaruh penambahan sudut penyalan adalah untuk mengurangi komponen harmonisa dasar dari arus, sedangkan induktansi reactor akan bertambah dan daya reaktifnya berkurang sebanding dengan arus. Dengan pengaturan komponen fundamental dari arus, TCR adalah merupakan susceptansi yang dapat dikontrol sehingga dapat diterapkan sebagai suatu kompensator statis.

Harga arus sesaat i adalah sebagai berikut (Sasan Jajali, Jan Dobson dan Robert Lasseter,1996):

$$i = \frac{\sqrt{2}}{X_L} V(\cos\alpha - \cos\omega t); \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \tag{2-42}$$

$$i=0 \quad ; \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi$$

Dengan:

V = Tegangan efektif

X_L = reaktansi reactor dalam Ω

$\Omega = 2\pi f$

α = sudut delay penyalan

komponen dasar dicari dengan analisis fourier dan didapat:

$$I_1 = \frac{V}{X_L} \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi} \tag{2-43}$$

Dimana I_1 dan V adalah harga rms, dan X_L adalah reaktansi dari reactor.

Efek dari peningkatan α (penurunan σ) adalah mereduksi komponen fundamental I_1 atau sama dengan peningaktan induktasi dari reactor. Efek lain adalah frekuensi fundamental harus perlu diperhatikan. Susceptansi sebagai fungsi dari sudut penyalan α adalah (Sasan Jajali, Jan Dobson dan Robert Laasseter, 1996):

$$B(\alpha) = \frac{I_1}{V} = \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi X_L} \tag{2-44}$$

$$= \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \tag{2-45}$$

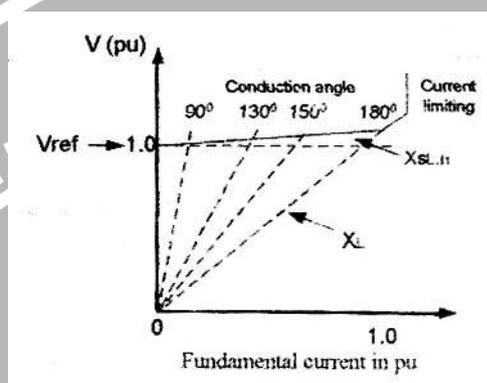
Harga maksimum dari susceptansi adalah pada konduksi penuh ($\alpha = 90^\circ$, $\sigma=180^\circ$), dan sama dengan $1/X_L$. Harga minimum adalah nol, diperoleh dengan $\alpha = 180^\circ$, $\sigma = 0^\circ$, prinsip dari kendali susceptansi lebih dikenal sebsagai kendali fasa. Susceptansi di *switch* masuk ke sistem untuk pengontrolan parsial pada setiap setengah siklus. VARIasi dalam susceptansi seperti arus TCR adalah *smooth* atau kontinyu.

Thyristor Controlled Reactor (TCR) memerlukan sistem kendali yang menentukan penyulutan (sudut penyalan α) sesaat terukur dari zero crossing tegangan

(sinkronisasi dari sudut penyalaan). Dalam beberapa perancangan, respon kendali untuk sinyal langsung menggambarkan respon dari susceptansi. Dilain hal, respon kendali adalah sinyal kesalahan seperti deviasi tegangan, sinyal stabilitas tambahan dan lain-lain. Hasilnya adalah karakteristik steady state V/I yang ditunjukkan pada gambar 2.11, yang dapat dijabarkan sebagai berikut (Sasan Jajali, Jan Dobson dan Robert Lasseter,1996):

$$V = V_{ref} + X_{SL}I \quad 0 < I < I_{max} \quad (2-46)$$

Dimana X_{SL} adalah slope dari reaktansi yang diperoleh dari gain sistem kendali.



Gambar 2.11 Karakteristik Tegangan-Arus Fundamental dari Thyristor Controlled Reactor (TCR)

Sumber: IEEE Transaction on Circuit and Sistem, 1996

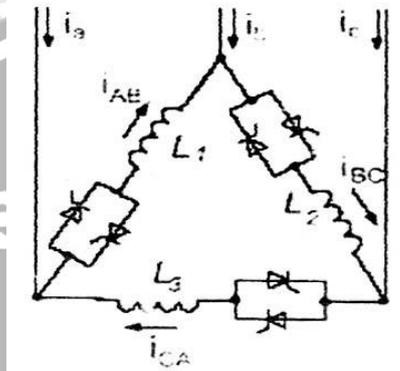
Seperti yang diilustrasikan dalam gambar 2.11, karakteristik kendali *TCR* dapat diperluas kedalam wilayah kapasitif dengan penambahan bank kapasitor yang diparalel.

Seperti yang telah diterangkan sebelumnya bahwa α mengalami penambahan dari 90° - 180° , bentuk gelombang dari arus menjadi berkurang dan sinusoidanya pun juga berkurang, dalam hal ini *TCR* menghasilkan harmonisa. Untuk peralatan satu fasa, jika penyalaan dari thyristor adalah simetri (sama untuk kedua thyristor) maka hanya harmonisa ganjil yang dihasilkan. Untuk sistem tiga fasa, diperluaka tiga elemen *TCR* satu fasa yang dihubungkan secara delta (6 pulsa *TCR*). Untuk kondisi yang seimbang, semua triple (3,9,...) harmonisa bersirkulasi ke dalam rangkaian delta yang tertutup dan tidak masuk ke saluran.

2.6 Thyristor Controlled Reactor (TCR) Tiga Fasa

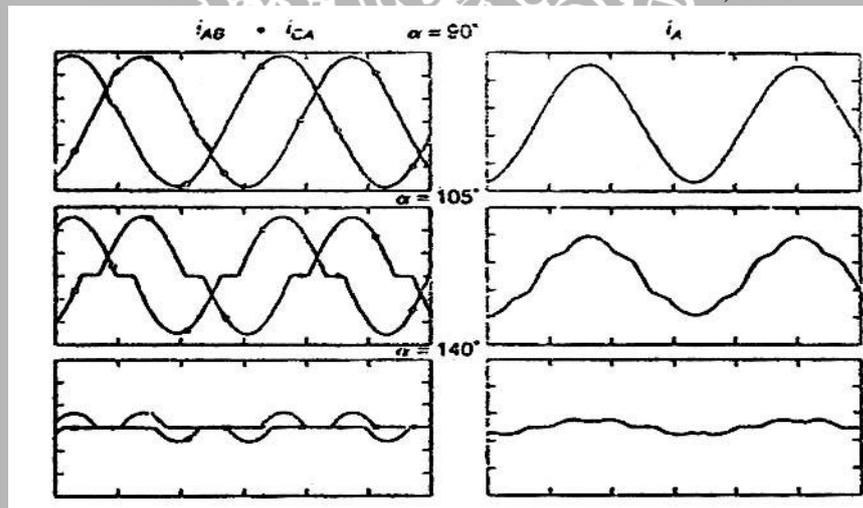
Thyristor Cotrolled Reactor (TCR) 3 fasa, 6 pulsa terdiri dari 3 *TCR* 1 fasa yang biasanya dihubungkan delta. Seperti ditunjukkan dalam gambar 2.22. inductor pada tiap-tiap fasa dibagi menjadi dua pada masing-masing sisi thyristor yang terpasang anti paralel untuk mencegah munculnya tegangan ac penuh pada terminal thyristor yang akan merusakkannya apabila suatu hubung singkat terjadi pada ujung-ujung terminal

reactor. Apabila sumber tegangan 3 fasa seimbang, tiga reactor identik dan thyristor dinyalakan secara simetris dengan arus penyalan yang sama pada tiap fasa. Kemudian arus pulsa yang simetris terjadi pada setengah putaran baik positif maupun negative dan yang terbentuk hanyalah harmonisa ganjil. Apabila sistem seimbang, seluruh harmonisa ketiga bersirkulasi pada hubungan delta tertutup dan tidak dapat muncul pada arus saluran. Gambar 2.12 menunjukkan arus fasa dan line *TCR* 3 fasa.



Gambar 2.12 Rangkaian Thyristor Controlled Reactor (TCR) tiga fasa hubungan delta

Sumber: IEEE Transaction on Circuit and Sistem, 1996



Gambar 2.13 Arus fasa dan line Thyristor Controlled Reactor (TCR) 3 fasa

Sumber: IEEE Transaction on Circuit and Sistem, 1996

Hubungan delta ini akan menghilangkan harmonisa ketiga dan pengalinya agar tidak muncul dalam sistem transmisi. Mekanismenya diterangkan sebagai berikut: dimisalkan i_{ABn} , i_{BCn} , dan i_{CAN} adalah arus harmonisa per fasa urutan ke- n pada hubungan delta, dan misalkan i_{An} , i_{Bn} , dan i_{Cn} adalah arus line. Arus harmonisa urutan ke-3 diberikan sebagai berikut (Sasan Jajali, Jan Dobson, dan Robert Lasseter, 1996):

$$i_{AB3} = a_3 \cos(3\omega t + \phi_3)$$

$$i_{BC3} = a_3 \cos(3\omega t + \phi_3 - 2\pi)$$

$$i_{CA3} = a_3 \cos(3\omega t + \phi_3 - 3\pi) \quad (2-47)$$

Sehingga

$$i_{AB3} = i_{BC3} = i_{CA3} \quad (2-48)$$

Semua arus berada di dalam fasa dan berputar di dalam delta thyristor, membentuk sistem urutan nol. Hal ini menunjukkan bahwa arus harmonisa pada line dikurangi menjadi nol, sebagai berikut:

$$i_{A3} = i_{AB3} - i_{CA3} = 0 \quad (2-49)$$

Begitu juga,

$$i_{B3} = 0; i_{C3} = 0 \quad (2-50)$$

Penyelidikan lebih lanjut menunjukkan bahwa tidak hanya arus harmonisa urutan ke-3 yang dapat dihilangkan tetapi semua kelipatan tiga akan dihilangkan. Sehingga komponen harmonisa orde $3p + 3$, dengan $p = 0,1,2,3,\dots(3,9,15,21,\dots)$ tidak dapat mengalir pada garis selama operasi kesetimbangan.

Analisis yang hampir sama dapat dilakukan untuk arus harmonisa kelima dan ketujuh, sebagai berikut (Sasan Jajali, Jan Dobson dan Robert Lasseter, 1996):

$$\begin{aligned} i_{AB5} &= a_5 \cos(5\omega t + \phi_5); \\ i_{BC5} &= a_5 \cos(5\omega t + \phi_5 - \frac{4\pi}{3}); \\ i_{CA5} &= a_5 \cos(5\omega t + \phi_5 - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2-51)$$

Pergantian sudut fasa untuk arus hubung delta, menjelaskan bahwa harmonisa kelima menampilkan arus sistem urutan negatif. Aplikasi yang sama untuk arus harmonisa orde $6p + 5$, dengan $p = 0,1,2,3,\dots(5,11,17,\dots)$. Untuk harmonisa ketujuh dijelaskan sabagai berikut (Sasan Jajali, Jan Dobson dan Robert Lasseter, 1996):

$$\begin{aligned} i_{AB7} &= a_7 \cos(7\omega t + \phi_7); \\ i_{BC7} &= a_7 \cos(7\omega t + \phi_7 - \frac{2\pi}{3}); \\ i_{CA7} &= a_7 \cos(7\omega t + \phi_7 - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2-52)$$

Perubahan sudut fasa untuk arus hubung delta, menjelaskan bahwa harmonisa ketujuh menghasilkan arus urutan positif. Aplikasi yang sama untuk harmonisa orde $6p+1$, dengan $p = 0,1,2,3,\dots(7,13,19,\dots)$. Arus ini mengalir pada garis yang terhubung dengan TCR pulsa-6. Keadaan yang ketat seperti dijelaskan keadaan awal untuk operasi kesetimbangan mungkin tidak member kenyamanan. Sebagai contoh, reactor mungkin tidak sama pada ketiga fasa atau sumber tegangan mungkin tidak seimbang.

Pada *TCR* sudut konduksi dari saklar-saklar thyristor dengan dua arah yang berlawanan harus sama. Sudut konduksi yang tidak sama akan menghasilkan arus harmonisa yang genap, juga akan membangkitkan stress thermal yang tidak sama pada thyristor kutub yang berlawanan.

2.7 Keuntungan-keuntungan *TCR*

Penggunaan *TCR* memiliki beberapa keuntungan seperti sebagai berikut (Mohan Mathur R dan Rajiv VArma K, 2002):

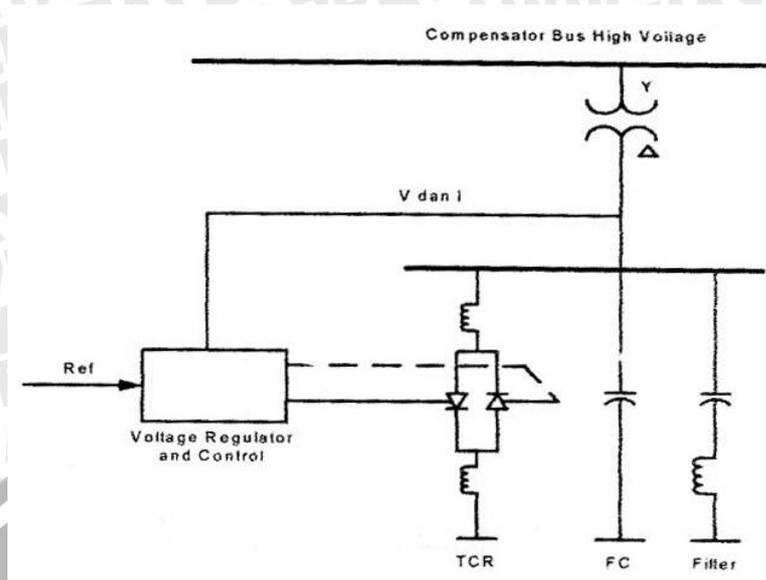
1. Dapat mengontrol level kompensasi pada saluran transmisi secara kontinyu dan cepat.
2. Dapat mengoptimalkan aliran daya pada saluran transmisi.
3. Dapat meredam osilasi akibat subsynchronous resonance. Dimana pada frekuensi subsynchronous, reaktansi *TCR* akan bersifat resistif-induktif. Subsynchronous resonance tidak boleh dibiarkan terjadi terlalu lama untuk itu harus diredam.
4. *TCR* dapat dipakai untuk menaikkan tegangan, dimana *TCR* yang terdapat kapasitor seri dapat bersifat reaktansi-kapasitif yang dapat mengkompensasi reaktansi saluran sehingga regulasi tegangan dapat dikurangi.

2.8 Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (*FC-TCR*)

2.8.1. Konfigurasi (*FC-TCR*)

Thyristor Controlled Reactor (TCR) secara kontinyu hanya mampu dikontrol pada kondisi daya reaktif yang *lagging*. Untuk mengembangkan range yang dapat dikontrol menuju *leading*, suatu kapasitor bank tetap dihubungkan secara paralel dengan *TCR*. *MVA Thyristor Controlled Reactor* memiliki rating lebih besar dibandingkan kapasitor tetap yang digunakan untuk mengkompensasi daya *MVA* kapasitif dan menjaga agar faktor daya berada dalam kondisi *lagging*. Kapasitor bank tetap biasanya terhubung secara bintang (*star*) yang terbagi atas lebih dari satu dalam tiap fasa. Tiap kapasitor memiliki *tuning inductor* yang terhubung seri dan mengatur cabang tersebut agar berfungsi sebagai filter harmonisa. Sebagai contoh suatu grup kapasitor diatur menjadi filter harmonisa kelima sedangkan lainnya untuk harmonisa ketujuh. Gambar 2.14 (a) menunjukkan *SVC* tipe *FC-TCR* yang dilengkapi dengan filter. Pada frekuensi fundamental tuning reactor mengurangi sedikit rating *MVA* dari kapasitor tetap.

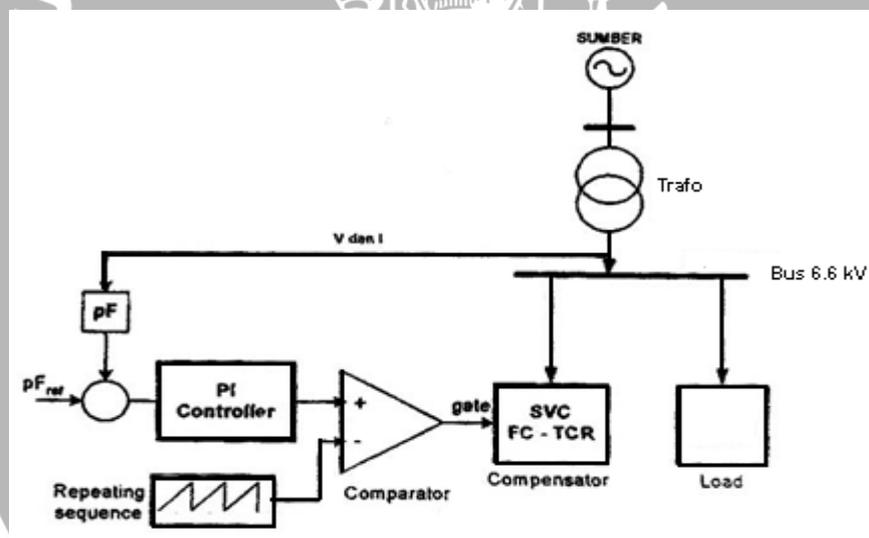
Sedangkan pada gambar 2.14 (b) menunjukkan blok diagram kontrol sistem *SVC*, di sini ditunjukkan bagaimana langkah kerja rangkaian control *SVC* sehingga memberikan sinyal atau pulsa masukan sebagai arus trigger bagi thyristor.



a. Rangkaian Static VAR Compensator (SVC) tipe Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)

Gambar 2.14 SVC FC-TCR dan Blok kontrol sistem SVC

Sumber: Hingorani, N.G. & Gyugyi, L., IEEE Press Book., 2000



b. Blok control sistem SVC

Gambar 2.14 SVC FC-TCR dan Blok kontrol sistem SVC

Sumber: Hingorani, N.G. & Gyugyi, L., IEEE Press Book., 2000

Model perancangan kontrol simulasi adalah seperti ditunjukkan pada gambar 2.14 (b) akibat adanya beban yang beroperasi naik turun akan timbul arus. Arus dan tegangan sebagai input yang akan menghasilkan output berupa sudut fasa, yang kemudian pada fungsi kosinus akan keluar besaran faktor daya. Referensi faktor daya diset dan masuk pada *summing junction* akan menghasilkan keluaran berupa perbedaan (*error*) antara setting faktor daya dengan faktor daya hasil pengukuran, ini sebagai input dari controller Proportional-Integral (PI). Output dari controller *proportional integral* (PI)

dimasukkan ke rangkaian pembangkit pulsa untuk mengendalikan TCR . Rangkaian kendali pulsa adalah terdiri dari komponen pembangkit pulsa yang digunakan untuk memberikan trigger pada kedua gate TCR . Adanya trigger gate ini dimasukkan untuk mengatur sudut penyalan α adalah $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ agar kedua gate bekerja secara simetri bergantian. Berdasarkan pengaturan sudut penyalan inilah arus inductor diatur sehingga TCR bekerja sebagai kompensator daya reaktif atau dengan kata lain controller PI mengendalikan TCR sehingga dapat memperbaiki faktor daya sesuai setting yang dikehendaki (Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. 2000).

2.8.2. Karakteristik Kerja (FC - TCR)

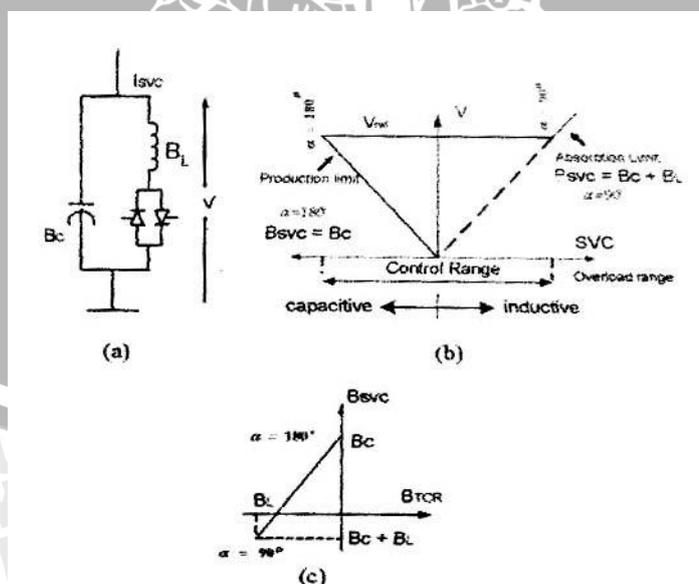
2.8.2.1. Tanpa Transformator Tegangan

Karakteristik V-I sebuah kompensator FC - TCR digambarkan dalam gambar 2.15. kapasitor tetap mengembangkan range control SVC pada sisi *leading*. Arus SVC (I_{SVC}) dapat diekspresikan sebagai fungsi tegangan sistem, V , dan susceptansi kompensator B_{SVC} sebagai berikut (Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. 2000):

$$\bar{I}_{SVC} = \bar{V}jB_{SVC} \quad (2-53)$$

$$\text{dimana: } B_{SVC} = B_c + B_{TCR} \text{ dan } B_c = \omega C \quad (2-54)$$

Gambar 2.18 (b) dan (c) menunjukkan karakteristik operasi dan susceptansi jenis kompensator ini dan keduanya juga menunjukkan bahwa produksi VAR maupun penyerapan VAR adalah dimungkinkan. Dengan menentukan rating TCR dan kapasitor, produksi dan penyerapan daya reaktif dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem.

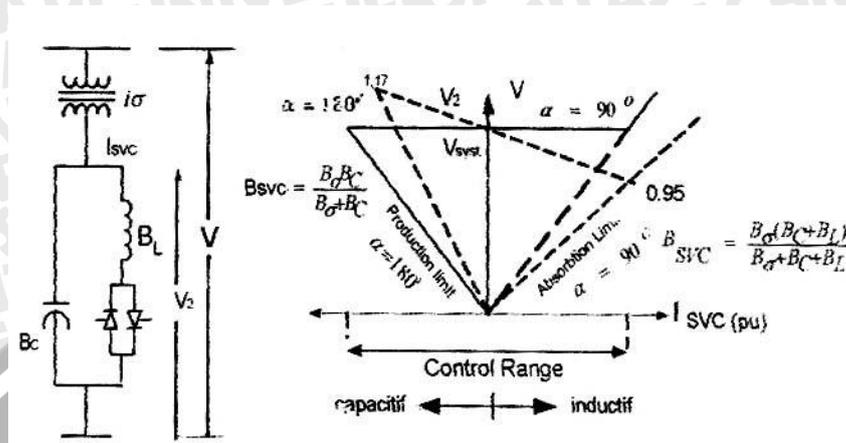


Gambar 2.15 Karakteristik Operasi Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC - TCR) tanpa Coupling Transformer

Sumber: Hingorani, N.G. & Gyugyi, L., IEEE Press Book, 2000

2.8.2.2. Menggunakan transformator Step-Down

Suatu SVC FC-TCR biasanya terhubung dengan sistem tenaga tegangan tinggi dengan menggunakan kopling trafo step-down seperti ditunjukkan gambar 2.16



Gambar 2.16 FC-TCR With Step Down Transformer dan karakteristik V-I

Sumber: Hingorani, N.G. & Gyugyi, L., IEEE Press Book, 2000

Susceptansi kompensator B_{SVC} diberikan sebagai berikut (N.G. Hingorani, 2000):

$$B_{SVC} = \frac{B_{\sigma}(B_C + B_{TCR})}{B_{\sigma} + B_C + B_{TCR}} = \frac{1}{1 + \frac{B_C + B_{TCR}}{B_{\sigma}}} (B_C + B_{TCR}) \quad (2-55)$$

Dimana B_{τ} adalah susceptansi trafo dan B_{TCR} adalah Variable dari 0 sampai B_L , sesuai dengan sudut penyalan dari 180° sampai 90° .

Dari persamaan (2.55), batas susceptansi dapat dihitung. Susceptansi pada batas produksi (kapsitif), yaitu dengan $B_{TCR} = 0$ pada $\alpha = 180^{\circ}$ diekspresikan sebagai berikut (Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. 2000):

$$B_{SVC \max} = \frac{B_{\sigma} B_C}{B_{\sigma} + B_C} \quad (2-56)$$

Susceptansi pada batas penyerapan (induktif) yaitu saat $B_{TCR} = B_L$ saat $\alpha = 90^{\circ}$, diberikan sebagai berikut:

$$B_{SVC \min} = \frac{B_{\sigma}(B_C + B_L)}{B_{\sigma} + B_C + B_L} \quad (2-56)$$

Harus diingat bahwa B_L bernilai negative. Suatu analisis untuk persamaan (2-55) menunjukkan bahwa total susceptansi SVC (B_{SVC}) tidak berubah secara linear bersama B_{TCR} . Bagaimanapun, bila $(B_C/B_{\sigma}) \ll 1$ dan $(B_L/B_{\sigma}) \ll 1$ yang merupakan kasus umum, ketidaklinearan relative kecil. Asumsi ini menunjukkan bahwa reaktansi trafo kopel jauh lebih kecil dibandingkan dengan reaktansi kapasitor atau TCR. Persamaan (2-55) kemudian dapat dilakukan suatu pendekatan melalui realisasi linearisasi sebagai berikut (Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. 2000):

$$B_{SVC} = \left(1 - \frac{B_C}{B_\sigma}\right) B_C + \left(1 - \frac{2B_C+B_L}{B_\sigma}\right) B_{TCR} \quad (2-57)$$

Batas susceptansi berdasarkan persamaan linearisasi:

$$B_{SVC \max} = \left(1 - \frac{B_C+B_L}{B_\sigma}\right) B_C ;$$

$$B_{SVC \min} = \left(1 - \frac{B_C+B_L}{B_\sigma}\right) (B_C + B_L) \quad (2-58)$$

Tegangan trafo pada sisi skunder adalah

$$\bar{V}_2 = \bar{I}_{SVC} \frac{1}{j(B_C+B_{TCR})} \quad (2-59)$$

\bar{I}_{SVC} dapat diekspresikan sebagai fungsi dari tegangan sistem V dan total susceptans kompensator B_{SVC} menggunakan persamaan (2-53) dan (2-55), sebagaimana berikut. (perhatikan bahwa tegangan sekunder trafo adalah sefasa dengan tegangan sistem).

$$V_2 = V \frac{B_\sigma}{B_\sigma+B_C+B_{TCR}} \quad (2-60)$$

Pada batas-batas operasi, tegangan sekunder berikut dapat dicari (Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. 2000):

$$V_{2cap} V \frac{B_\sigma}{B_\sigma+B_C} = V \left(1 - \frac{B_C}{B_\sigma}\right) \quad (2-61)$$

$$V_{2ind} = V \frac{B_\sigma}{B_\sigma+B_C+B_L} = V \left(1 - \frac{B_C+B_L}{B_\sigma}\right) \quad (2-62)$$

2.9 Prinsip Kerja Kontroler

Berdasarkan cara kerjanya jenis dari kontroler dibedakan menjadi dua macam yaitu, on-off controller yang hanya bekerja pada dua posisi on dan off serta controller yang bekerja secara kontinyu. Secara kontinyu artinya kontrol bekerja dari titik 0% sampai ke titik 100%. Jenis ini lebih banyak digunakan pada sistem pengendalian proses karena banyak operasi proses yang tidak dapat mentolerir fluktuasi variabel yang besar (Ogata, Katsuhiko, 1985)

Ada tiga macam controller yang bekerja secara kontinyu, yaitu:

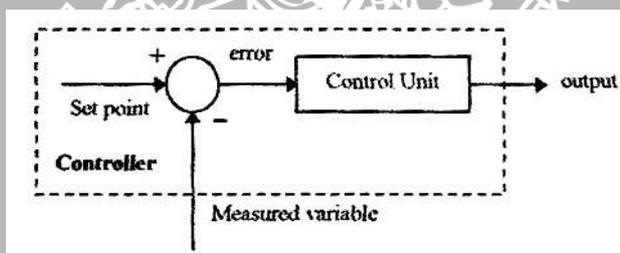
1. Kontroler Proporsional (P)
2. Kontroler Integral (I)
3. Kontroler Diferensial (D)

Karena kelebihan dan kekurangan ketiga controller tersebut maka seringkali dipakai dalam bentuk kombinasi, yaitu P+I disingkat PI, P+D disingkat PD, dan P+I+D disingkat PID. Ketiga jenis pengendali ini memberikan respon yang berbeda-beda pada proses orde satu, proses orde dua, orde banyak dan proses dengan *dead time*.

Pada dasarnya fungsi dari kontroler terbagi dalam dua tahap, yaitu membandingkan dan menghitung. Kedua fungsi tersebut di dalam blok diagram diwakili oleh kerja dari *summing junction* dan kerja unit control. Seperti yang terlihat pada gambar 2.17 *summing junction* berfungsi untuk membandingkan *measured variable* dengan *set point* dan fungsi dari unit control adalah untuk menghitung besar kecilnya koreksi yang diperlukan (Ogata, Katsuhiko, 1985).

Perbandingan itu sendiri dilakukan dengan cara mengurangi besaran *set point* dengan besaran yang terukur, yang kemudian hasilnya disebut dengan *error*. Karena nilai dari *set point* bisa lebih kecil atau lebih besar dari besaran yang terukur, maka nilai *error* bisa negatif ataupun positif. Berdasarkan besarnya *error* tersebut maka unit control melakukan penghitungan besarnya koreksi. Jadi *error* adalah input unit control dan *manipulated VArIable* adalah output unit control.

Dari gambar 2.17 juga dapat dilihat bahwa harga dari *set point* diproduksi dari kontroler itu sendiri yang besarnya dapat diset dengan memutar knob yang ada pada kontroler. Input dari kontroler tersebut berasal dari sinyal *measurement variable* dan outputnya berupa sinyal *manipulated variable* yang dihasilkan oleh control unit.



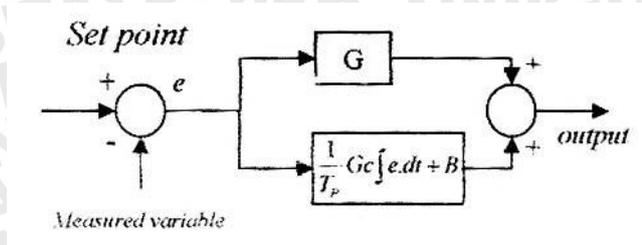
Gambar 2.17 Diagram Blok Kontroler
Sumber: Ogata, Katsuhiko, 1985

2.10 PI Controller

Proportional Integral (PI) Controller merupakan gabungan antara dua buah controller yaitu, *proportional controller* dan *integral controller*. Kombinasi antara dua controller ini dimaksudkan untuk menutupi masing-masing kelemahan yang dimiliki oleh *proportional* dan *integral controller*. Bentuk transfer fungsi kontroler PI adalah sebagai berikut (Ogata, Katsuhiko, 1985):

$$O = G_c \left(e + \frac{1}{T_R} \int e \cdot dt \right) \quad (2-63)$$

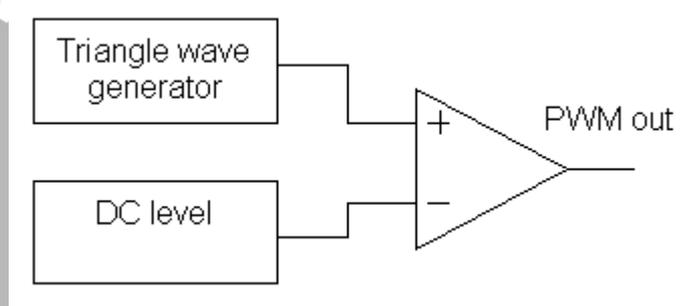
Blok diagram gabungan antara control P dan I dapat dilihat pada gambar 2.18 berikut:



Gambar 2.18 Blok Diagram PI controller
 Sumber: Ogata, Katsuhiko, 1985

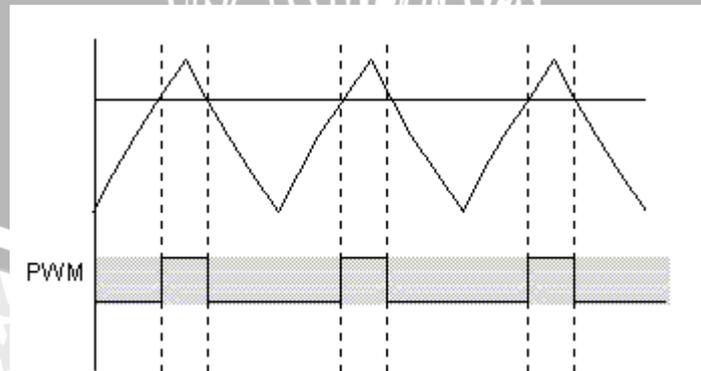
2.11 Pulse Width Modulator (PWM)

PWM adalah sebuah teknik membentuk sinyal segi empat dengan menggunakan komparator. Sinyal yang digunakan untuk PWM ini adalah dua buah sinyal, yaitu sinyal DC murni dengan gelombang segitiga (*Triangle wave*). Seperti ditunjukkan dalam gambar 2.19



Gambar 2.19 Pulse Width Modulator (PWM)
 Sumber: IEEE Transaction on Power Electronic, 2001

Jika tegangan dc lebih besar dari tegangan gelombang segitiga maka output komparator akan *low*, sedangkan bila lebih rendah maka akan *high*. Output dari PWM sederhana terlihat seperti gambar 2.20.



Gambar 2.20 Hasil Simulasi Pulse Width Modulator (PWM)
 Sumber: IEEE Transaction on Power Electronic, 2001

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang digunakan yaitu sebagai berikut:

3.1 Studi Literatur

Untuk mendukung penulisan skripsi agar didapatkan hasil yang maksimal diperlukan literatur sebagai acuan penulisan antara lain yang membahas tentang:

1. Konsep dasar perbaikan faktor daya pada sistem tenaga listrik dengan menggunakan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*.
2. Konsep rangkaian kontroler atau pengendali yang digunakan sebagai pengatur sudut penyalan thyristor sebagai pengatur arus masukan bagi induktor.

3.2 Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan antara lain:

1. Data sekunder, yaitu data dari hasil pengukuran parameter-parameter yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), daya total (S), tegangan (V), dan faktor daya (PF).
2. Data kuantitatif, yaitu data yang dapat dihitung atau data yang berbentuk angka-angka.

3.3 Desain Simulasi Peralatan Peningkat Faktor Daya dengan Menggunakan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*

Membuat desain simulasi sistem kelistrikan dengan kompensator *fixed capacitor-thyristor controlled reactor* pada main feeder trafo 1 di PT. Cheil Jedang Indonesia dengan mengambil data-data dari feeder tersebut sebagai acuan untuk memberikan harga pada simulasi *Simulink MatLab* yang digunakan.

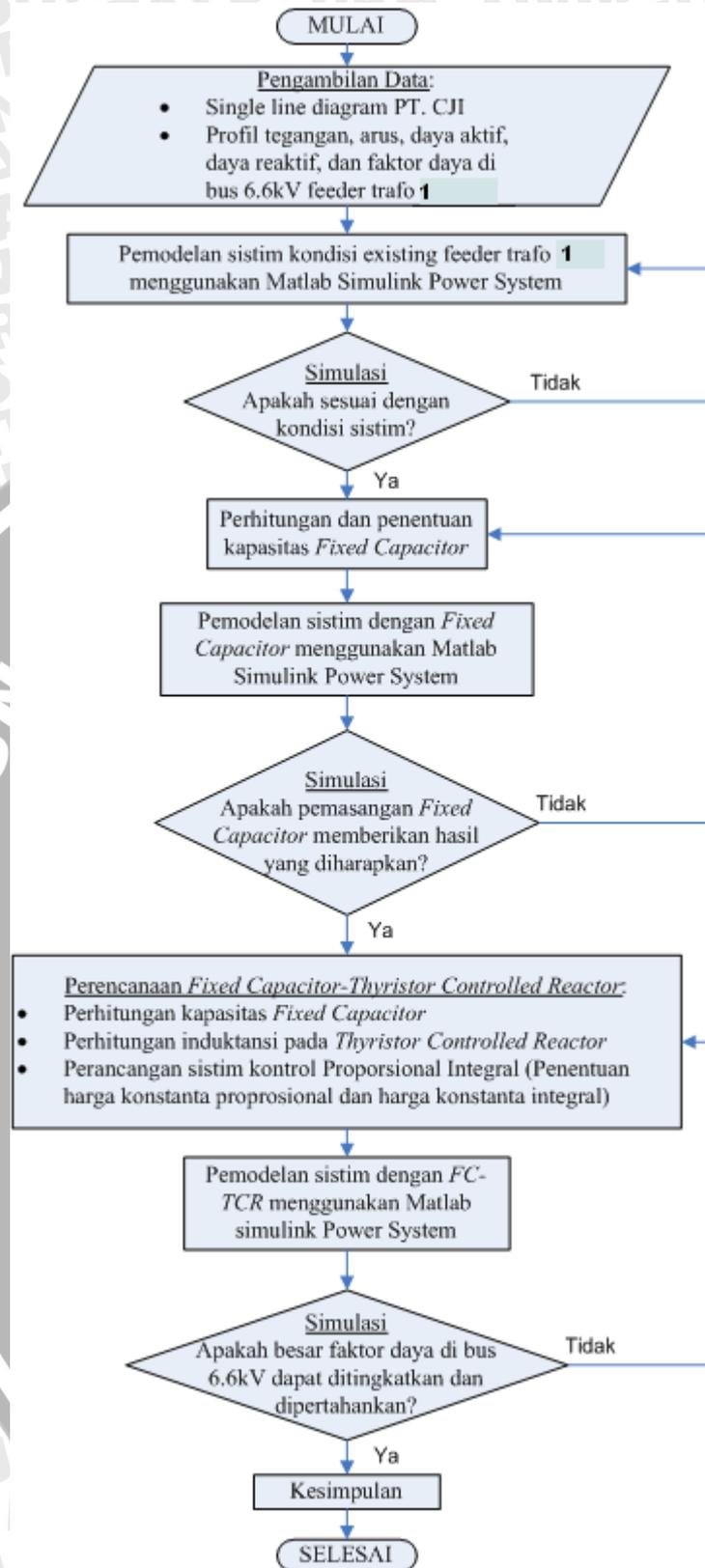
3.4 Pengujian Desain dengan Menggunakan *software Simulink Matlab*

Mensimulasikan desain dengan *software Simulink MatLab* hingga didapat hasil yang maksimal. Pengujian yang dilakukan meliputi:

1. Simulasi kondisi *existing* keadaan beban berfluktuasi.
2. Simulasi dengan kompensasi menggunakan *fixed capacitor-thyristor controlled reactor*.

3.5 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Setelah melakukan simulasi dan melihat unjuk kerja sistem dengan kompensator *FC-TCR* maka akan diperoleh data yang diperlukan untuk mengadakan analisis. Dari data yang telah dianalisis dapat diambil kesimpulan.



Gambar 3.1 Flow Chart Metodologi Penelitian

BAB IV

ANALISIS HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Sistem di Feeder Trafo 1 150/6.6kV

Pengambilan data dilakukan pada sistem distribusi di PT. Cheil Jedang Indonesia. Titik pengambilan data dilakukan di bus 6.6kV pada feeder trafo 1 21 MVA, 150/6.6kV dengan hubungan belitan Y- Δ . Data yang diambil diantaranya daya aktif (kW), daya reaktif (kVAr), faktor daya, tegangan (V), dan arus (A). Pada tabel lampiran 1 ditunjukkan data daya aktif, daya reaktif, faktor daya, tegangan, dan arus per jam selama 24 jam di bus 6.6kV pada feeder trafo 1 150/6.6kV.

Dari tabel pada lampiran 1 tersebut beban di bus 6.6 kV mengalami perubahan daya aktif, daya reaktif, maupun faktor daya di tiap jamnya selama 24 jam. Nilai faktor daya terendah dan faktor daya tertinggi yaitu 0.903 dan 0.918. Saat kondisi faktor daya 0.903 besar daya aktif 10140 kW, daya reaktif 4800 kVAr, tegangan 6650 V, dan arus sebesar 975 A. Sedang ketika kondisi faktor daya 0.918 besar daya aktif 10850 kW, daya reaktif 4680 kVAr, tegangan 6530 V, dan arus sebesar 1045 A.

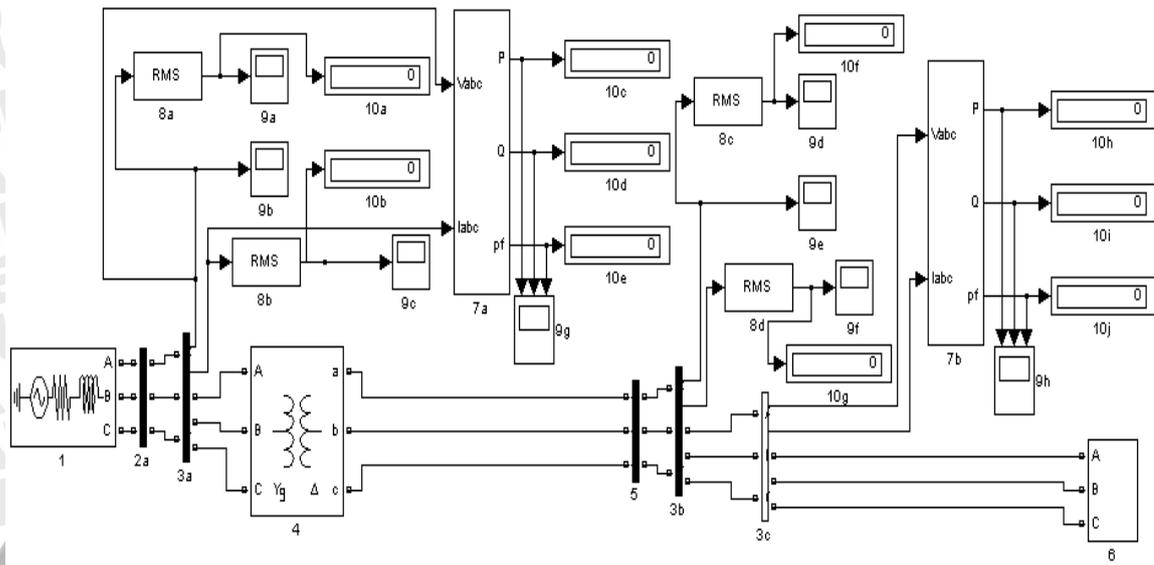
4.2 Simulasi Kondisi Sistem di Feeder Trafo 1 150/6.6 kV

4.2.1. Simulasi Kondisi Sistem di Feeder Trafo 1 150/6.6 kV untuk Beban dengan Faktor Daya Terendah

Smulasi kondisi sistem di feeder trafo 1 150/6.6 kV pada saat faktor daya beban bernilai terendah ini bertujuan untuk mengetahui nilai daya aktif, daya reaktif, faktor daya, tegangan dan arus di bus 6.6 kV. Sistem yang disimulasikan terdiri dari sumber tegangan 150 kV, Transformator 21 MVA 150/6.6 kV, alat pengukur tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya, dan beban yang terhubung di bus 6.6 kV. Rangkaian simulasi ditunjukkan pada gambar 4.1.

Berdasarkan rangkaian simulasi pada gambar 4.1 diperoleh hasil simulasi berupa data daya aktif, daya reaktif, faktor daya, tegangan, dan arus di bus 6.6 kV. Grafik dari tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya ditunjukkan pada gambar 4.2, 4.3, dan 4.4. Pada gambar 4.2 grafik tegangan menunjukkan nilai tegangan sebesar 6486 V. Pada gambar 4.3 grafik arus menunjukkan nilai arus sebesar 996.4 A. Dan pada gambar 4.4 grafik daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya menunjukkan nilai yaitu 10120 kW, 4789 kVAr, dan 0.903. Grafik pada gambar 4.2, 4.3, dan 4.4 menunjukkan

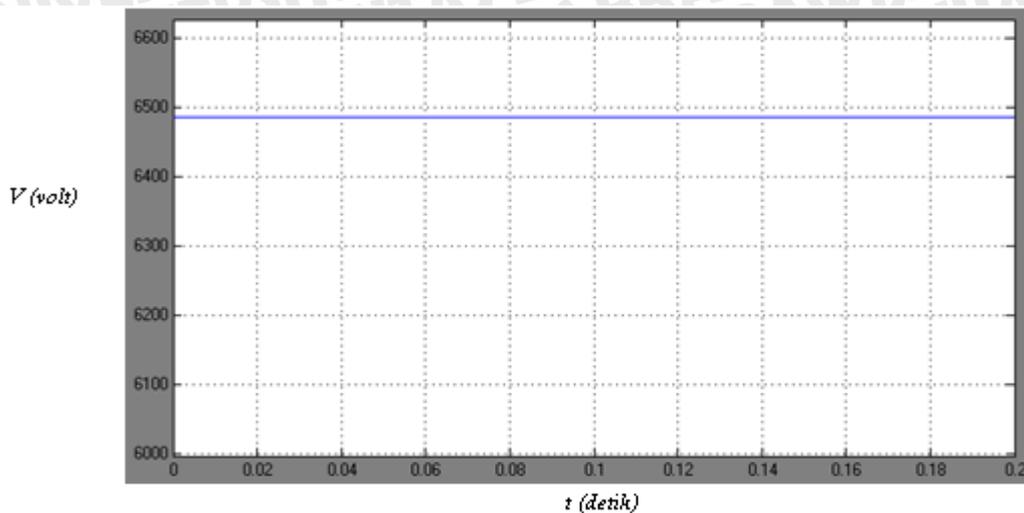
nilai yang konstan, hal tersebut dikarenakan beban yang terpasang di bus 6.6 kV pada simulasi digunakan beban konstan sebesar 10120 kW dan 4789 kVAr.



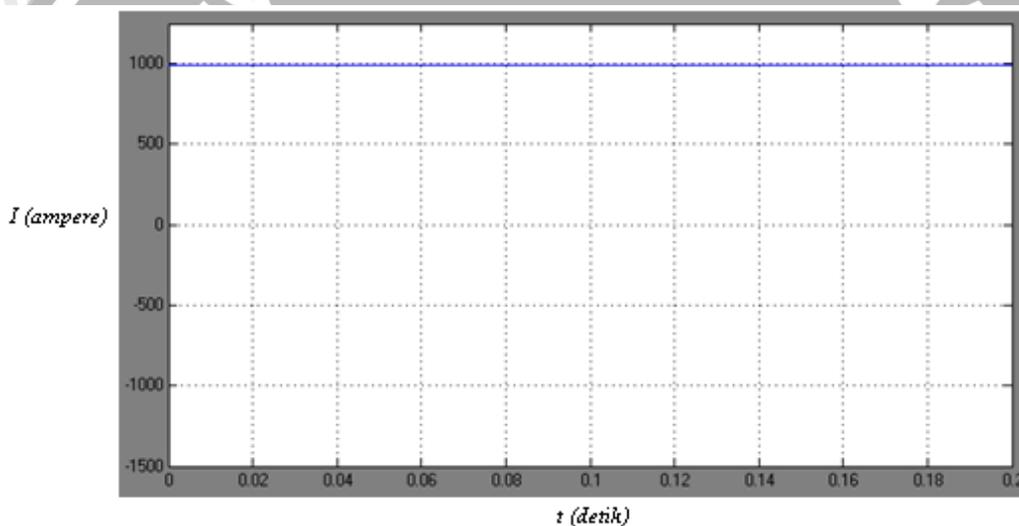
Gambar 4.1 Simulasi Kondisi Sistem di Feeder Trafo 1 150/6.6 kV

Keterangan gambar 4.1:

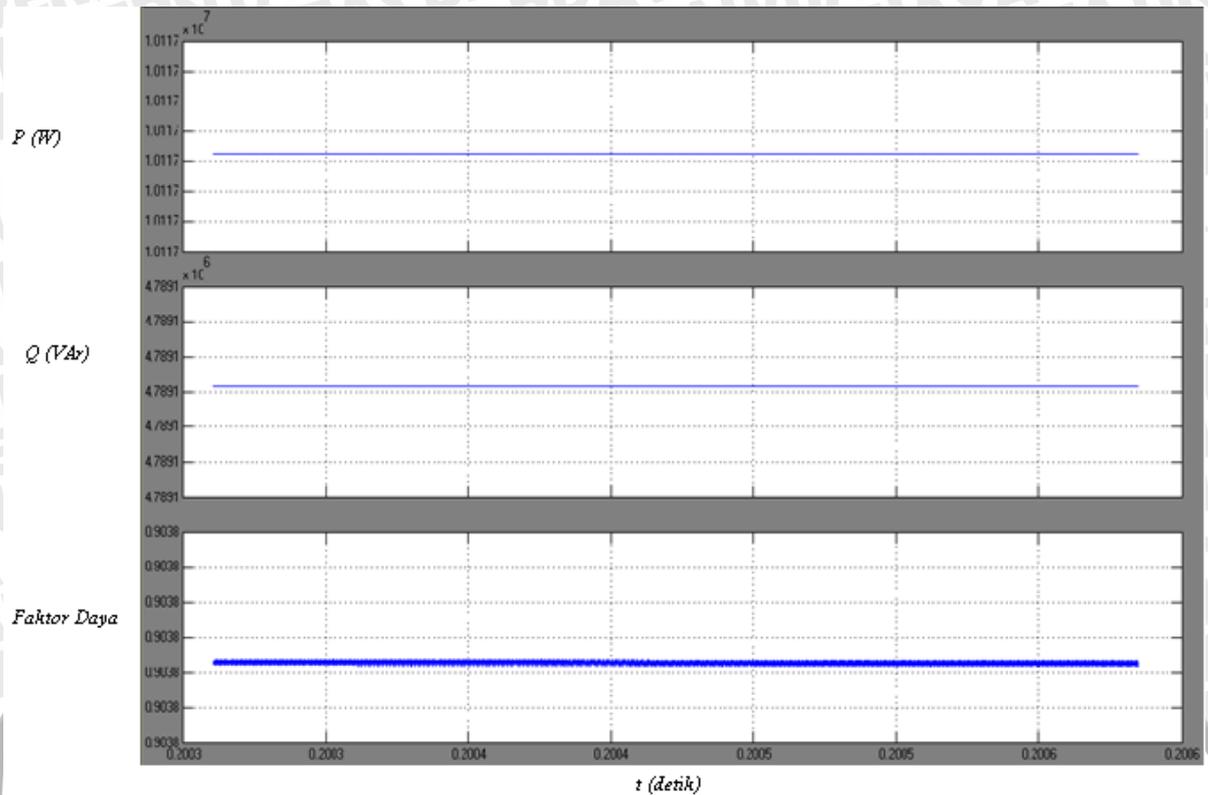
- 1 : Sumber tegangan tiga fasa 150 kV
- 2 : Bus 150 kV
- 3a, 3b, dan 3c : Alat ukur tegangan dan arus tiga fasa
- 4 : Trafo tiga fasa Y-Δ 150/6.6 kV
- 5 : Bus 6.6 kV
- 6 : Blok beban
- 7a dan 7b : Alat ukur P , Q , dan faktor daya tiga fasa
- 8a s.d. 8d : Root mean square (RMS)
- 9a s.d. 9h : Scope
- 10a s.d. 10j : Numeric Display



Gambar 4.2 Grafik Tegangan di Bus 6.6 kV Hasil Simulasi Matlab Saat Faktor Daya Terendah



Gambar 4.3 Grafik Arus di Bus 6.6 kV Hasil Simulasi Matlab Saat Faktor Daya Terendah



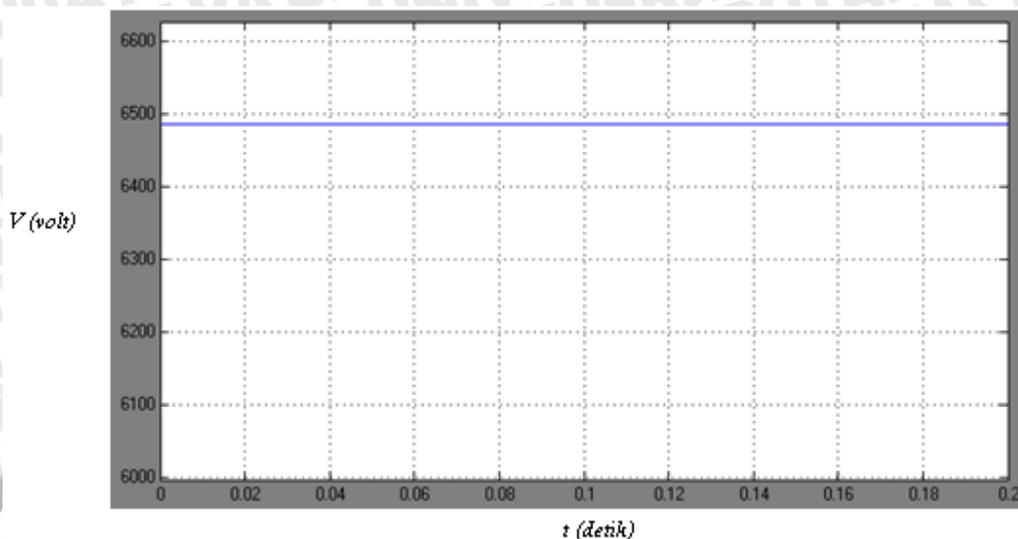
Gambar 4.4 Grafik Daya Aktif P, Daya Reaktif Q, dan Faktor Daya di Bus 6.6 kV Hasil Simulasi Matlab Saat Faktor Daya Terendah

4.2.2. Simulasi Kondisi Sistem di Feeder Trafo 1 150/6.6 kV untuk Beban dengan Faktor Daya Tertinggi

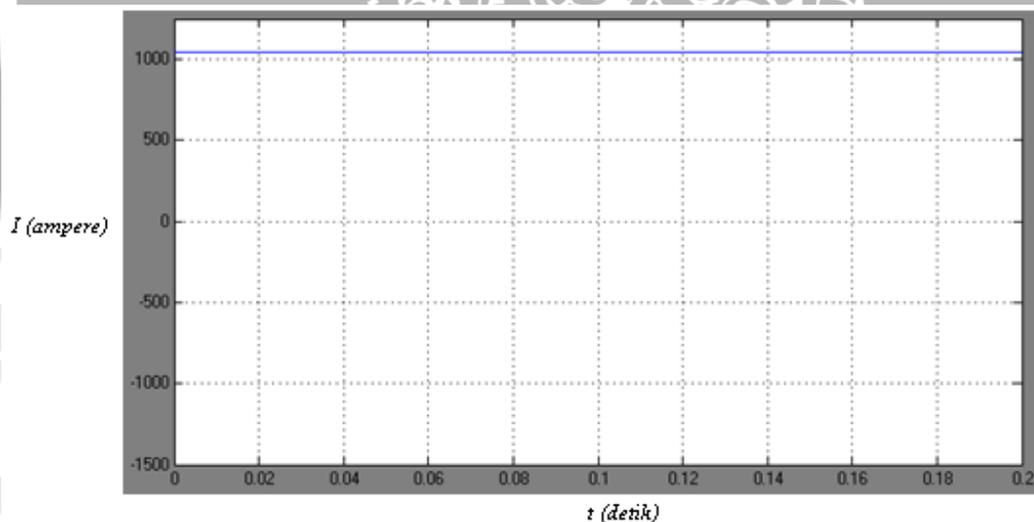
Simulasi kondisi sistem di feeder trafo 1 150/6.6 kV pada saat faktor daya beban bernilai tertinggi ini juga bertujuan untuk mengetahui nilai daya aktif, daya reaktif, faktor daya, tegangan dan arus di bus 6.6 kV. Sistem yang disimulasikan terdiri dari bagian-bagian yang tidak berbeda dengan simulasi sistem saat faktor daya terendah yaitu sumber tegangan 150 kV, Transformator 21 MVA 150/6.6 kV, impedansi saluran, alat pengukur tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya, dan beban yang terhubung di bus 6.6 kV. Pada simulasi ini beban dirubah dan disesuaikan dengan kondisi beban saat faktor dayanya tertinggi yaitu 0.918. Rangkaian simulasi ditunjukkan pada gambar 4.1.

Dari rangkaian simulasi pada gambar 4.1 diperoleh hasil simulasi berupa data daya aktif, daya reaktif, faktor daya, tegangan, dan arus di bus 6.6 kV. Grafik dari tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya ditunjukkan pada gambar 4.5, 4.6, dan 4.7. Pada gambar 4.5 grafik tegangan menunjukkan nilai tegangan sebesar 6487 V. Pada gambar 4.6 grafik arus menunjukkan nilai arus sebesar 1048 A. Dan pada gambar 4.7 grafik daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya menunjukkan nilai yaitu

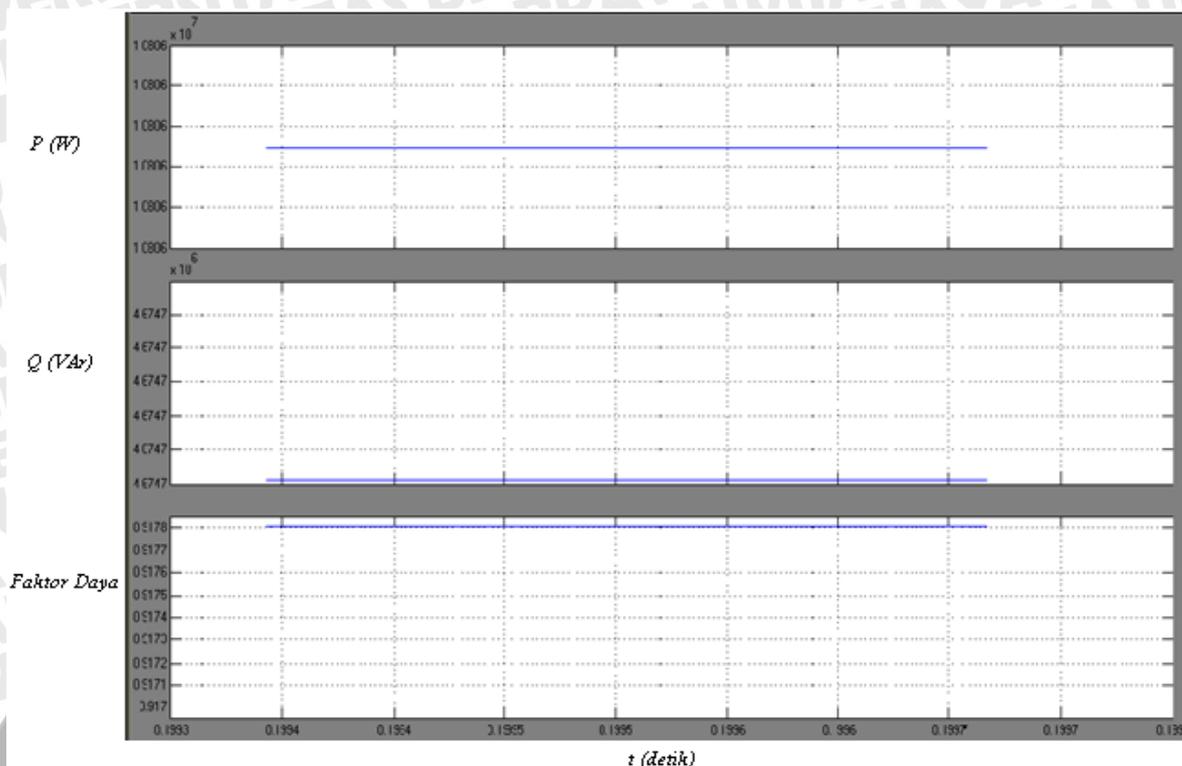
10810 kW, 4675 kVAr, dan 0.918. Grafik pada gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 menunjukkan nilai yang konstan, hal tersebut dikarenakan beban yang terpasang di bus 6.6 kV pada simulasi digunakan beban konstan sebesar 10810 kW dan 4675 kVAr.



Gambar 4.5 Grafik Tegangan di Bus 6.6 kV Hasil Simulasi Matlab Saat Faktor Daya Tertinggi



Gambar 4.6 Grafik Arus di Bus 6.6 kV Hasil Simulasi Matlab Saat Faktor Daya Tertinggi



Gambar 4.7 Grafik Daya Aktif P, Daya Reaktif Q, dan Faktor Daya di Bus 6.6 kV Hasil Simulasi Matlab Saat Faktor Daya Tertinggi

Dari hasil simulasi sistem pada gambar 4.1 pada kondisi faktor daya terendah maupun tertinggi didapatkan data-data dari masing-masing simulasi kondisi sistem. Sehingga dari data-data tersebut dapat dibandingkan antara data tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya dari tiap sistem dengan kondisi beban yang berbeda yaitu kondisi saat faktor daya terendah dan tertinggi. Perbandingan data-data hasil simulasi tersebut ditunjukkan pada tabel 4.1. Data-data yang telah diperoleh tersebut digunakan untuk menentukan kapasitas kapasitor dan reaktor dari kompensator *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*.

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Matlab di Bus 6.6 kV

Parameter	Faktor Daya	
	Terendah	Tertinggi
Tegangan (V)	6486	6487
Arus (A)	996.4	1048
Daya Aktif (kW)	10120	10810
Daya Reaktif (kVAr)	4789	4675
Faktor Daya	0.903	0.918

4.3 Perencanaan Kapasitas Kapasitor Tetap (*Fixed Capacitor*)

Dalam meningkatkan faktor daya harus diperhatikan besarnya derajat kompensasi daya reaktif yang akan diterapkan dalam sistem. Besarnya derajat kompensasi berkaitan dengan besarnya reaktansi kapasitif dari kapasitor bank yang akan dipasang. Derajat kompensasi sebesar 100% harus dihindari karena dapat menimbulkan resonansi. Begitu juga derajat yang dekat dengan 100% juga berbahaya, karena bila frekuensi turun, maka derajat kompensasi akan mendekati 100% sehingga akan terjadi resonansi. Besar derajat kompensasi dalam praktek berkisar antara 40% sampai 60% (Hutauruk, T.S., Ir., 1985).

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C}$$

$$Q_L = \frac{V^2}{X_L}$$

Jika derajat kompensasi sebesar 100% maka $Q_C = Q_L$, dengan demikian

$$\frac{1}{X_C} = \frac{1}{X_L}$$

Q_C = Daya reaktif beban kapasitif (kVAr)

Q_L = Daya reaktif beban induktif (kVAr)

X_C = Reaktansi kapasitif (ohm)

X_L = Reaktansi induktif (ohm)

Penentuan besar kompensasi daya reaktif Q_C (kVAr) menggunakan data beban pada kondisi faktor daya terendah yaitu 0.903. Besar daya aktif P dan daya reaktif Q_L pada kondisi ini berturut-turut sebagai berikut yaitu 10120 kW dan 4789 kVAr.

Untuk derajat kompensasi sebesar 60%, maka Q_C sebagai berikut:

$$Q_C = 60\% Q_L = 0.6 \cdot 4789 = 2873.4 \text{ kVAr}$$

Sehingga nilai faktor daya yang baru yaitu

$$pf = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{Q_L - Q_C}{P} \right) \right\} = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{4789 - 2873.4}{10120} \right) \right\} = 0.983$$

Untuk derajat kompensasi sebesar 50%, maka Q_C sebagai berikut:

$$Q_C = 50\% Q_L = 0.5 \cdot 4789 = 2394.5 \text{ kVAr}$$

Sehingga nilai faktor daya yang baru yaitu

$$pf = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{Q_L - Q_C}{P} \right) \right\} = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{4789 - 2394.5}{10120} \right) \right\} = 0.973$$

Untuk derajat kompensasi sebesar 40%, maka Q_C sebagai berikut:

$$Q_C = 40\% Q_L = 0.4 \cdot 4789 = 1915.6 \text{ kVAr}$$

Sehingga nilai faktor daya yang baru yaitu

$$pf = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{Q_L - Q_C}{P} \right) \right\} = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{4789 - 1915.6}{10120} \right) \right\} = 0.962$$

Dalam menentukan derajat kompensasi antara 40% sampai 60% maka beban yang terpasang di bus 6.6 kV saat kondisi faktor daya tertinggi yaitu 0.918 dapat dijadikan pertimbangan. Karena dengan meningkatnya faktor daya maka dimungkinkan terjadi penurunan nilai daya reaktif Q_L . Sehingga penurunan Q_L dapat semakin meningkatkan derajat kompensasi dengan nilai kompensasi Q_C yang tetap.

Saat faktor daya tertinggi 0.918, besar daya aktif dan daya reaktif yaitu 10810 kW dan 4675 kVAr. Dengan mempertahankan nilai kompensasi Q_C pada kondisi faktor daya 0.903 dan menerapkan Q_C tersebut pada kondisi faktor daya 0.918, maka terjadi perubahan derajat kompensasi sebagai berikut,

$$\text{derajat kompensasi 60\% akan meningkat menjadi } \frac{Q_C}{Q_L} = \frac{2873.4}{4675} \times 100\% = 62\%,$$

$$\text{derajat kompensasi 50\% akan meningkat menjadi } \frac{Q_C}{Q_L} = \frac{2394.5}{4675} \times 100\% = 52\%, \text{ dan}$$

$$\text{derajat kompensasi 40\% akan meningkat menjadi } \frac{Q_C}{Q_L} = \frac{1915.6}{4675} \times 100\% = 41\%.$$

Perubahan frekuensi fundamental sistem juga harus dijadikan pertimbangan pemilihan besarnya kompensasi. Jika frekuensi turun, maka akan diikuti juga dengan peningkatan derajat kompensasi. Misalkan derajat kompensasi yang digunakan sebesar 62%, dengan demikian

$$\frac{1}{X_C} = 0.62 \frac{1}{X_L}$$

$$\omega C = 0.62 \frac{1}{\omega L}$$

$$\omega c \cdot \omega L = 0.62$$

Bila frekuensi turun dari 50 Hz menjadi 48.5 Hz, $\omega' = \frac{48.5}{50} \omega = 0.97\omega$, maka

$$\omega' L \cdot \omega' C = 0.62$$

$$0.97\omega c \cdot 0.97\omega L = 0.62$$

$$\omega c \cdot \omega L = \frac{0.62}{0.97^2} = 0.66 = 66\%$$

Bila frekuensi turun dari 50 Hz menjadi 47.5 Hz, $\omega' = \frac{47.5}{50} \omega = 0.95\omega$,

$$\omega' L \cdot \omega' C = 0.62$$

$$0.95\omega c \cdot 0.95\omega L = 0.62$$

$$\omega c \cdot \omega L = \frac{0.62}{0.95^2} = 0.69 = 69\%$$

maka derajat kompensasi 62% meningkat menjadi 69% pada frekuensi 47.5 Hz.

Peningkatan faktor daya pada kondisi beban dengan faktor daya tertinggi 0.918 dan derajat kompensasi sebesar 69% sebagai berikut:

$$Q_C = 69\% Q_L = 0.69 \cdot 4675 = 3225.75 \text{ kVAr}$$

$$pf = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{Q_L - Q_C}{P} \right) \right\} = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{4675 - 3225.75}{10810} \right) \right\} = 0.991$$

dengan perubahan derajat kompensasi menjadi 69% mengakibatkan kenaikan faktor daya menjadi 0.991. Dengan demikian berdasarkan pertimbangan yang telah dijabarkan sebelumnya secara matematis, maka derajat kompensasi yang dipilih untuk meningkatkan faktor daya yaitu sebesar 60%. Sehingga kapasitas kompensator daya reaktif Q_C sebesar 2873.4 kVAr.

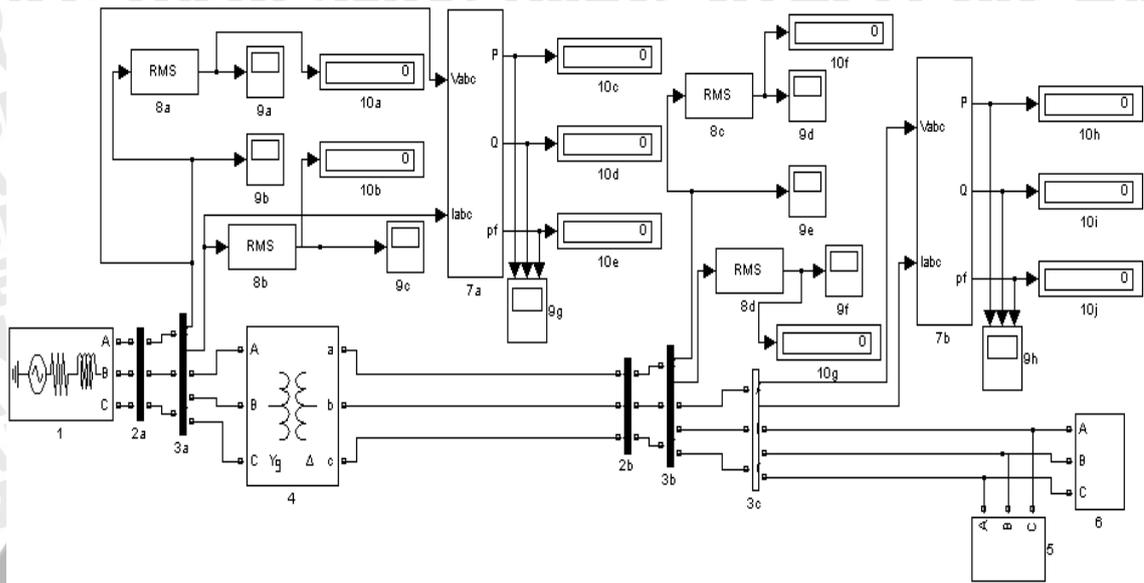
4.4 Simulasi Kondisi Sistem dengan Kompensasi Menggunakan *Fixed Capacitor*

Pada simulasi kondisi sistem di feeder trafo 1 pada kondisi beban dengan faktor daya terendah maupun tertinggi yang telah dilakukan sebelumnya telah diperoleh data-data yang dapat digunakan untuk menentukan kapasitas kompensator daya reaktif berupa kapasitor tetap atau *fixed capacitor*. Rangkaian sistem yang disimulasikan sama dengan rangkaian sistem pada gambar 4.1. Namun pada rangkaian ini ditambahkan *fixed capacitor* yang terhubung secara paralel dengan beban pada bus 6.6kV. Kapasitas kompensator daya reaktif Q_C yang dipasang sebesar 2873.4 kVAr.

Simulasi dengan menggunakan *fixed capacitor* dilakukan dua kali. Simulasi pertama dilakukan untuk kondisi sistem pada saat faktor daya terendah 0.903. Rangkaian simulasi ditunjukkan pada gambar 4.8. Simulasi kedua dilakukan untuk kondisi sistem pada saat faktor daya tertinggi 0.918. Rangkaian simulasi ditunjukkan pada gambar 4.8. Dari hasil simulasi ini akan diperoleh data dari masing-masing kondisi. Data-data tersebut kemudian dianalisis untuk mendapatkan kesimpulan mengenai penerapan *fixed capacitor* pada sistem tersebut.

Berdasarkan simulasi kondisi sistem dengan kompensasi menggunakan *fixed capacitor* pada kondisi faktor daya awal terendah 0.903, diperoleh data-data tegangan 6542 V, arus 926.2 A, daya aktif 10290 kW, daya reaktif 2049 kVAr, dan faktor daya 0.981 yang ditampilkan pada grafik pada gambar 4.9, 4.10, dan 4.11, serta ditunjukkan pada tabel 4.2 dan 4.3. Grafik pada gambar 4.9, 4.10, dan 4.11 tersebut menunjukkan

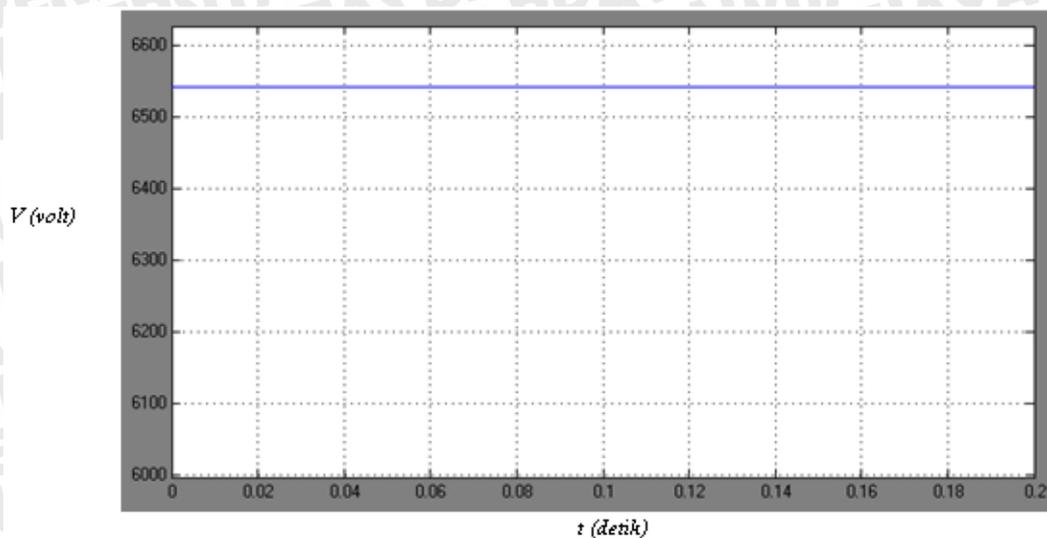
nilai yang konstan karena beban yang terpasang di bus 6.6 kV pada simulasi adalah beban konstan sebesar 10120 kW dan 4789 kVAr.



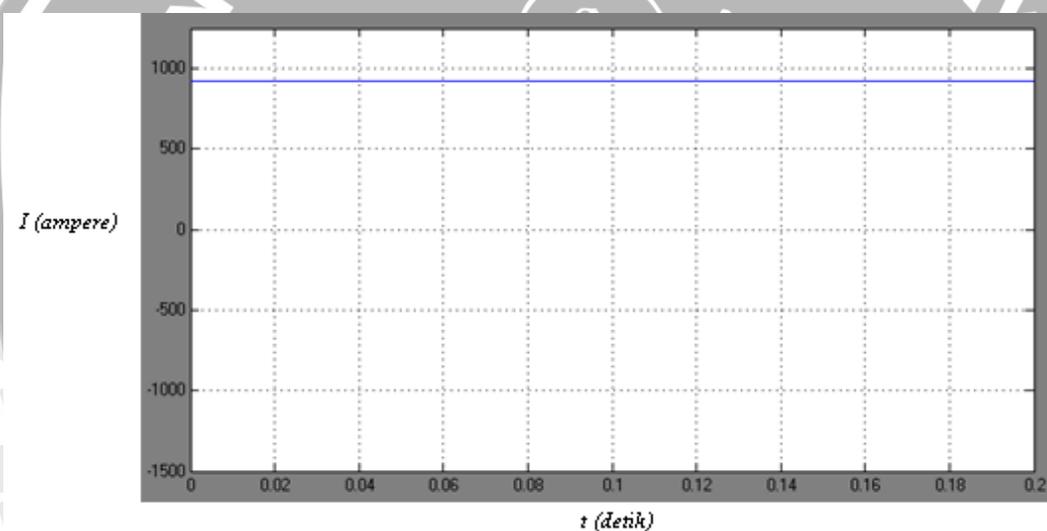
Gambar 4.8 Simulasi Kondisi Sistem dengan Kompensasi Menggunakan *Fixed Capacitor*

Keterangan gambar 4.9:

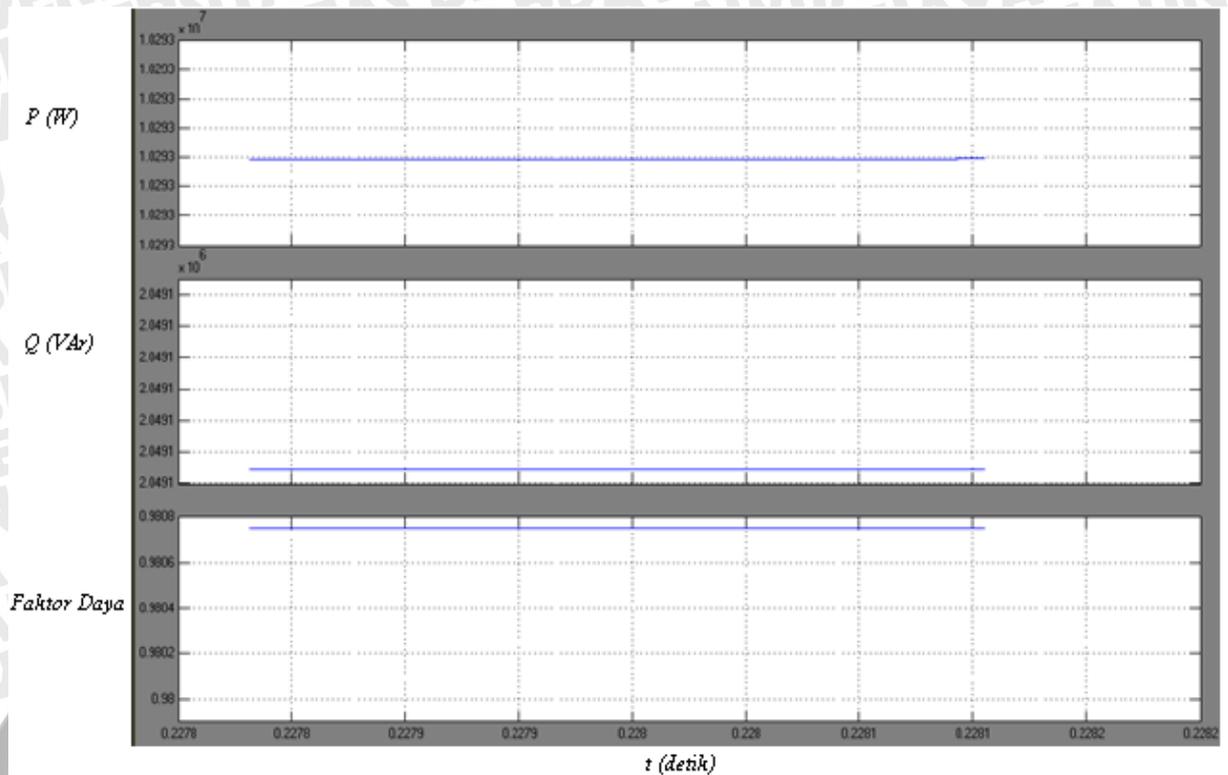
- 1: Sumber tegangan tiga fasa 150 kV
- 2a : Bus 150 kV
- 2b : Bus 6.6 kV
- 3a, 3b, dan 3c : Alat ukur tegangan dan arus tiga fasa
- 4 : Trafo tiga fasa Y- Δ 150/6.6 kV
- 5 : Fixed Capacitor
- 6 : Blok beban
- 7a dan 7b : Alat ukur P , Q , dan faktor daya tiga fasa
- 8a s.d. 8d : Root mean square (RMS)
- 9a s.d. 9h : Scope
- 10a s.d. 10j : Numeric Display



Gambar 4.9 Grafik Tegangan di Bus 6.6 kV saat Kondisi Faktor Daya Awal 0.903 Hasil Simulasi Matlab



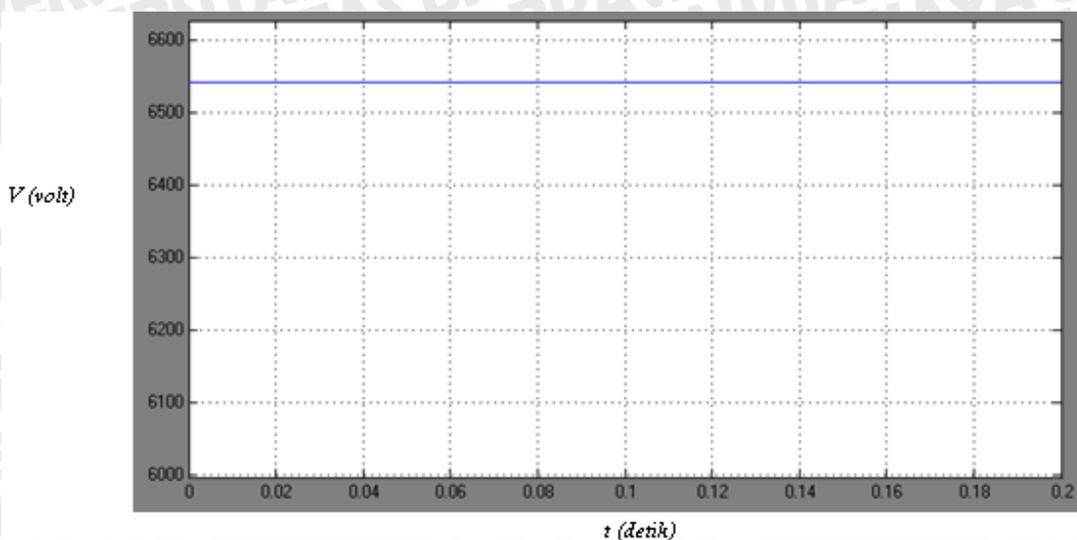
Gambar 4.10 Grafik Arus di Bus 6.6 kV saat Kondisi Faktor Daya Awal 0.903 Hasil Simulasi Matlab



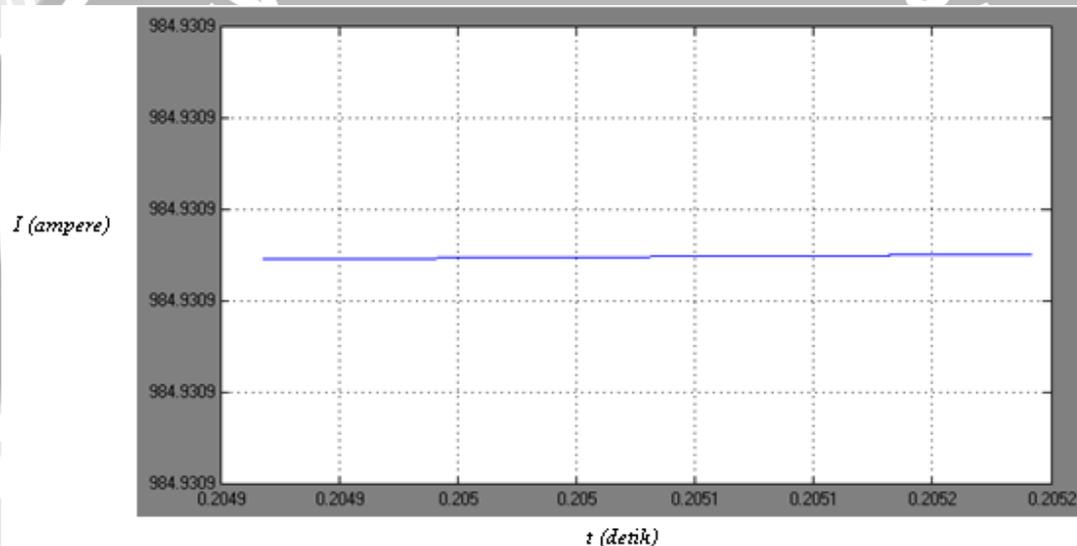
Gambar 4.11 Grafik Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Faktor Daya di Bus 6.6 kV saat Kondisi Faktor Daya Awal 0.903 Hasil Simulasi Matlab

Pada simulasi kedua yang ditunjukkan pada gambar 4.8 bertujuan untuk mendapatkan data-data tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya di bus 6.6 kV pada kondisi faktor daya awal sistem tertinggi 0.918. Kapasitas kompensator yang digunakan sama seperti kompensator yang digunakan pada simulasi menggunakan *fixed capacitor* yang pertama.

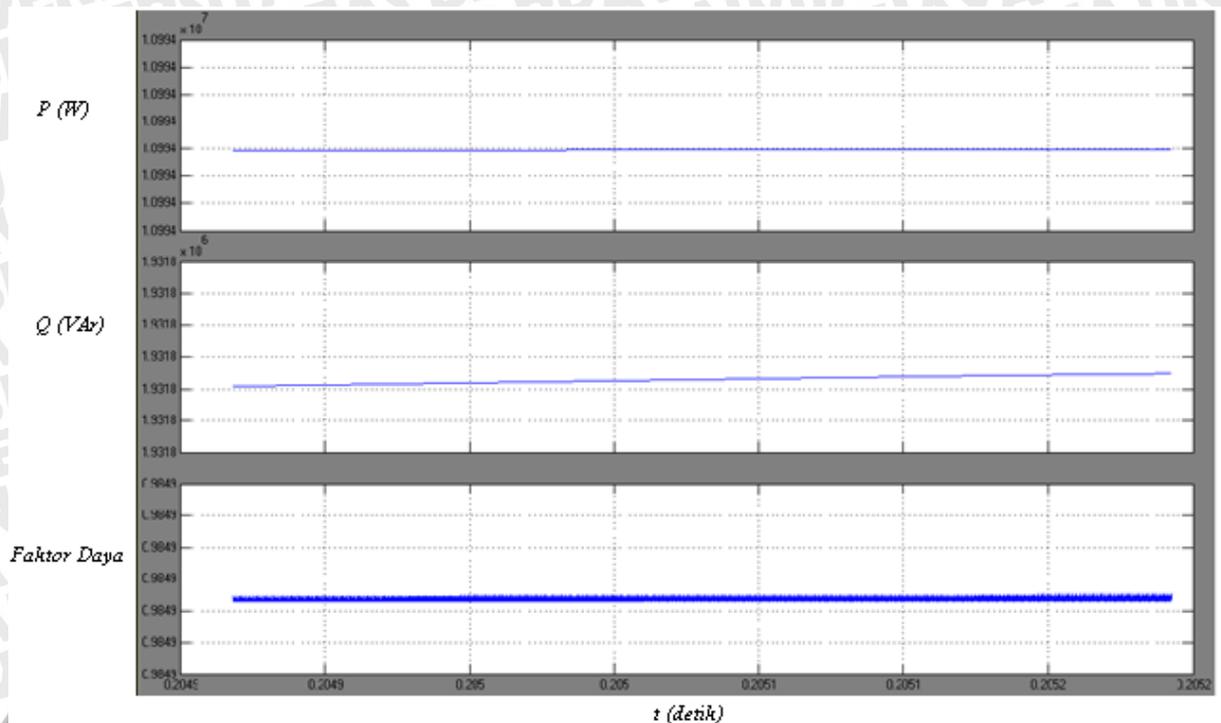
Data-data yang diperoleh dari hasil simulasi ditampilkan dengan grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.12, 4.13, dan 4.14 yaitu tegangan sebesar 6543 V, arus 984.9 A, daya aktif 10990 kW, daya reaktif 1932 kVAr, dan faktor daya sebesar 0.985. Selain itu data tersebut juga ditunjukkan pada tabel 4.2 dan 4.3. Grafik pada gambar 4.12, 4.13, dan 4.14 tersebut menunjukkan nilai yang konstan karena beban yang terpasang di bus 6.6 kV pada simulasi adalah beban konstan sebesar 10810 kW dan 4675 kVAr.



Gambar 4.12 Grafik Tegangan di Bus 6.6 kV saat Kondisi Faktor Daya Awal 0.918 Hasil Simulasi Matlab



Gambar 4.13 Grafik Arus di Bus 6.6 kV saat Kondisi Faktor Daya Awal 0.918 Hasil Simulasi Matlab



Gambar 4.14 Grafik Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Faktor Daya di Bus 6.6 kV saat Kondisi Faktor Daya Awal 0.918 Hasil Simulasi Matlab

Pada simulasi sistem menggunakan *fixed capacitor* yang pertama, pemasangan kompensator daya reaktif Q_C sebesar 2873.4 kVAr telah berhasil mengurangi daya reaktif menjadi 2049 kVAr. Sehingga dengan penurunan daya reaktif tersebut mengakibatkan kenaikan faktor daya di bus 6.6 kV dari 0.903 menjadi 0.981. Sedangkan pada simulasi kedua, dengan memasang kompensator berkapasitas sama seperti kompensator pada simulasi pertama, telah berhasil mengurangi daya reaktif menjadi 1932 kVAr dan mampu meningkatkan faktor daya di bus 6.6 kV dari 0.918 menjadi 0.985.

Pemasangan kompensator *fixed capacitor* sebesar 2873.4 kVAr pada sistem dengan kondisi faktor daya yang berbeda memberikan hasil peningkatan faktor daya yang berbeda. Hasil simulasi tersebut dapat memberikan kesimpulan bahwa *fixed capacitor* tidak bisa mempertahankan nilai faktor daya sistem jika terjadi perubahan kondisi beban seperti perubahan faktor daya beban. Hasil simulasi tersebut ditunjukkan pada tabel 4.2.

Berikut ini dijelaskan analisis mengenai pengaruh pemasangan *fixed capacitor* pada sistem distribusi dengan kondisi beban yang berubah terhadap nilai faktor daya. Daya aktif P dan daya reaktif Q di bus 6.6 kV saat faktor daya 0.903 yaitu 10120 kW dan 4789 kVAr. Dengan memberikan kompensasi Q_C sebesar 2873.4 maka faktor dayanya pf menjadi,

$$pf = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{Q - Q_C}{P} \right) \right\} = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{4789 - 2873.4}{10120} \right) \right\} = 0.982$$

Apabila kondisi beban berubah dengan daya aktif P dan daya reaktif Q sebesar 10810 kW dan 4675 kVAr, maka faktor daya menjadi,

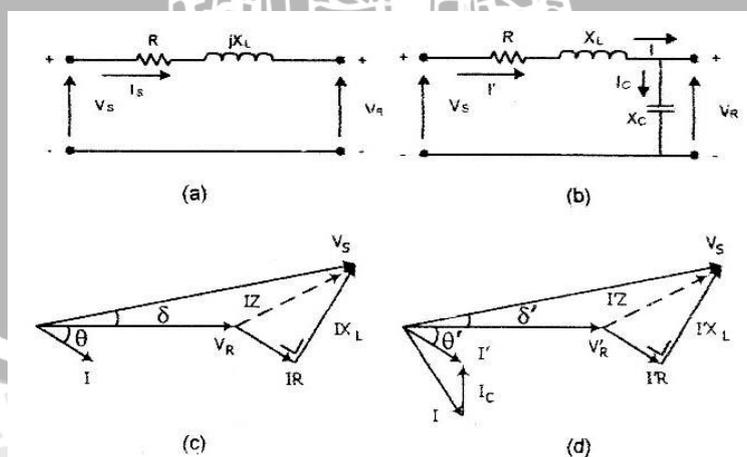
$$pf = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{Q - Q_C}{P} \right) \right\} = \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{4675 - 2873.4}{10810} \right) \right\} = 0.986$$

Berdasarkan hasil analisis yang sesuai dengan hasil simulasi, maka kesimpulan bahwa pemasangan *fixed capacitor* pada bus 6.6 kV tidak dapat mempertahankan faktor daya pada kondisi beban yang berubah adalah benar.

Tabel 4.2 Data Hasil Simulasi Matlab Sistem dengan *Fixed Capacitor* di Bus 6.6 kV

Parameter	Faktor Daya Awal	
	0.903	0.918
Tegangan (V)	6542	6543
Arus (A)	926.2	984.9
Daya Aktif (kW)	10290	10990
Daya Reaktif (kVAr)	2049	1932
Faktor Daya	0.981	0.985

Tabel 4.3 memberikan data hasil simulasi yang menunjukkan nilai tegangan, arus, daya aktif, dan daya reaktif pada saat kondisi sistem tanpa kapasitor dan sistem dengan kapasitor. Dari tabel tersebut dapat dibandingkan nilai dari parameter-parameter tiap kondisi yang berbeda. Berdasarkan tabel tersebut pemasangan kompensator *fixed capacitor* berakibat pada kenaikan tegangan dan penurunan arus di bus 6.6 kV.



Gambar 4.15 Pemasangan *Fixed Capacitor* dan Pengaruhnya Terhadap Tegangan

Sumber: Kennedy, Barry, 1995

Gambar 4.15 (a) dan (b) menunjukkan rangkaian listrik tanpa kapasitor dan dengan kapasitor. Pengaruh pemasangan kapasitor terhadap tegangan disisi terima V_R

ditunjukkan pada gambar 4.15 (c) dan (d). Tegangan sisi terima V_R akan meningkat jika kapasitor X_C dipasang.

Pemasangan kompensator juga menyebabkan penurunan nilai daya reaktif kVAr. Dengan nilai daya aktif kW yang cenderung konstan ataupun mengalami sedikit perubahan, maka besar daya kompleks $S=P+Q$ (kVA) juga ikut menurun. Penurunan kVA beban menyebabkan penurunan arus I (ampere), $I=S/V$.

Tabel 4.3 Data Hasil Simulasi Matlab Sistem Tanpa Fixed Capacitor dan dengan Fixed Capacitor di Bus 6.6 kV

Parameter	Faktor Daya Terendah		Faktor Daya Tertinggi	
	0.903	0.981	0.918	0.985
Tegangan (V)	6486	6542	6487	6543
Arus (A)	996.4	926.2	1048	984.9
Daya Aktif (kW)	10120	10290	10810	10990
Daya Reaktif (kVAr)	4789	2049	4675	1932

4.5 Perencanaan Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)

Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR) merupakan salah satu tipe dari *Static VAR Compensator (SVC)* yang digunakan untuk kompensasi daya reaktif pada sistem jaringan. *FC-TCR* ini terdiri dari kombinasi antara kapasitor tetap dengan rangkaian induktor yang ditrigger oleh dua buah thyristor antiparalel. *FC-TCR* memberikan kompensasi daya reaktif yang halus dengan cara mengatur arus yang melalui inductor. Sehingga *FC-TCR* mampu memberikan nilai kompensasi daya reaktif yang sesuai dengan kebutuhan sistem jaringan yang memiliki karakteristik daya reaktif fluktuatif.

Penentuan kebutuhan daya reaktif yang digunakan untuk kompensasi *FC-TCR*, yaitu penentuan nilai kapasitansi kapasitor tetap (*Fixed Capacitor*) dan nilai induktansi inductor pada *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*, didasarkan pada data aliran daya di bus 6.6kV pada feeder trafo 1 150/6.6kV. Data aliran daya yang dijadikan acuan adalah data pada kondisi faktor daya terendah 0.903 dan kondisi faktor daya tertinggi 0.918. Data aliran daya di bus 6.6kV feeder trafo 1 150/6.6kV sebagai berikut.

Pada saat faktor daya terendah 0.903 besar aliran daya adalah:

- Daya aktif (P) = 10120 kW
- Daya reaktif (Q) = 4789 kVAr
- Tegangan (V) = 6486 V
- Arus (I) = 996.4 A

Pada saat faktor daya terendah 0.918 besar aliran daya adalah:

- Daya aktif (P) = 10810 kW
- Daya reaktif (Q) = 4675 kVAr
- Tegangan (V) = 6487 V
- Arus (I) = 1048 A

4.5.1. Penentuan Kapasitas Kapasitor Tetap (*Fixed Capacitor*)

Perhitungan penentuan kapasitas kapasitor tetap (*Fixed Capacitor*) pada sistem kompensasi *FC-TCR* mengacu pada data aliran daya pada kondisi faktor daya di titik pusat beban (bus 6.6kV feeder trafo 1 150/6.6kV) terendah yaitu sebesar 0.903. Dengan demikian akan diperoleh besar kebutuhan daya reaktif kVAr tertinggi.

Berdasarkan perhitungan pada perencanaan kapasitas kapasitor tetap (*Fixed Capacitor*) yaitu pada sub pembahasan 4.3, maka telah diperoleh besar kebutuhan daya reaktif kVAr tertinggi sebesar 2873,4 kVAr untuk menaikkan faktor daya menjadi 0.980.

4.5.2. Penentuan Kapasitas Induktor pada *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*

Untuk memperoleh kapasitas induktor pada *TCR*, maka terlebih dahulu harus diketahui selisih antara kebutuhan daya reaktif kVAr yang tertinggi dengan yang terendah. Kebutuhan daya reaktif yang tertinggi untuk meningkatkan faktor daya hingga 0.980 diperoleh dari perhitungan berdasarkan data aliran daya di titik pusat beban di bus 6.6kV feeder trafo 1 pada kondisi faktor daya terendah 0.903. Dan kebutuhan daya reaktif terendah untuk meningkatkan faktor daya hingga 0.980 diperoleh dari perhitungan berdasarkan data aliran daya di titik yang sama saat kondisi faktor dayanya mencapai nilai tertinggi yaitu 0.918.

Kebutuhan daya reaktif kVAr (Q_c) tertinggi sebesar 2873.4 kVAr. Sedangkan kebutuhan daya reaktif kVAr (Q_c) terendah diperoleh sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Q_c &= P\{\tan(\cos^{-1}0.918) - \tan(\cos^{-1}0.980)\} \\ &= 10810 \text{ kW} \{\tan(\cos^{-1}0.918) - \tan(\cos^{-1}0.980)\} \\ &= 2475.5 \text{ kVAr} \end{aligned}$$

Setelah kebutuhan daya reaktif tertinggi dan terendah diperoleh, maka langkah selanjutnya adalah mendapatkan nilai kapasitas induktor (Q_L) kVAr yang nilainya sama

dengan selisih antara kebutuhan daya reaktif (Q_c) kVAr tertinggi dengan terendah.

Berikut ini perhitungan untuk mendapatkan nilai kapasitas induktor (Q_L) kVAr.

$$Q_L = Q_{c \text{ tertinggi}} - Q_{c \text{ terendah}} = 2873.4 - 2475.5 = 397.9 \text{ kVAr}$$

$$X_L = \frac{3V_L^2}{Q_L} = \frac{3 \cdot 6600^2}{397900} = 328.42 \Omega$$

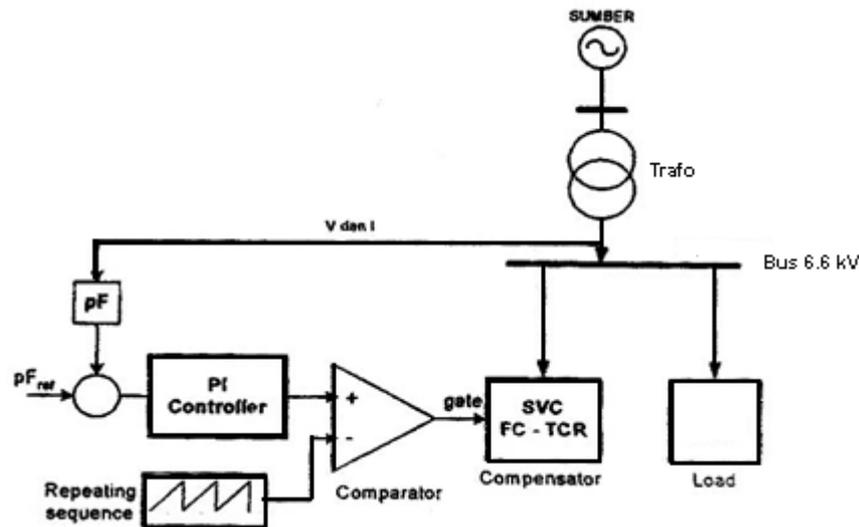
$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{328.42}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 1.096 \text{ H}$$

Sehingga kapasitas induktor yang digunakan sebagai reactor pada TCR sebesar 1.096 H untuk memberikan kompensasi daya reaktif sebesar 397.9 kVAr.

4.5.3. Perancangan Sistem Kontrol

Sistem kontrol ini bertujuan untuk mengatur besar arus yang melalui induktor pada *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*. Pada sistem kontrol ini digunakan *controller proportional integral (PI)*. Berikut ini parameter control berdasarkan data di bus 6.6kV feeder trafo 1 150/6.6kV.

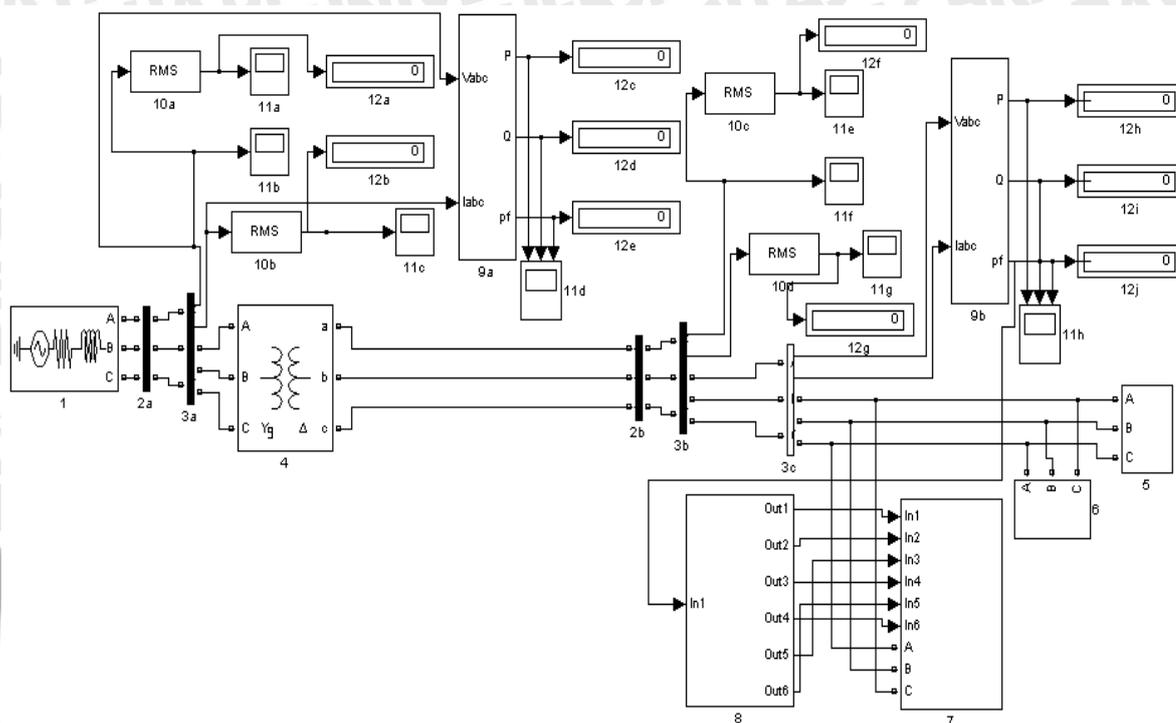
- Tegangan bus = 6.6kV dan frekuensi = 50 Hz
- Daya aktif (P) saat faktor daya 0.903 = 10120 kW dan daya aktif (P) saat faktor daya 0.918 = 10810 kW
- Daya reaktif (Q) saat faktor daya 0.903 = 4789 kVAr dan daya reaktif (Q) saat faktor daya 0.918 = 4675 kVAr
- Faktor daya terendah 0.903 dan faktor daya tertinggi 0.918
- Target faktor daya yang direncanakan yaitu 0.980
- Kebutuhan daya reaktif $Q_c = 2873.4$ kVAr dan $Q_L = 397.9$ kVAr
- Sudut penyalan thyristor yaitu $90^\circ < \alpha < 180^\circ$



Gambar 4.16 Skema Penerapan Controller PI dan FC-TCR
 Sumber: Hingorani, N.G. & Gyugyi, L., IEEE Press Book., 2000

Berdasarkan gambar 4.16 skema penerapan *Controller PI* dan *FC-TCR*, arus dan tegangan yang memiliki sudut fasa sebagai input, yang kemudian sebagai fungsi cosinus akan keluar besaran faktor daya. Referensi faktor daya diset 0.980 masuk pada *summing junction* yang akan menghasilkan keluaran berupa perbedaan (*error*) antara setting faktor daya dengan faktor daya hasil pengukuran. *Error* ini sebagai masukan dari kontroler PI. Keluaran dari kontroler PI dimasukkan ke rangkaian pembangkit pulsa untuk mengendalikan *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*. Agar kontroler dapat mengendalikan TCR sesuai yang diinginkan maka nilai konstanta proporsional K_p dan konstanta integral K_i harus diatur terlebih dahulu. Rangkaian pembangkit pulsa ini digunakan untuk memberikan trigger pada kedua gate thyristor pada *TCR*. Adanya trigger gate ini digunakan untuk mengatur besar kecilnya sudut penyalan (α) *TCR*. Besar kecilnya sudut penyalan (α) *TCR* adalah $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ agar kedua gate bekerja secara simetri bergantian. Berdasarkan pengaturan sudut penyalan inilah arus yang melalui induktor pada *TCR* diatur sehingga *TCR* bekerja sebagai kompensator daya reaktif. Sehingga kontroler PI sebagai pengendali *TCR* dapat memperbaiki faktor daya sesuai dengan nilai yang diinginkan yaitu 0.980 (*lagging*). Skema penerapan kontroler PI dan *FC-TCR* tersebut kemudian diaplikasikan dalam rangkaian simulasi dengan menggunakan *software Simulink Matlab*.

4.6 Simulasi Kondisi Sistem dengan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*



Gambar 4.17 Simulasi Kondisi Sistem dengan Kompensasi Menggunakan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*

Keterangan gambar 4.17:

- 1: Sumber tegangan tiga fasa 150 kV
- 2a : Bus 150 kV
- 2b : Bus 6.6 kV
- 3a, 3b, dan 3c : Alat ukur tegangan dan arus tiga fasa
- 4 : Trafo tiga fasa Y- Δ 150/6.6 kV
- 5 : Blok beban
- 6 : Fixed capacitor
- 7 : Blok TCR (*Thyristor Controlled Reactor*)
- 8 : Blok kontrol
- 9a dan 9b : Alat ukur P , Q , dan faktor daya tiga fasa
- 10a s.d. 10d : Root mean square (RMS)
- 11a s.d. 11h : Scope
- 12a s.d. 12j : Numeric Display

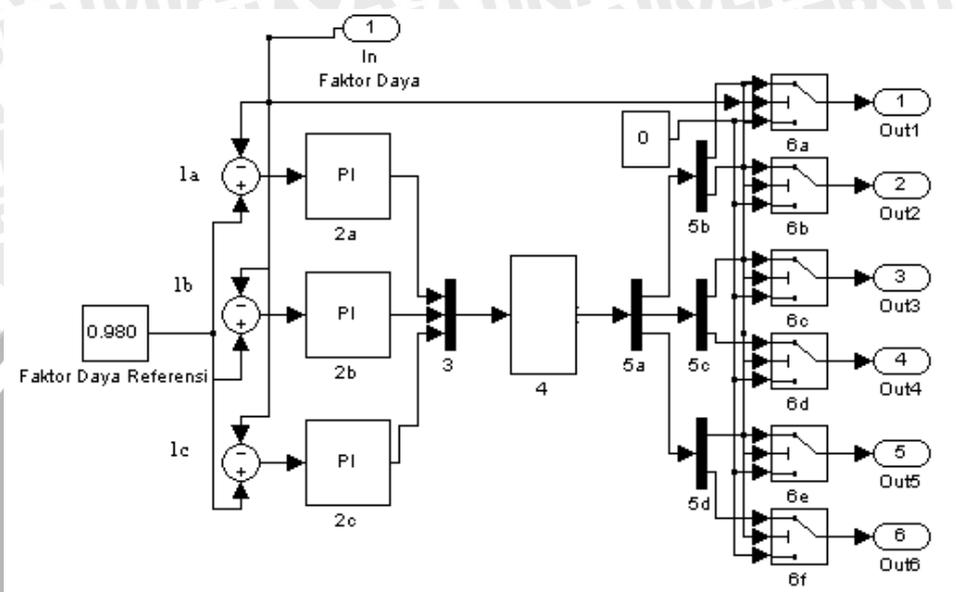
Untuk mengamati performa *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* terhadap peningkatan faktor daya pada sistem distribusi 6.6 kV, maka dilakukan simulasi kondisi sistem dengan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.19. Pada rangkaian simulasi tersebut di bus 6.6 kV terpasang beban dengan kondisi faktor daya yang dapat berubah sewaktu-waktu yaitu dengan faktor daya terendah 0.903 dan faktor daya tertinggi 0.918. Untuk meningkatkan faktor daya tersebut hingga nilai yang diinginkan yaitu 0.980, maka harus dipasang *Fixed Capacitor* yang terhubung Y dengan kapasitas 2873.4 kVAr. Namun pemasangan *Fixed Capacitor* tersebut tidak mampu mempertahankan nilai faktor daya pada nilai 0.980 saat terjadi perubahan kondisi beban.

Agar nilai faktor daya tersebut tetap pada nilai yang diinginkan maka harus dipasang reactor yang dapat mengimbangi perubahan kondisi beban. Besar kompensasi daya reaktif yang diberikan oleh reactor diatur oleh kontroler sesuai dengan kebutuhan. Reactor yang dimaksud adalah *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*. Sehingga pada gambar 4.17 terdapat blok beban, *Fixed Capacitor*, blok *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*, dan blok kontrol yang terpasang pada sistem distribusi di bus 6.6 kV tersebut.

Untuk mengontrol TCR diterapkan rangkaian simulasi pengontrol yang ditunjukkan pada gambar 4.18. Pada rangkaian pengontrol ini, faktor daya di bus 6.6 kV yang terukur dan faktor daya referensi yang diset pada nilai 0.980 masuk ke *summing junction* sehingga menghasilkan keluaran berupa *error* yaitu selisih antara faktor daya terukur dengan faktor daya referensi. *Error* tersebut sebagai masukan kontroler PI dan keluarannya dimasukkan ke pembangkit pulsa yaitu PWM Generator untuk mengendalikan TCR. Keluaran atau out 1 hingga 6 tersebut berupa pulsa yang memicu gate thyristor pada blok TCR.

Pada rangkaian simulasi pengontrol TCR digunakan kontroler PI (*Proportional Integral*). Untuk mendapatkan hasil pengontrolan yang diharapkan, maka pada kontroler PI ini terdapat dua parameter yang harus diatur terlebih dahulu yaitu konstanta proporsional (K_p) dan konstanta integral (K_i). Cara mengatur nilai K_p dan K_i sebagai berikut, pertama-tama K_i diset pada nilai nol dan nilai K_p diset pada nilai tertentu. Jika pada nilai K_p tersebut tidak terjadi *overshoot* pada respon sistem, maka nilai K_p dinaikkan step demi step hingga didapatkan nilai K_p maksimal saat terjadi *overshoot*. Kemudian nilai K_p diambil dari nilai K_p maksimal sebelum terjadi *overshoot*. Setelah nilai K_p diperoleh, nilai K_i dinaikkan hingga terjadi *overshoot* sebesar 10% dan nilai K_i diambil pada kondisi terjadinya *overshoot* 10% tersebut. Dengan cara tersebut diperoleh

nilai K_p sebesar 0.2 dan nilai K_i sebesar 110. Kontroler diferensial tidak dikombinasikan dengan kontroler PI karena kerja sistem telah memenuhi target yang diinginkan dengan hanya menggunakan kontroler PI. Sehingga pada rangkaian pengontrol tersebut digunakan kontroler PI.



Gambar 4.18 Rangkaian Simulasi Pengontrol *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*

Keterangan gambar 4.18:

In faktor daya : Masukan blok kontrol berupa faktor daya terukur di bus 6.6 kV

1a, 1b, dan 1c : *Summing junction*

2a, 2b, dan 2c : Kontroler Proportional Integral (PI)

3 : Mux (Multiplex)

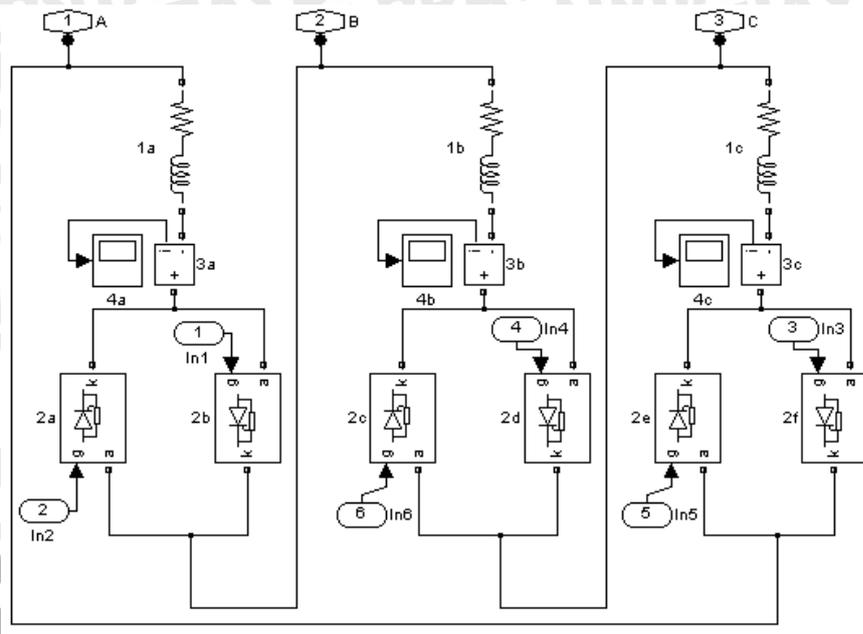
4 : PWM Generator

5a s.d. 5d : Demux

6a s.d. 6f : Switch

Out1 s.d. Out6 : Keluaran blok kontrol untuk memicu thyristor di blok TCR

Rangkaian simulasi TCR ditunjukkan pada gambar 4.19. Pada rangkaian tersebut terdapat tiga lengan yang terdiri dari induktor dan dua thyristor yang terpasang antiparalel. Ketiga lengan tersebut terhubung delta. Thyristor tersebut berfungsi sebagai saklar otomatis yang akan konduksi apabila mendapatkan catu dari rangkaian pembangkit pulsa yang ada pada rangkaian pengontrol TCR pada gambar 4.18.



Gambar 4.19 Rangkaian Simulasi *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*

Keterangan gambar 4.19:

A, B, dan C : Masukan dari saluran tiga fasa

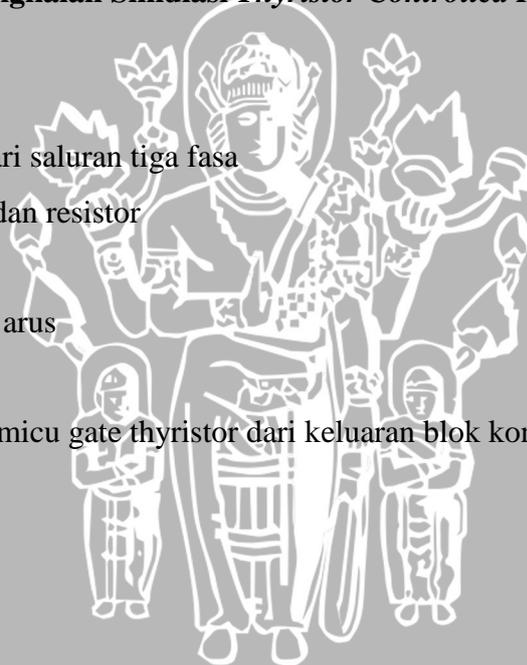
1a, 1b, dan 1c : Induktor dan resistor

2a s.d. 2f : Thyristor

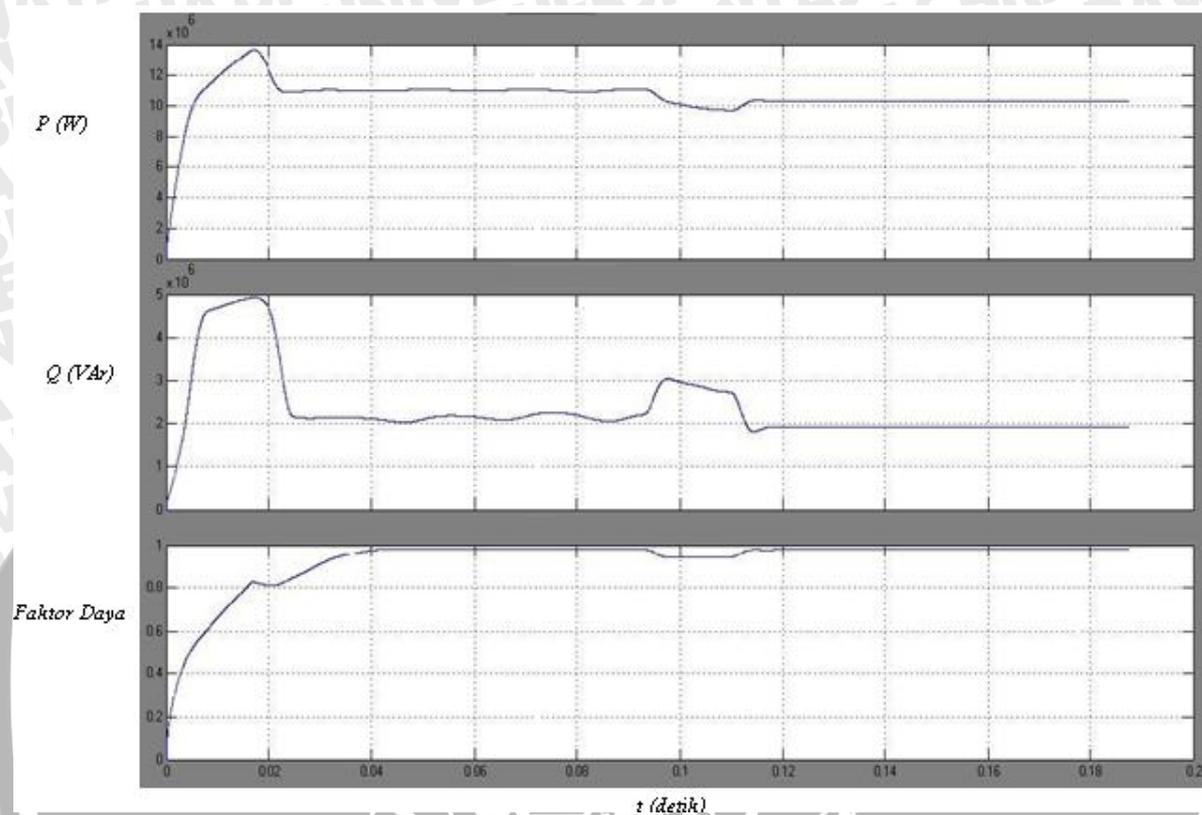
3a, 3b, dan 3c : Alat ukur arus

4a, 4b, dan 4c : Scope

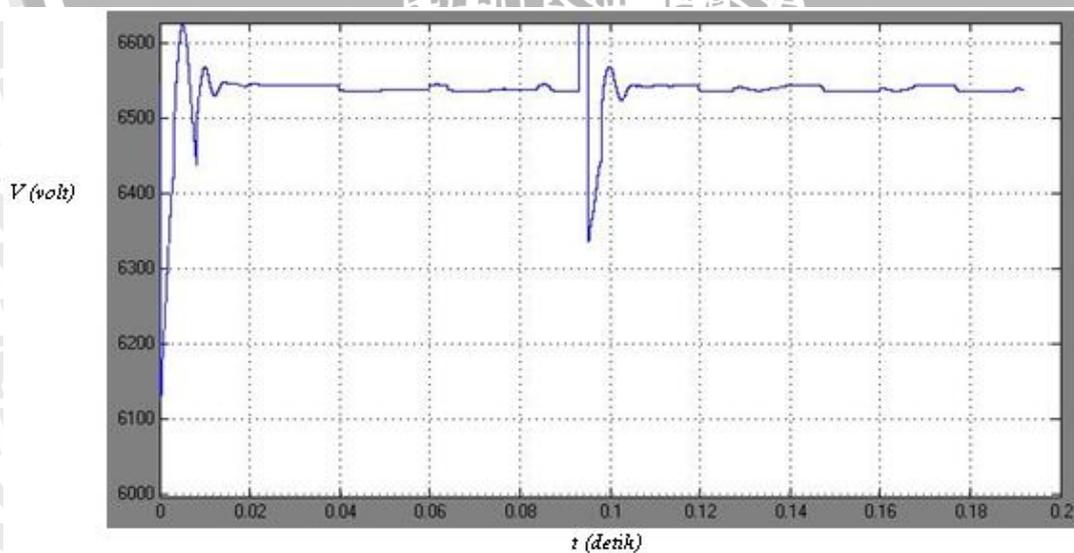
In1 s.d. In6 : Masukan pemacu gate thyristor dari keluaran blok kontrol.



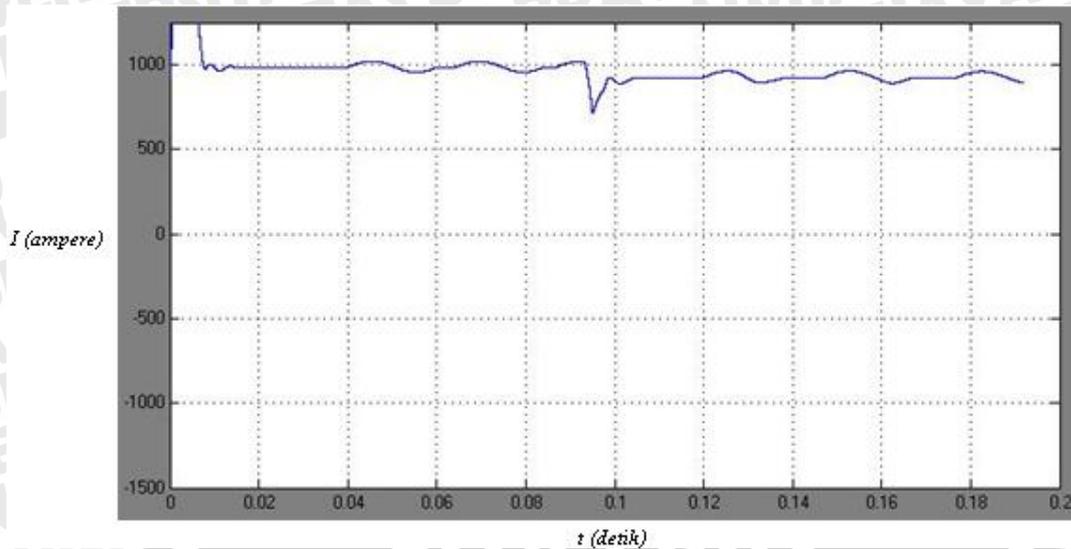
Berikut ini adalah grafik hasil simulasi *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* berdasarkan rangkaian simulasi yang ditunjukkan pada gambar 4.17.



Gambar 4.20 Grafik Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Faktor Daya di Bus 6.6 kV saat Menggunakan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*



Gambar 4.21 Grafik Tegangan di Bus 6.6 kV saat Menggunakan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*



Gambar 4.22 Grafik Arus di Bus 6.6 kV saat Menggunakan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)*

Berdasarkan grafik pada gambar 4.20 diketahui bahwa saat kondisi beban berubah pada waktu 0.1 detik, nilai faktor daya di bus 6.6 kV dapat dipertahankan. Faktor daya hasil simulasi tersebut berkisar antara 0.979 sampai 0.981. Sehingga *FC-TCR* mampu menaikkan faktor daya sistem dan juga mempertahankan nilainya pada nilai yang diinginkan yaitu 0.980 (*lagging*).

Grafik pada gambar 4.21 dan 4.22 menunjukkan grafik tegangan dan arus di bus 6.6 kV pada saat *FC-TCR* dipasang. Besar arus yang dibutuhkan beban pada bus 6.6 kV sebesar 925.4 A sampai dengan 971.4 A dengan kondisi beban yang berfluktuasi. Sedangkan tegangan di bus 6.6 kV yaitu sebesar 6538 V sampai 6544 V. Daya aktif dan daya reaktif yang dibutuhkan beban saat kondisi faktor daya awal 0.903 sebesar 10290 kW dan 1934 kVAr. Sedangkan daya aktif dan daya reaktif yang dibutuhkan beban saat kondisi faktor daya awal 0.918 sebesar 11120 kW dan 2161 kVAr. Berikut ini ditunjukkan tabel 4.4 hasil simulasi sistem dengan menggunakan kompensasi *FC-TCR*.

Tabel 4.4 Tabel Hasil Simulasi Sistem dengan *FC-TCR*

Parameter	Hasil Simulasi
Tegangan (V)	6538 – 6544
Arus (A)	925.4 – 971.4
Daya Aktif (kW)	10290 – 11120
Daya Reaktif (kVAr)	1934 – 2161
Faktor Daya (<i>lagging</i>)	0.979 – 0.981

Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Simulasi Sistem tanpa *FC-TCR* dan Sistem dengan *FC-TCR* di bus 6.6 kV dengan Kondisi Beban Fluktuasi

Parameter	Sistem tanpa <i>FC-TCR</i>	Sistem dengan <i>FC-TCR</i>
Tegangan (V)	6486 – 6487	6538 – 6544
Arus (A)	996.4 – 1048	925.4 – 971.4
Daya Aktif (kW)	10120 – 10810	10290 – 11120
Daya Reaktif (kVAr)	4675 – 4789	1934 – 2161
Faktor Daya (<i>lagging</i>)	0.903 – 0.918	0.979 – 0.981

Dari tabel 4.5 tersebut dapat dilihat pengaruh pemasangan *FC-TCR* terhadap tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya di bus 6.6 kV. Disamping dapat menaikkan dan mempertahankan nilai faktor daya sistem, pemasangan *FC-TCR* mampu menaikkan tegangan dan menurunkan arus yang dibutuhkan beban. Dengan nilai daya aktif yang mengalami sedikit kenaikan dan terjadi penurunan nilai daya reaktif yang cukup besar, maka pemasangan *FC-TCR* tersebut mampu mengurangi konsumsi energi listrik dan menghemat biaya operasi.

4.7 Pengaruh Pemasangan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor* Terhadap Biaya Energi Listrik di PT. Cheil Jedang Indonesia

Pemasangan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor* (*FC-TCR*) pada bus 6.6 kV di feeder trafo 1 berdasarkan hasil simulasi *Matlab* telah berhasil menaikkan dan mempertahankan faktor daya sistem. Dengan kenaikan nilai faktor daya menjadi 0.98 tersebut menyebabkan penurunan nilai daya reaktif sistem.

Pengaruh penurunan nilai daya reaktif terhadap biaya energi listrik dapat diketahui setelah membandingkan biaya yang dikeluarkan ketika kondisi sistem belum terpasang *FC-TCR* dengan kondisi sistem setelah terpasang *FC-TCR*. Perhitungan biaya energi listrik yang digunakan berdasarkan perhitungan tarif energi listrik di lampiran 4.

Berdasarkan data daya aktif dan daya reaktif yang ditunjukkan pada tabel data daya aktif, daya reaktif, faktor daya, tegangan, dan arus di bus 6.6kV pada feeder trafo 1 150/6.6 kV di lampiran 1, maka biaya yang dikeluarkan setiap bulan ketika kondisi belum terpasang *FC-TCR* sebagai berikut:

1. $kWh_{LWBP} = 5860500 \text{ kWh} \times \text{Rp } 434,- = \text{Rp } 2.543.457.000,-$
2. $kWh_{WBP} = 1534200 \text{ kWh} \times 1.5 \times \text{Rp } 434,- = \text{Rp } 998.764.200,-$
3. $\text{Basic} = 40500 \text{ kVA} \times \text{Rp } 27.000,- = \text{Rp } 1.093.500.000,-$

4. Finalty Basic = $11436.89 \text{ kVA} \times \text{Rp } 27.000,- = \text{Rp } 308.796.086,-$
5. BPJU = $2.25\% \times (\text{Rp } 2.543.457.000,- + \text{Rp } 998.764.200,- + \text{Rp } 1.093.500.000,- + \text{Rp } 308.796.086,-) = \text{Rp } 111.251.639,-$
6. Total biaya = $\text{kWh}_{\text{LWBP}} + \text{kWh}_{\text{WBP}} + \text{Basic} + \text{Finalty Basic} + \text{BPJU}$
= $\text{Rp } 5.055.768.925,- / \text{bulan}$

Biaya yang dikeluarkan ketika kondisi setelah terpasang FC-TCR berdasarkan data daya aktif dan daya reaktif pada tabel data daya aktif, daya reaktif, dan daya semu di bus 6.6kV pada feeder trafo 1 150/6.6 kV setelah terpasang FC-TCR di lampiran 2. Data pada tabel di lampiran 2 tersebut adalah hasil perhitungan dengan menggunakan data daya aktif pada tabel di lampiran 1 dan faktor daya 0.98. Sehingga diperoleh nilai daya reaktif (kVAr) $Q = P \times \tan(\cos^{-1} 0.98)$, dan nilai daya semu (kVA) $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$. Biaya yang dikeluarkan ketika kondisi setelah terpasang FC-TCR sebagai berikut:

1. $\text{kWh}_{\text{LWBP}} = 5860500 \text{ kWh} \times \text{Rp } 434,- = \text{Rp } 2.543.457.000,-$
2. $\text{kWh}_{\text{WBP}} = 1534200 \text{ kWh} \times 1.5 \times \text{Rp } 434,- = \text{Rp } 998.764.200,-$
3. Basic = $40500 \text{ kVA} \times \text{Rp } 27.000,- = \text{Rp } 1.093.500.000,-$
4. Finalty Basic = $10653 \text{ kVA} \times \text{Rp } 27.000,- = \text{Rp } 287.632.653,-$
5. BPJU = $2.25\% \times (\text{Rp } 2.543.457.000,- + \text{Rp } 998.764.200,- + \text{Rp } 1.093.500.000,- + \text{Rp } 287.632.653,-) = \text{Rp } 110.775.462,-$
6. Total biaya = $\text{kWh}_{\text{LWBP}} + \text{kWh}_{\text{WBP}} + \text{Basic} + \text{Finalty Basic} + \text{BPJU}$
= $\text{Rp } 5.034.129.315,- / \text{bulan}$

Selisih antara biaya yang dikeluarkan setelah pemasangan FC-TCR dengan sebelum pemasangan FC-TCR sebesar $\text{Rp } 21.639.610,- / \text{bulan}$. Dengan demikian pemasangan FC-TCR dapat menghemat biaya energi listrik yang dikeluarkan PT. Cheil Jedang Indonesia kepada PLN sebesar $\text{Rp } 21.639.610,-$ setiap bulan.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dibahas di bab IV pada skripsi ini maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemasangan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* mampu menurunkan daya reaktif di bus 6.6 kV pada feeder trafo 1 dengan fluktuasi dari 4675 kVAr hingga 4789 kVAr menjadi 1934 kVAr hingga 2161 kVAr. Penurunan daya reaktif tersebut berdampak pada kenaikan faktor daya dengan fluktuasi dari 0.903 hingga 0.918 menjadi 0.979 hingga 0.981.
2. Pemasangan *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* tidak hanya mampu menaikkan faktor daya tetapi juga mampu mempertahankan faktor daya sistem yaitu 0.979 hingga 0.981.
3. Pemasangan FC-TCR dapat menghemat biaya energi listrik yang dikeluarkan PT. Cheil Jedang Indonesia kepada PLN sebesar Rp 21.639.610,- setiap bulan.

5.2 Saran

1. Diperlukan studi khusus yang menganalisis harmonisa yang disebabkan oleh pemasangan *Thyristor Controlled Reactor (TCR)* sebagai peralatan kompensator yang difungsikan bersama *Fixed Capacitor*.
2. Diperlukan studi khusus mengenai sistem pengontrolan agar diperoleh unjuk kerja sistem yang lebih baik dalam meningkatkan dan mempertahankan faktor daya sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Dugan, R.C., Mark F. 1996. *Electrical Power Sistem Quality*. New York: Mc. Graw-Hill.
- Acha, E., Agelidis, V.G., Anaya-Lara, O. & Miller, T.J.E. 2002. *Power Electronic Control in Electrical Systems*. London: Newnes Publisher.
- IEEE, Red Book. 1986. *Power Faktor and Related Consideration*. The Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE Std 141-1986, ANSI Dec 9.
- Kennedy, Barry. & Leap, Nelly. 1995. *Industrial Power Faktor Analisyis*. Electrotek Concepts, Inc.
- Lopes, L.A.C. & Joos, Geza. 2001. *Pulse Width Modulated Capasitor For Series Compensator*. IEEE Transaction On Power Electronics. Vol.16, no.2.
- Mohan, Undeland & Robbins. 1994. *Converter, Aplications and Design*. John Wiley and Sons Ptc. Ltd.
- Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. 2000. *Understand FACTS: Concept and Technology of Flexible AC Transmission Sistem*. IEEE Press book.
- Ogata, Katsuhiko. 1985. *Teknik Kontrol Automatik Jilid 2*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Rashid, Muhammad Harunur. 1988. *Power Electronic Circuit, Devices, and Application*. Prentice Hall International. Inc.
- Sasan Jajali, Jan Dobson & Robert Lasseter. 1996. *Switching Time Bifurcations in a Thyristor Controlled Reactor*. IEEE Transaction on Circuits and Sistem-1: Fundamental Theory and Application, vol. 43, no. 3.
- William, D. & Stevenson, Jr. 1983. *Analisis Sistem Tenaga Listrik edisi keempat*. Jakarta: Penerbit Erlangga.



Lampiran 1

Tabel Data Daya Aktif, Daya Reaktif, Faktor Daya, Tegangan, dan Arus di Bus 6.6kV pada Feeder Trafo 1 150/6.6 kV

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Aktif (kW)	Daya Reaktif (kVAr)	Faktor Daya
15.00	6650	908	9510	4350	0.909
16.00	6630	953	9980	4500	0.911
17.00	6640	948	9870	4560	0.907
18.00	6600	947	9810	4360	0.913
19.00	6590	987	10230	4590	0.912
20.00	6590	1001	10350	4680	0.91
21.00	6580	1005	10440	4670	0.912
22.00	6530	1001	10310	4600	0.913
23.00	6580	1002	10390	4640	0.913
0.00	6600	972	10120	4630	0.909
1.00	6620	969	10090	4610	0.909
2.00	6650	975	10140	4800	0.903
3.00	6660	976	10120	4750	0.905
4.00	6640	972	10180	4580	0.911
5.00	6580	977	10160	4550	0.912
6.00	6570	983	10150	4770	0.905
7.00	6630	961	10100	4480	0.914
8.00	6610	994	10350	4660	0.911
9.00	6620	971	10180	4480	0.915
10.00	6610	975	10120	4740	0.905
11.00	6660	1058	11120	5090	0.909
12.00	6540	1055	10950	4790	0.916
13.00	6530	1045	10850	4680	0.918
14.00	6640	1046	10970	4970	0.91

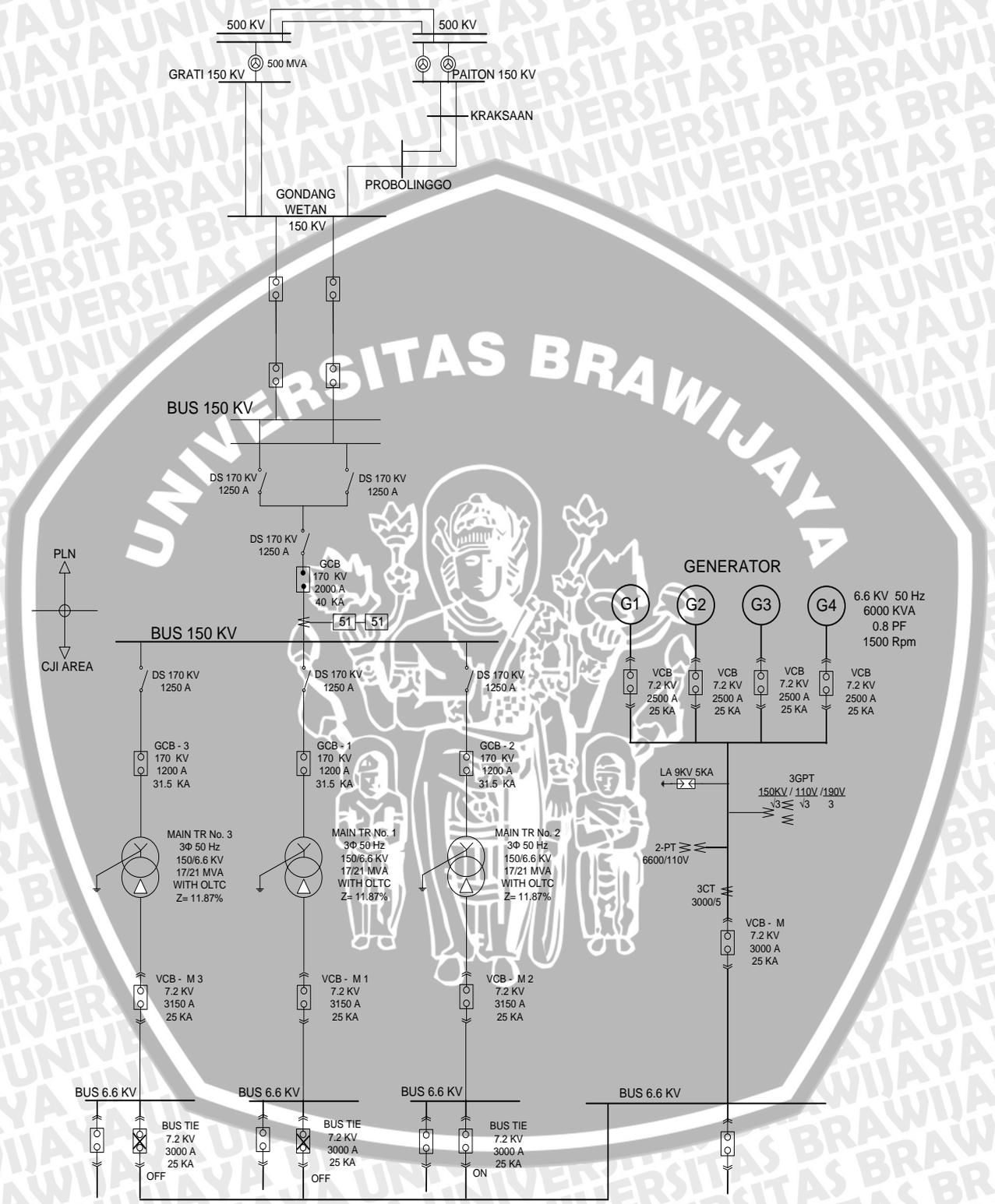
Sumber: PT. Cheil Jedang Indonesia

Lampiran 2

Tabel Data Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Daya Semu di Bus 6.6kV pada Feeder Trafo 1 150/6.6 kV Setelah Terpasang FC-TCR

Waktu	Daya Aktif (kW)	Daya Reaktif (kVAr)	Daya Semu (kVA)
15.00	9510	1931	9704
16.00	9980	2027	10184
17.00	9870	2004	10071
18.00	9810	1992	10010
19.00	10230	2077	10439
20.00	10350	2102	10561
21.00	10440	2120	10653
22.00	10310	2094	10520
23.00	10390	2110	10602
0.00	10120	2055	10327
1.00	10090	2049	10296
2.00	10140	2059	10347
3.00	10120	2055	10327
4.00	10180	2067	10388
5.00	10160	2063	10367
6.00	10150	2061	10357
7.00	10100	2051	10306
8.00	10350	2102	10561
9.00	10180	2067	10388
10.00	10120	2055	10327
11.00	11120	2258	11347
12.00	10950	2223	11173
13.00	10850	2203	11071
14.00	10970	2228	11194

Lampiran 3



Gambar Single Line Diagram Instalasi Listrik di PT. Cheil Jedang Indonesia



Lampiran 4

Perhitungan biaya pemakaian energi listrik PT. Cheil Jedang Indonesia sebagai berikut:

Tarif Reguler

1. $kWh_{LWBP} = kWh_{LWBP} \times Rp\ 434,-$
2. $kWh_{WBP} = (kWh_{WBP} - \text{konstanta}) \times 1.5 \times Rp\ 434,-$
3. Basic = kontrak kVA x Rp 27.000,-
4. Finalty Basic = kVA_{WBP} maksimum x Rp 27.000,-
5. BPJU = 2.25% x (kWh_{LWBP} + kWh_{WBP} + Basic + Finalty Basic)

Tarif Premium

1. $kWh_{LWBP\ \text{premium}} = kWh_{LWBP\ \text{premium}} \times Rp\ 864.4,-$
2. $kWh_{WBP\ \text{premium}} = kWh_{WBP\ \text{premium}} \times Rp\ 864.4,-$
3. BPJU = 2.25% x (kWh_{LWBP} premium + kWh_{WBP} premium)

Tarif Finalty

$$\text{Finalty} = \left(\frac{kWh_{WBP\ \text{reguler}}}{120 \cdot \cos\phi} - 18750 \right) \cdot Rp\ 27.000,$$

Total Tarif

$$\text{Total tarif} = (\text{Tarif Reguler} + \text{Tarif Premium} + \text{Tarif Finalty}^*)$$

Keterangan:

LWBP : luar waktu beban puncak

WBP : waktu beban puncak (Pukul 18.00-22.00)

*) Tarif finalty dikenakan jika faktor daya kurang dari 0.85