

ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI PENGGUNAAN SVC TIPE FC - TCR UNTUK
MENGATASI KETAKSEIMBANGAN BEBAN PADA PT. PLN
(PERSERO) DISTRIBUSI GARDU INDUK RUNGKUT
SURABAYA**

I Nyoman Aditya
NRP 2213105086

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**STUDY OF SVC FC - TCR TO BALANCE A DISTRIBUTION
SYSTEM AT RUNGKUT SUBSTATION PT. PLN (PERSERO)
SURABAYA**

I Nyoman Aditya
NRP 2213105086

Supervisors
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2015

**STUDI PENGGUNAAN SVC TIPE FC – TCR UNTUK
MENGATASI KETAKSEIMBANGAN BEBAN PADA
PT. PLN (PERSERO) DISTRIBUSI GARDU INDUK
RUNGKUT SURABAYA**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404051990021001

Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001



Studi Penggunaan SVC Tipe FC – TCR Untuk Mengatasi Ketakseimbangan Beban Pada PT. PLN (Persero) Distribusi Gardu Induk Rungkut Surabaya

I Nyoman Aditya
NRP 2212105086

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRAK

Pada sistem distribusi umumnya, mayoritas beban ialah beban industri 3 fasa. Sering ditemui fenomena beban yang selalu berubah – ubah dan tak seimbang pada setiap fasanya. Secara teori, fenomena ketidakseimbangan beban menyebabkan arus memiliki 3 komponen, yaitu arus urutan positif, arus urutan negatif, dan arus urutan nol. Telah diketahui bahwa arus urutan negatif dapat menurunkan performa bahkan hingga merusak sistem generator. Disamping itu, turbin generator dapat memiliki masalah yang serius jika terjadi arus urutan negatif. Dampak dari arus urutan negatif dapat dikurangi jika arus yang mengarah ke sumber tersebut dapat dikompensasi atau diblok. Pada tugas akhir ini akan membahas perancangan *Static VAR Compensator (SVC)* tipe *Fixed Capacitor – Thyristor Controlled Reactor (FC – TCR)* untuk mereduksi arus urutan negatif yang timbul akibat ketidakseimbangan beban. Metode yang digunakan yaitu metode komponen simetri. Dari hasil simulasi pada kondisi sistem tak seimbang, didapatkan nilai arus urutan negatif sebesar 2,2 A dengan presentase ketidakseimbangan sebesar 28%. Setelah terpasang SVC, didapatkan nilai arus urutan negatif turun menjadi 0,32 A dengan presentase ketidakseimbangan sebesar 4,4%. Nilai tersebut telah berhasil memenuhi standar minimum ketidakseimbangan.

Kata kunci : Ketakseimbangan, Arus Urutan Negatif, SVC FC-TCR.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Study Of SVC FC - TCR To Balance A Distribution System At Rungkut Substation PT. PLN (Persero) Surabaya

I Nyoman Aditya
NRP 2212105086

Counsellor Lecturer

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRACT

In the general distribution system, the majority of the load is three phase industrial load. Usually these loads changed frequently and unbalanced. In theory, the phenomenon of unbalanced load causes the current has three components, namely positive sequence current, negative sequence current and zero sequence current. It is well-known that negative sequence current appearing may downgrade performance and/or damage generator systems. Besides those well known bad effects, turbine blades of generator could have serious problem that caused by negative sequence current. In this final project will discuss about the design of Static VAR Compensator (SVC) Fixed Capacitor - Thyristor Controlled Reactor (FC - TCR) to reduce the negative sequence currents caused by unbalanced load, using the method of symmetric components. From the simulation results in an unbalanced system conditions, obtained negative sequence current value of 2.2 A with a percentage of unbalanced of 28%. With SVC on the system, obtained negative sequence current value drops to 0,32 A with a percentage of unbalanced of 4,4%. The value has successfully met the minimum standards of unbalanced.

Keyword : Unbalanced, Negative Sequence Current, SVC FC-TCR.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Dengan penuh rasa syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa dan tanpa menghilangkan rasa hormat yang mendalam, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan proyek akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ida Sang Hyang Widhi, karena perlindungan, pertolongan, dan restunya, penulis dapat menyelesaikan proyek akhir ini.
2. Untuk Bapak dan Mama tercinta yang tak pernah lelah memberi dukungan dan mendoakan, beserta keluarga yang selalu memberi doa dan dorongan moral. Persembahkan ini untuk kalian semua.
3. Kepada Bapak Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. dan Bapak Dr. Rony Seto Wibowo, ST. MT. atas bimbingan selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen penguji atas arahan dan kritikan yang telah diberikan demi kesempurnaan alat yang kami buat.
5. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS.
6. PT. PLN (Persero) terutama Gardu Induk Rungkut atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menggali informasi.
7. Bapak Ardyono, Bapak Dedet, Pak Umen, Pak Yanto, dan Mas Farid yang telah meluangkan waktunya untuk membantu penyelesaian tugas akhir ini.
8. Seluruh Dosen dan Karyawan di jurusan Teknik Elektro ITS atas fasilitas dan waktu yang telah diberikan.
9. Teman – teman LJ Elektro 105 angkatan 2013 atas kebersamaan dan kekompakan selama ini.
10. Teman – teman seperjuangan (Azhar, Neo, Aam, Haryo, dll) dan teman – teman laboratorium B103.
11. Rekan – rekan sepegunungan NyomAdventure atas semangat keakrabannya selama ini.
12. Teman – teman D3 ELIN B 2010 atas doa dan semangatnya.
13. Doni, Wachid, Andyk coro, Upik atas dukungan dan kekompakan masak sahurannya.
14. Dia selaku pemberi motivasi inmateriil. Ni Made Hana Savitri Batan.

15. Juga kepada semua pihak yang telah membantu penulis hingga terselesainya proyek akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan.

Akhir kata, segala kritik dan saran sangat penulis harapkan untuk pengembangan tugas akhir ini selanjutnya. Semoga Tuhan Yang Maha Esa selalu memberikan perlindungan nikmat-Nya bagi kita semua. Astungkara.

Surabaya, 4 Juni 2014

Penulis

TABLE OF CONTENTS

TITLE	
PRONOUNCEMENT OF AUTHENTICITY	
SIGNATURE PAGE	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
FOREWORD	v
TABLE OF CONTENTS	vii
ILUSTRATION	ix
TABLES	xi
CHAPTER 1 INTRODUCTION	
1.1. Background.....	1
1.2. Purposes.....	1
1.3. Problem.....	2
1.4. Limitation of Problem.....	2
1.5. Methodology.....	2
1.6. Systematics.....	3
1.7. Relevances.....	4
CHAPTER 2 POWER, UNBALANCE, AND COMPENSATION	
2.1. Power.....	5
2.1.1. Real Power.....	5
2.1.2. Complex Power.....	6
2.1.3. Power On 3 Phase Balance System.....	7
2.1.4. Power Factor.....	8
2.1.5. Power Factor Correction.....	9
2.2. Unbalance.....	10
2.2.1. Symmetry.....	10
2.2.2. Percentage of Unbalance.....	14
2.3. Compensation.....	14
2.3.1. Synchronous Compensator.....	15
2.3.2. Bank Capacitors.....	15
2.3.3. Thyristor-Switched Capacitor (TSC).....	16
2.3.4. Thyristor-Controlled Reactor (TCR).....	17
2.3.5. Static VAR Compensator.....	18
2.3.6. STATCOM.....	19

CHAPTER 3 STATIC VAR COMPENSATOR FC-TCR	
3.1. Reactive Power Compensation	21
3.2. Characteristic of Static VAR Compensator (SVC).....	22
3.2.1. General Characteristic	22
3.2.2. Ideal Characteristic	22
3.2.3. Real Characteristic.....	23
3.3. Thyristor Controlled Reactor (TCR).....	25
3.3.1. Operation Characteristic of TCR on SVC	27
3.3.1.1. Voltage – Current Characteristic.....	28
3.3.1.2. Susceptance Characteristic.....	28
3.3.2. Advantages of TCR	29
3.3.3. TCR Effects of Harmonics	29
3.3.4. 3 Phase TCR Circuits	31
3.4. Fixed Capacitor – Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR).....	31
3.5. Negative Sequence Current Reduction on SVC FC-TCR With Symmetry Components Method	32
 CHAPTER 4 SIMULATION AND ANALYSIS	
4.1. Single Line Diagram	37
4.2. Simulation System	39
4.2.1. Simulation System With Balance Condition	40
4.2.2. Simulation System With Unbalance Condition	42
4.2.3. Simulation System With Compensator	44
4.2.3.1. Design of SVC FC-TCR	44
 CHAPTER 5 CLOSING	
5.1 Conclusion	51
5.2 Suggestion	51
 REFERENCES	53
APPENDIX	55

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Data beban PT. Hanil Jaya	39
Tabel 4.2	Data konfigurasi beban seimbang.....	40
Tabel 4.3	Data simulasi kondisi beban seimbang.....	40
Tabel 4.4	Data konfigurasi beban tak seimbang.....	42
Tabel 4.5	Data simulasi kondisi beban tak seimbang.....	42
Tabel 4.6	Data simulasi sistem dengan kompensator	47

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Grafik tegangan, arus, dan daya terhadap waktu	6
Gambar 2.2	Segitiga daya	7
Gambar 2.3	Diagram fasor arus	8
Gambar 2.4	Komponen urutan positif, negatif, dan nol	11
Gambar 2.5	Bentuk Fasor Asimetri.....	11
Gambar 2.6	<i>Synchronous Compensator</i> : mode kapasitif dan induktif	15
Gambar 2.7	<i>Thyristor-Switched Capacitor</i>	16
Gambar 2.8	Rangkaian dan bentuk gelombang TCR	18
Gambar 2.9	<i>Static VAR Compensator</i>	19
Gambar 2.10	STATCOM	20
Gambar 3.1	<i>Static VAR Compensator</i>	21
Gambar 3.2	Karakteristik kompensator ideal	23
Gambar 3.3	Kompensator ideal	23
Gambar 3.4	Rangkaian gabungan SVC	24
Gambar 3.5	Rangkaian ekuivalen thevenin sistem	24
Gambar 3.6	Karakteristik tegangan / arus reaktif	25
Gambar 3.7	Rangkaian TCR dan gelombang keluarannya	25
Gambar 3.8	Karakteristik tegangan – arus TCR	28
Gambar 3.9	Karakteristik susceptansi TCR	29
Gambar 3.10	Komponen arus harmonisa pada TCR	30
Gambar 3.11	Total harmonisa pada arus TCR	30
Gambar 3.12	Rangkaian TCR 4 fasa terhubung delta	28
Gambar 3.13	Karakteristik operasi FC-TCR	29
Gambar 3.14	Sistem sebelum kompensasi	29
Gambar 3.15	Sistem dengan kompensator	30
Gambar 4.1	<i>Single line diagram gardu induk rungkut surabaya</i>	38
Gambar 4.2	Simulasi sistem kondisi seimbang	39
Gambar 4.3	Diagram fasor arus dan tegangan kondisi seimbang	41
Gambar 4.4	Gelombang arus sumber kondisi jika seimbang	41
Gambar 4.5	Diagram fasor arus dan tegangan kondisi tak seimbang	43
Gambar 4.6	Gelombang arus sumber kondisi tak seimbang	43
Gambar 4.7	Simulasi sistem dengan SVC	45
Gambar 4.8	Simulasi rangkaian SVC tipe FC-TCR	47

Gambar 4.9	Diagram fasor arus dan tegangan sistem dengan kompensator.....	48
Gambar 4.10	Gelombang arus pada TCR (fasa R, fasa S, dan fasa T).....	48
Gambar 4.11	Gelombang arus pada SVC	49
Gambar 4.12	Gelombang arus pada beban.....	49
Gambar 4.13	Gelombang arus sumber dengan SVC.....	50

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada sistem distribusi umumnya, jenis beban yang disuplai berbeda – beda. Terutama industri yang memiliki beban yang berubah – ubah dan menyebabkan ketidakseimbangan pada setiap fasanya. Sistem yang tidak seimbang akan mengakibatkan rugi – rugi pada peralatan industri hingga pembangkit.

Ketidakseimbangan pada beban industri dapat menyebabkan arus memiliki 3 komponen yaitu arus urutan positif, arus urutan negatif, dan arus urutan nol. Arus urutan nol dapat dihilangkan dengan menggunakan trafo konfigurasi delta-wye. Namun arus urutan negatif tidak dapat dihilangkan begitu saja. Telah diketahui arus urutan negatif dapat menurunkan performa bahkan merusak sistem generator. Hal tersebut disebabkan karena arus urutan negatif menimbulkan arah fluks yang berlawanan pada airgap generator dan menghasilkan torsi negatif yang menyebabkan vibrasi/getaran, meningkatkan temperatur dan mengurangi efisiensi dari generator. Fenomena arus urutan negatif memang jarang terjadi namun dapat berakibat fatal pada generator.[5]

Pada tugas akhir ini dirancang *Static Var Compensator* (SVC) tipe *Fixed Capacitor – Thyristor Controlled Reactor* (FC-TCR) sebagai solusi dalam mengatasi ketidakseimbangan beban. Metode yang digunakan yaitu metode komponen simetri. Secara teori SVC mampu mereduksi besarnya arus urutan negatif yang ditimbulkan oleh ketidakseimbangan tersebut. Fenomena ketidakseimbangan ini ditemukan pada salah satu feeder Gardu Induk Rungkut Surabaya yang menuju industri peleburan baja PT. Hanil Jaya.

1.2 Tujuan Penelitian

Tugas akhir ini bertujuan untuk merancang *Static Var Compensator* (SVC) untuk mereduksi besarnya arus urutan negatif yang diakibatkan oleh ketidakseimbangan beban.

1.3 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Mendapatkan nilai arus urutan positif, arus urutan negatif, dan arus urutan nol.
2. Merancang SVC untuk mereduksi besarnya arus urutan negatif.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan masalah dalam tugas akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut :

1. Peralatan yang akan dirancang dan dianalisis yaitu *Static Var Compensator (SVC)*.
2. Metode yang digunakan yaitu metode analisis komponen simetri.
3. Sistem pada SVC merupakan *open loop*.
4. *Plant* yang akan dibahas ialah Gardu Induk Rungkut Surabaya dengan penyulang yang dianalisis yaitu pada PT. Hanil Jaya.
5. Pengerjaan program menggunakan *software* MATLAB Simulink.
6. Tidak dilakukan pembahasan yang mendalam mengenai harmonisa yang ditimbulkan.

1.5 Metode Penelitian

Pada tugas akhir ini dibuat program untuk mendapatkan posisi sensor pengukuran untuk state estimation menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO). Program dibuat dengan menggunakan software Matlab. Tahapan untuk menyelesaikan tugas akhir ini adalah :

1. Studi literature
Studi literature dilakukan untuk memperoleh teori penunjang tugas akhir ini baik dari buku maupun jurnal. Teori – teori penunjang yang berhubungan dengan tugas akhir ini meliputi kualitas daya pada sebuah sistem kelistrikan yang dipengaruhi oleh ketakseimbangan beban.
2. Pengumpulan data
Data yang digunakan meliputi data tegangan, arus, daya, dan faktor daya pada penyulang. Data yang paling utama ialah arus beban, yang digunakan untuk mendapatkan besarnya arus urutan positif, arus urutan negatif, dan arus urutan nol.

3. Perancangan model
Perancangan simulasi dilakukan dengan mengukur nilai ketakseimbangan dengan cara menghitung besar arus urutan positif, negatif, dan nol pada sistem distribusi Gardu Induk Rungkut Surabaya. Melalui ketakseimbangan tersebut, dihitung nilai kompensator untuk mereduksi nilai arus urutan negatif. Diperlukan pula kontrol untuk menyesuaikan besar sudut penyalan Thyristor berdasarkan perubahan beban yang fluktuatif.
4. Simulasi dan analisis
Dilakukan perancangan SVC tipe FC-TCR pada sistem distribusi Gardu Induk Rungkut Surabaya untuk mengetahui pengaruh kompensator pada ketakseimbangan. Lalu dilakukan analisa data pengaruh pemasangan kompensator dengan membandingkan nilai ketakseimbangan yang baru dengan sebelumnya.
5. Penulisan buku
Hasil penelitian yang telah dilakukan dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir dan paper. Laporan berisi metode dan kesimpulan dari penelitian beserta saran.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut :

- Bab 1 : Pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan, batas masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari Tugas Akhir.
- Bab 2 : Dasar teori yang menjelaskan teori mengenai daya secara umum, teori ketakseimbangan, dan kompensasi.
- Bab 3 : Pembahasan teori mengenai kombinasi *Fixed Capacitor* dengan *Thyristor Controlled Reactor* dan *Static Var Compensator*.
- Bab 4 : Hasil simulasi dan analisis dari perancangan *Static Var Compensator* tipe FC-TCR.
- Bab 5 : Kesimpulan Tugas Akhir yang mengemukakan hasil pembahasan dan saran-saran sehubungan dengan pokok-pokok pembahasan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat berikut :

1. Memberikan kontribusi terhadap perkembangan sistem kelistrikan, khususnya pada permasalahan yang terkait dalam ketidakseimbangan yang kerap terjadi pada beban – beban industri.
2. Dapat meningkatkan penguasaan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) di bidang Sistem Tenaga listrik bagi pengusul Tugas Akhir.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan mengambil Tugas Akhir yang mengambil masalah yang serupa.

BAB 2

DAYA, KETAKSEIMBANGAN, DAN KOMPENSASI

2.1. Daya

2.1.1. Daya Nyata

Seperti yang dikutip dari referensi [1], daya listrik diartikan sebagai perubahan rata – rata energi listrik terhadap waktu. Dalam rangkaian listrik ac, daya yang masuk ke elemen dari rangkaian tersebut adalah hasil kali tegangan dan arus yang melalui elemen tersebut seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.1. Tegangan dinyatakan sebagai :

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta) \quad (2.1)$$

Diberikan pada sebuah jaringan, dimana arus yang dihasilkan dinyatakan sebagai :

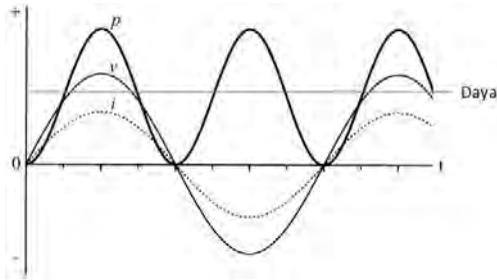
$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta) \quad (2.2)$$

Sudut fasa dimana tegangan mendahului arus ialah $(\theta - \phi)$. Daya rata – rata yang diberikan pada jaringan, dengan menganggap konvensi tanda pasif pada terminal masukan, dapat dinyatakan baik dalam harga maksimum :

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta - \phi) \quad (2.3)$$

Maupun dalam harga efektif :

$$P = V_{eff} I_{eff} \cos(\theta - \phi) \quad (2.4)$$



Gambar 2.1 Grafik tegangan, arus, dan daya terhadap waktu

2.1.2. Daya Kompleks

Sesuai dengan referensi[4], didefinisikan daya kompleks dengan referensi pada tegangan sinusoidal umum bentuk kompleks $V_{eff} = |V|\angle\theta$ melalui sepasang terminal dan arus sinusoidal umum bentuk kompleks $I_{eff} = |I|\angle\theta$, maka hasil perkalian kedua variabel tersebut dapat dinyatakan sebagai daya semu (S) sebagai berikut :

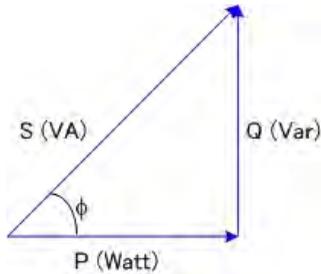
$$S = VI^* = |V||I|\angle(\theta_v - \theta_i) = |V||I|\angle\theta \quad (2.5)$$

$$= |V||I| \cos\theta + j|V||I| \sin\theta \quad (2.6)$$

Pada persamaan (2.6) menunjukkan kuantitas kompleks dimana bagian riil merupakan daya nyata (P) dan bagian imajiner merupakan daya reaktif (Q). Perbandingan ini dapat dilihat pada gambar 2.2. Maka daya kompleks (S) dinyatakan sebagai berikut :

$$S = P + jQ \quad (2.7)$$

Daya reaktif (Q) dinyatakan positif jika selisih sudut fasa $\theta_v - \theta_i$ adalah positif yaitu $\theta_v > \theta_i$, yang berarti arus tertinggal (*lagging*) terhadap tegangan. Daya reaktif (Q) menjadi negatif $\theta_v < \theta_i$ berarti arus mendahului (*leading*) terhadap tegangan.



Gambar 2.2 Segitiga daya

2.1.3. Daya Pada Sistem 3 Fasa Seimbang

Seperti yang dikutip dari referensi[4], total daya yang dikirim oleh generator 3 fasa atau yang terserap oleh suatu beban 3 fasa dapat diperoleh dengan menjumlahkan daya pada setiap fasanya. Sehingga dapat dikatakan, daya total pada suatu rangkaian seimbang ialah 3 kali daya setiap fasa.

Jika besaran tegangan *line to neutral* V_p pada beban yang terhubung Y adalah :

$$|V_p| = |V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}| \quad (2.8)$$

Dan besaran arus fasa pada beban yang terhubung Y adalah :

$$|I_p| = |I_{an}| = |I_{bn}| = |I_{cn}| \quad (2.9)$$

Maka total daya 3 fasa nya dapat dinyatakan :

$$P = 3|V_p||I_p| \cos \theta_p \quad (2.10)$$

Dimana θ_p merupakan sudut saat arus I_p *lagging* terhadap tegangan V_p . Jika $|V_L|$ dan $|I_L|$ adalah besaran tegangan dan arus *line-to-line* , maka :

$$|V_p| = \frac{|V_L|}{\sqrt{3}} \text{ dan } |I_p| = |I_L| \quad (2.11)$$

Dengan mesubstitusikan ke persamaan (2.10) didapatkan :

$$P = \sqrt{3} |V_L||I_L| \cos \theta_p \quad (2.12)$$

Total daya reaktif adalah :

$$Q = 3 |V_p||I_p| \sin \theta_p \quad (2.13)$$

$$Q = \sqrt{3} |V_L||I_L| \sin \theta_p \quad (2.14)$$

Dan total Volt Ampere pada beban ialah :

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} |V_L||I_L| \quad (2.15)$$

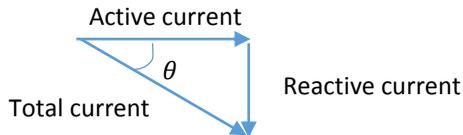
Jika beban terhubung Δ , tegangan dan arus yang melalui beban dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$|V_p| = |V_L| \text{ dan } |I_p| = \frac{|I_L|}{\sqrt{3}} \quad (2.16)$$

2.1.4. Faktor Daya

Dikutip dari referensi[6], pada dasarnya sebagian besar peralatan listrik membutuhkan 2 komponen arus, yaitu :

1. Arus yang menghasilkan daya kerja, merupakan arus yang dikonversikan oleh peralatan menjadi kerja, umumnya dalam bentuk panas, cahaya, dan gaya mekanis. Satuan daya kerja yang dihasilkan ialah Watt.
2. Arus magnetisasi, disebut juga *wattless* reaktif, merupakan arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan fluks untuk pengoperasian peralatan elektromagnetik. Tanpa arus magnetik, energi tidak dapat mengalir melalui transformator atau menembus celah udara pada motor induksi. Satuan daya yang dihasilkan ialah VAR.



Gambar 2.3 Diagram Fasor Arus

Fasor kedua komponen arus diilustrasikan pada gambar 2.3. Gambar tersebut memperlihatkan penjumlahan secara vektoris dari arus aktif dan arus reaktif yang menghasilkan arus total, dan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$I_{total} = \sqrt{I_{aktif}^2 + I_{reaktif}^2} \quad (2.17)$$

$$I_{total} = \sqrt{(I \cos \theta)^2 + (I \sin \theta)^2} \quad (2.18)$$

Daya total dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{(\text{daya aktif})^2 + (\text{daya reaktif})^2} \quad (2.19)$$

Diagram fasor untuk daya yang identik dengan arus dapat dilihat pada gambar 2.2. Ada 2 definisi umum pada faktor daya. Definisi pertama menyatakan faktor daya sebagai cosinus dari sudut beda fasa antara tegangan dengan arus. Definisi yang lebih sering digunakan ialah rasio antara daya aktif (Watt) dengan daya semu (VA). Nilai faktor daya berkisar antara 0 hingga 1, dan biasa dinyatakan dalam persen (%).

$$\text{Faktor daya} = \left(\frac{\text{daya aktif}}{\text{daya semu}} \right) = \frac{kW}{kVA} \quad (2.20)$$

$$\cos \theta = \cos \frac{P}{S} \quad (2.21)$$

Persamaan (2.20) dan (2.21) ialah persamaan pada frekuensi dasar dengan asumsi harmonisa sama dengan nol.

2.1.5. Perbaikan Faktor Daya

Dari hubungan segitiga daya yang ditunjukkan pada gambar 2.2, didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\tan \theta = \frac{\text{daya reaktif}}{\text{daya aktif}} = \frac{Q}{P} \quad (2.22)$$

Karena komponen daya aktif konstan (komponen kVA dan kVAR berubah sesuai dengan nilai faktor daya) maka dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$Q = P \times \tan \theta \quad (2.23)$$

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

$$Q_{awal} = P \times \tan \theta_{awal} \quad (2.24)$$

$$Q_{baru} = P \times \tan \theta_{baru} \quad (2.25)$$

Maka rating kapasitor yang dibutuhkan untuk perbaikan faktor daya adalah :

$$Q_C = Q_{awal} - Q_{baru} \quad (2.26)$$

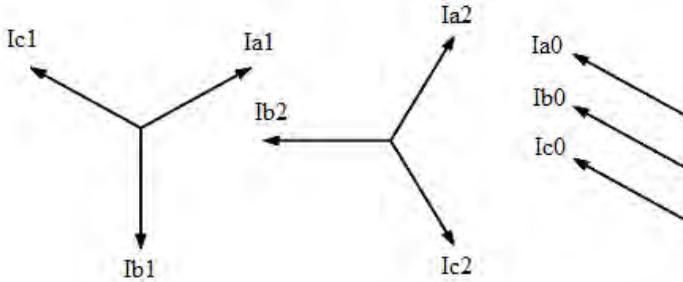
2.2. Ketakseimbangan

Salah satu metode yang paling muktahir dalam penyelesaian rangkaian *polyphase* tak seimbang adalah metode komponen simetri yang dikemukakan oleh C. L. Fortescue pada referensi[3]. Disebutkan bahwa suatu fasor pada sistem yang tak seimbang dapat diuraikan menjadi suatu fasor yang seimbang yang dinamakan komponen simetri. Fasor pada setiap komponen memiliki panjang yang sama, dan jarak antar sudut yang sama.

2.2.1. Komponen Simetri

Ketiga fasor tak seimbang pada sistem 3 fasa, dapat diuraikan menjadi 3 komponen. Komponen tersebut terdiri dari :

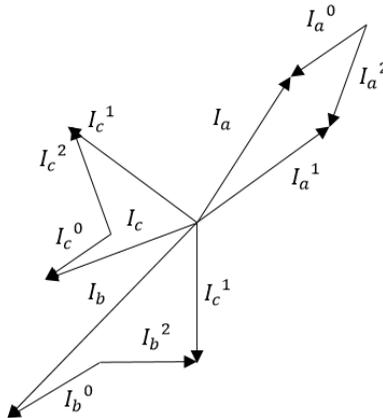
- **Komponen urutan positif** (kode = 1), terdiri dari 3 fasor yang memiliki besaran yang sama dan jarak antar fasor yaitu 120° . Komponen ini memiliki urutan fasa yang sama dengan fasor aslinya.
- **Komponen urutan negatif** (kode = 2), terdiri dari 3 fasor yang memiliki besaran yang sama dan jarak antar fasor yaitu 120° . Namun komponen ini memiliki urutan fasa yang berkebalikan dengan fasor aslinya.
- **Komponen urutan nol** (kode = 0), terdiri dari 3 fasor yang memiliki besaran yang sama dengan jarak antar fasor sama dengan nol.



Gambar 2.4 Komponen urutan positif, negatif, dan nol

Setiap fasor yang tak seimbang merupakan penjumlahan dari ketiga komponen urutan tersebut, sehingga jika ketiga urutan dijumlah dapat membentuk fasor yang tidak simetris seperti pada gambar 2.5. Untuk rumusan tegangan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \\
 V_b &= V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)} \\
 V_c &= V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)}
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$



Gambar 2.5 Bentuk fasor asimetri

Sebuah operator kompleks a digunakan untuk memudahkan perhitungan. Operator a memiliki perputaran sudut berlawanan arah jarum jam sebesar 120° , dinyatakan sebagai berikut :

$$a = e^{j120} = 1\angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.28)$$

$$a^2 = e^{j240} = 1\angle 240^\circ = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.29)$$

Nilai V_b dan V_c dapat disubstitusikan dengan nilai V_a bersama operator $a = 1\angle 120^\circ$. Dengan memasukkan operator kompleks a ke persamaan (2.27), didapatkan :

$$\begin{aligned} V_a &= V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \\ V_b &= V_a^{(0)} + a^2 V_a^{(1)} + a V_a^{(2)} \\ V_c &= V_a^{(0)} + a V_a^{(1)} + a^2 V_a^{(2)} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Atau dalam bentuk matriks :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Untuk mempermudah ditulis sebagai berikut :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Setelah persamaan (2.32) di invers, didapatkan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Dari matriks tersebut dapat dituliskan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}V_a^{(0)} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\V_a^{(1)} &= \frac{1}{3}(V_a + a V_b + a^2 V_c) \\V_a^{(2)} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2 V_b + a V_c)\end{aligned}\tag{2.35}$$

Persamaan yang sama dapat dituliskan untuk mencari nilai setiap komponen pada arus, yaitu :

$$\begin{aligned}I_a^{(0)} &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\I_a^{(1)} &= \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \\I_a^{(2)} &= \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c)\end{aligned}\tag{2.36}$$

Setiap rangkaian urutan positif, negatif, dan nol memiliki nilai jenis impedansi yang berbeda – beda. Pada rangkaian ekuivalen komponen urutan positif dan negatif hanya terdapat sedikit perbedaan yaitu pada sumbernya. Namun pada rangkaian komponen urutan nol, konfigurasi belitan primer dan sekunder diperhitungkan, seperti pada tabel 2.1 berikut ini :

Tabel 2.1 Rangkaian ekuivalen trafo komponen urutan nol[4]

CASE	SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS
1			
2			
3			
4			
5			

2.2.2. Derajat Ketakseimbangan

Derajat ketidakseimbangan diartikan sebagai presentase komponen urutan negatif dibanding komponen urutan positif dari sistem yang tak seimbang, dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$Unbalance = \frac{Negative\ Sequence}{Positive\ Sequence} \times 100\% \quad (2.37)$$

2.3. Kompensasi

Sesuai yang dikutip dari referensi[2], dalam sistem yang ideal, tegangan dan frekuensi dalam distribusi tenaga harus konstan, hanya memiliki komponen fundamental, dan memiliki faktor daya mendekati satu (*unity*). Secara khusus, parameter – parameter tersebut tidak boleh terpengaruh oleh beban konsumen. Hal tersebut baru dapat terjadi jika

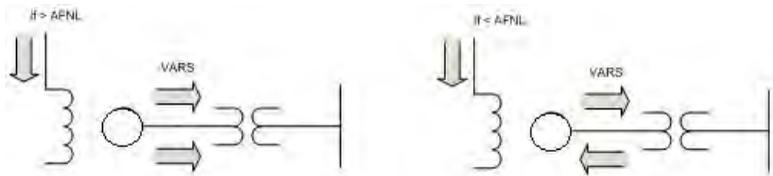
beban – beban diberi kompensator daya reaktif sehingga sistem tenaga listrik tak terpengaruh atas perubahan tersebut.

Kompensasi beban merupakan salah satu solusi untuk mengontrol daya reaktif, sehingga dapat memperbaiki kualitas daya pada transmisi tenaga listrik. Teknik ini biasanya digunakan untuk mengkompensasi beban individu maupun lebih dari satu. Teknik kompensasi daya dapat berupa :

- *Power Factor Correction*
- *Voltage Regulation*
- Penyeimbang Beban

2.3.1. *Synchronous Compensator*

Synchronous compensator didesain untuk berputar pada kecepatan sinkron tanpa torsi mekanik yang diberikan ke poros. Daya aktif pada sistem disamakan dengan daya yang hilang pada mesin. Dengan eksitasi, titik operasi akan bergerak pada *axis* daya reaktif dan mesin ini akan menjadi kondenser jika $I_f < AFNL$, atau menjadi induktif jika $I_f > AFNL$ sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.6. Akan tetapi, kompensator ini digunakan pada efisiensi penuh. Alat ini dioperasikan pada ruang tertutup yang berisi hidrogen dengan mengurangi *losses* melalui ventilasi dan meningkatkan daya spesifik. Namun sistem ini cukup mahal.



Gambar 2.6 *Synchronous Compensator*: mode kapasitif dan induktif

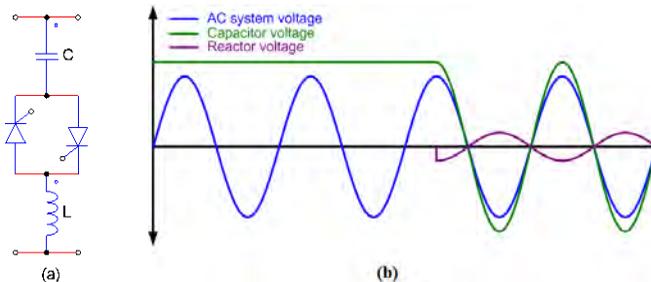
2.3.2. *Bank Capacitors*

Pada umumnya kapasitor di desain sebagai kompensator daya reaktif. Fungsi utama nya ialah menyerap daya reaktif yang bersifat

induktif sehingga dapat memperbaiki nilai faktor daya. Pada umumnya beberapa kapasitor di paralel dengan tujuan agar pengaturan nilai kompensasi lebih mudah. Karena kapasitor merupakan elemen yang memiliki variasi diskrit, hal ini tidak memungkinkan variasi kompensasi daya reaktif secara cepat.

2.3.3. Thyristor-Switched Capacitor (TSC)

Rangkaian TSC satu fasa ditunjukkan pada gambar 2.7(a). TSC dapat di non-aktifkan (*switch off*) pada saat arus bernilai nol (*zero crossing*). Pada waktu yang sesaat tersebut, besar tegangan pada kapasitor mencapai puncak. Kapasitor yang dilepas, pada kondisi idealnya akan tetap berada pada posisi puncak dan tegangan pada *thyristor* tak terkonduksi bervariasi dan sefasa dengan gelombang tegangan sistem, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7(b).



Gambar 2.7 Thyristor-Switched Capacitor

Pada kondisi normalnya, selang waktu selama kapasitor *off*, kapasitor mengalami *discharge* tegangan setelah pemutusan. Untuk mengurangi efek *transient* saat *switching* dari TSC saat *on*, sambungan pada kapasitor haruslah pada waktu sesaat ketika tegangan pada *thyristor* sama dengan nol. Namun efek *transient* tersebut tidak dapat dihindari akibat adanya arus saat *switching*, dimana tanpa reaktor akan menghasilkan arus sesaat pada kapasitor ($i_s = C \cdot (d_v/d_t)$). Interaksi antara kapasitor dengan reaktor sebagai pembatas arus akan menghasilkan osilasi *transient* pada arus dan tegangan.

Dari penjelasan tersebut dapat disimpulkan bahwa kontrol sudut *delay* tidak dapat diaplikasikan pada kapasitor; *switching* kapasitor harus dilakukan pada waktu sesaat di setiap *cycle* dimana kondisi untuk *transient* minimum didapat. Berdasarkan hal tersebut, TSC hanya mampu menyediakan perubahan konduksi penuh (kapasitor *on*) atau kondisi non konduksi (kapasitor *off*). Kemudian TSC merupakan admitansi kapasitif yang dapat dihubungkan atau dilepas dari sistem. Arus pada kapasitor dipengaruhi tegangan yang melewatinya. Untuk menyediakan variasi arus secara kontinyu, TSC dikonfigurasi secara paralel.

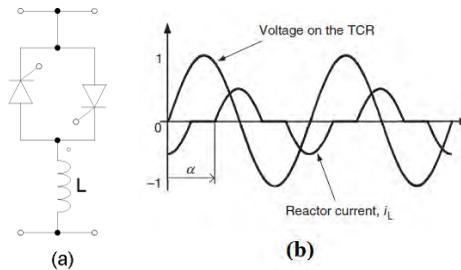
2.3.4. Thyristor-Controlled Reactor (TCR)

TCR terdiri dari reaktor yang dipasang secara *fixed* (tanpa *switch*) yang merupakan induktansi sebesar L (Henry) dan diserikan dengan *bi-directional transistor switch*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8(a). Arus yang mengalir pada reaktor dapat diatur dari nol hingga maksimum dengan mengatur sudut penyalan α pada *thyristor* seperti yang ditunjukkan gambar 2.8(b). Nilai arus sama dengan nol didapat ketika *switch open*, sedangkan nilai maksimum didapat saat *switch closed*. Variabel σ merupakan sudut konduksi *thyristor*, dimana $[\sigma = \pi - 2\alpha]$. Saat $\alpha=0$, *switch* tertutup secara permanen dan hal ini tak memiliki dampak kepada arus induktor. Jika penyalan *switch* di-*delay* dengan sudut sebesar α terhadap tegangan puncak suplai (V_m), $v(t) = V_m \cos \omega t = \sqrt{2} V \cos \omega t$, arus sesaat pada induktor dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} v(t) dt = \frac{V_m}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha) \quad (2.38)$$

Berlaku saat nilai $\alpha \leq \omega t \leq \pi - \alpha$. Untuk setengah periode negatif persamaan (2.38) akan bernilai negatif. Bentuk $(V_m/\omega L) \sin \alpha$ dalam persamaan (2.38) adalah nilai konstan yang bergantung pada nilai sudut penyulutan (α). Arus induktor $i_L(t)$ akan bernilai maksimum saat $\alpha = 0$ dan bernilai nol saat $\alpha = \pi/2$. Dengan menggunakan persamaan (2.38), arus fundamental rms pada reaktor dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$i_{LF}(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha\right) \quad (2.39)$$



Gambar 2.8 Rangkaian dan bentuk gelombang TCR

Sehingga admitansi nya dapat dinyatakan sebagai berikut :

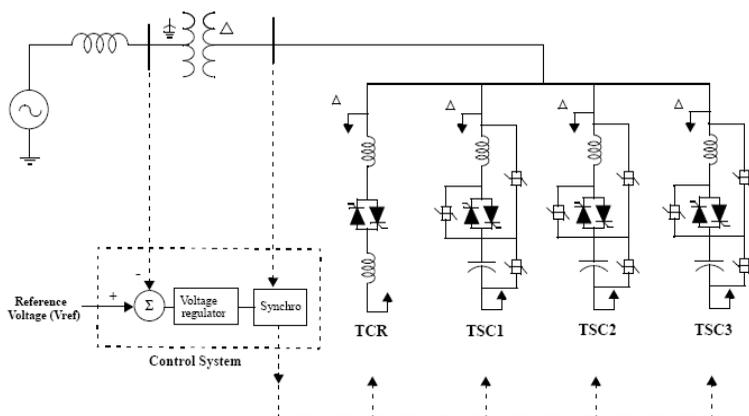
$$Y_L(\alpha) = \frac{I_{LF}}{V} = \frac{1}{\omega L} = \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha\right) \quad (2.40)$$

Sehingga kompensator dapat memvariasikan nilai impedansinya, $Z_L(\alpha) = 1/Y_L(\alpha)$, dan kemudian mengkompensasi arus. Akibat adanya kontrol sudut penyalan, akan timbul arus harmonisa pada orde rendah. Filter pasif dibutuhkan untuk menghilangkan harmonisa tersebut. Transformer konfigurasi Wye-Delta umumnya digunakan pada sisi sekunder untuk menghindari injeksi harmonisa yang timbul dari saluran suplai.

2.3.5. *Static VAR Compensator*

Penggunaan TCR maupun TSC hanya mampu memberikan kompensasi kapasitif atau induktif. Namun pada kenyataannya dibutuhkan suatu peralatan yang mampu kompensasi baik kapasitif maupun induktif. *Static VAR Compensator* (SVC) terdiri dari TCR yang diparalel dengan satu atau lebih TSC. Susunan dasar dari SVC dapat dilihat pada gambar 2.9. Elemen reaktif dari kompensator dihubungkan pada transmisi melalui sebuah transformator untuk menghindari agar peralatan tidak harus menahan tegangan yang sama dengan tegangan sistem. Sebuah kontrol sistem menentukan sudut penyalan (α) yang tepat bagi reaktor sesuai strategi kontrol yang ditentukan terlebih dahulu. Strategi tersebut umumnya bertujuan untuk mempertahankan tegangan saluran pada nilai tertentu. Untuk tujuan ini, sistem kontrol memiliki masukan tegangan sistem yang sebelumnya dilewatkan *Potential*

Transformer (PT); sebagai tambahan parameter. Kontrol memastikan tegangan kompensator lebih tinggi atau lebih rendah dengan nilai konstan dengan mengatur sudut penyalan (α).



Gambar 2.9 *Static VAR Compensator*[7]

2.3.6. STATCOM

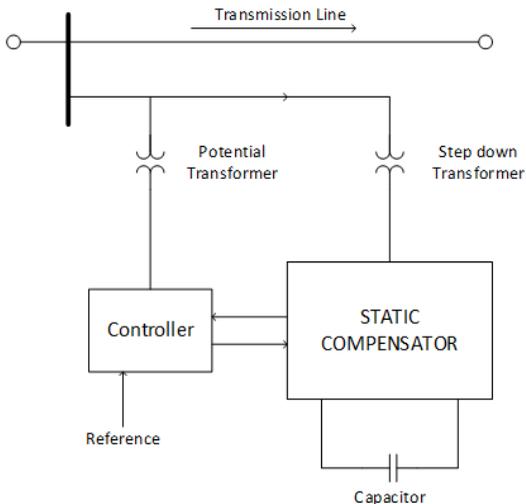
Static VAR Compensator yang lebih handal dikenal dengan nama *Voltage Source Converter* (VSC), atau sering disebut dengan *Static Compensator* (STATCOM). Jika tegangan sistem (V) sefasa dengan tegangan keluaran konverter, (V_o) dan memiliki besaran yang sama, sehingga tidak ada arus yang mengalir masuk atau keluar dari kompensator dan tidak ada pertukaran daya reaktif pada saluran. Jika tegangan konverter naik, beda tegangan antara V dan V_o melewati resistansi bocor dari transformator *step-down*. Sebagai hasilnya, arus *leading* terhadap tegangan V ditarik dari kompensator, sehingga kompensator bertindak menjadi sebuah kapasitor yang membangkitkan VAR. Sebaliknya, jika tegangan sistem (V) lebih besar dari tegangan kompensator (V_o), maka kompensator akan menarik arus *lagging* dan bertindak menjadi sebuah induktor yang menyerap VAR.

Pada intinya STATCOM beroperasi menjadi sebuah kompensator sinkron dimana eksitasinya lebih besar atau lebih kecil dari tegangan

terminal. Operasi ini menyediakan kontrol yang jauh lebih tinggi, khususnya dengan konverter yang menggunakan GTO, MCT, atau IGBT. Keunggulan dari STATCOM ini adalah :

1. Daerah operasi yang lebih lebar yang menyediakan reaktansi kapasitif walaupun pada tegangan yang rendah.
2. Memiliki rating yang lebih kecil jika dibandingkan dengan SVC konvensional untuk mencapai kestabilan yang sama.
3. Rating *transient* meningkat dan kemampuan yang handal dalam menangani gangguan sistem yang dinamis.

Konfigurasi dasar dari STATCOM ditunjukkan pada gambar 2.10 sebagai berikut :



Gambar 2.10 STATCOM

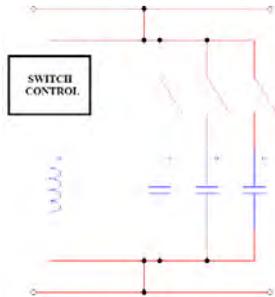
BAB 3

STATIC VAR COMPENSATOR TIPE FC-TCR

3.1. Kompensasi Daya Reaktif

Seperti dikutip dari referensi[5], secara teori, instalasi peralatan kompensasi daya 3 fasa aktif maupun reaktif dengan kontrol setiap fasanya merupakan metode terbaik untuk mengatasi masalah arus urutan negatif. Namun konfigurasi ini terlalu rumit dan memiliki harga yang kurang ekonomis. Maka dari itu, pada tugas akhir ini hanya dibahas kompensasi daya reaktif.

Saat kondisi beban yang berubah – ubah, dibutuhkan peralatan yang mampu meng-kompensasi secara kontinyu, dan secara cepat. Dari sinilah elektronika daya dibutuhkan untuk mampu mengendalikan masalah ini secara cepat dan kontinyu. Maka dibutuhkanlah *Static VAR Compensator (SVC)*. SVC tipe *Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)* digunakan karena mampu menyeimbangkan setiap fasa. Fungsi SVC diperoleh dengan *switching thyristor* secara cepat menghubungkan atau memutuskan induktor maupun kapasitor pada jaringan transmisi. Namun kekurangan SVC juga didapati efisiensi yang rendah jika terjadi turunnya tegangan pada transmisi secara signifikan. Topologi SVC digambarkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 *Static VAR Compensator*

Salah satu keunggulan dari kompensator statis ialah kemampuan untuk mempertahankan suatu tegangan konstan pada terminalnya dengan adanya pengaturan yang kontinu terhadap daya reaktif. Keunggulan lainnya ialah kecepatan respon terhadap perubahan kecil.

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

3.2. Karakteristik *Static VAR Compensator* (SVC)

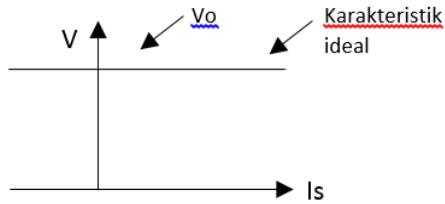
3.2.1. Karakteristik Umum

Berdasarkan referensi[6], *Static VAR Compensator* memiliki beberapa karakteristik umum sebagai berikut :

1. Tidak memiliki bagian yang berotasi.
2. Waktu respon yang sangat cepat.
3. Kontrol pada setiap fasa.
4. Syarat pemeliharaan yang rendah.
5. Mengurangi rugi – rugi.
6. Reliabilitas tinggi.
7. Kontribusi yang sangat kecil terhadap kapasitas sistem hubung singkat.
8. Merupakan pembangkit harmonisa pada sistem kecuali pada rangkaian *Thyristor Switched Capacitor* (TSC).

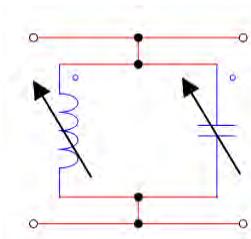
3.2.2. Karakteristik Ideal

Untuk karakteristik idealnya, SVC mampu mempertahankan tegangan sistem secara konstan, memiliki kapasitas penyerapan maupun pembangkitan daya reaktif (VAR) pada sistem tanpa rugi – rugi daya aktif maupun reaktif, dan memberikan respon yang cepat. Kinerja dari SVC diilustrasikan pada gambar 3.2, dimana tegangan pada suatu bus tidak terpengaruh oleh dampak arus *lagging* maupun *leading*.



Gambar 3.2 Karakteristik kompensator ideal

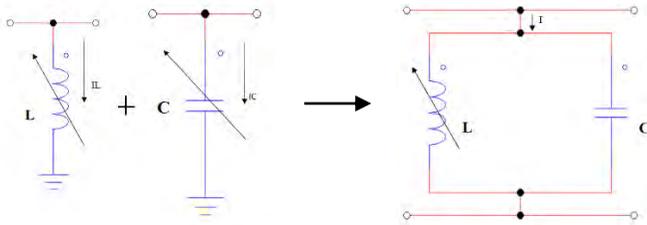
Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa operasi sistem tenaga SVC sama dengan kapasitor *shunt* dan induktor *shunt*, dimana keduanya dapat mengatur tegangan juga daya reaktif pada terminal atau bus seperti pada gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Kompensator ideal

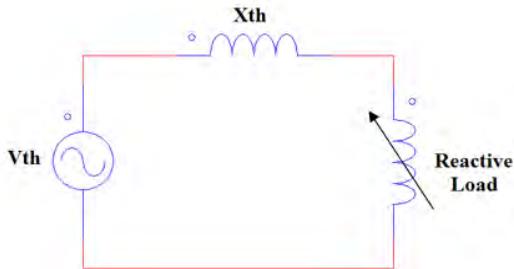
3.2.3. Karakteristik Riil

Untuk mengetahui bagaimana SVC bekerja maka karakteristik SVC dan sistem perlu diperhitungkan bersama. Pada gambar 3.4 mengilustrasikan deviasi karakteristik SVC yang terdiri dari kapasitor bernilai tetap dan reaktor yang terkendali. Karakteristik gabungan diperoleh dengan penambahan karakteristik masing – masing komponen seperti pada gambar.



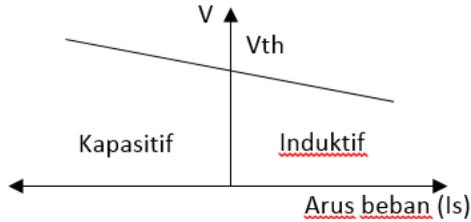
Gambar 3.4 Rangkaian gabungan SVC

Karakteristik V/I dapat ditentukan dengan rangkaian ekuivalen Thevenin seperti yang diilustrasikan dari tegangan bus yang diatur oleh SVC pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Rangkaian ekuivalen thevenin sistem

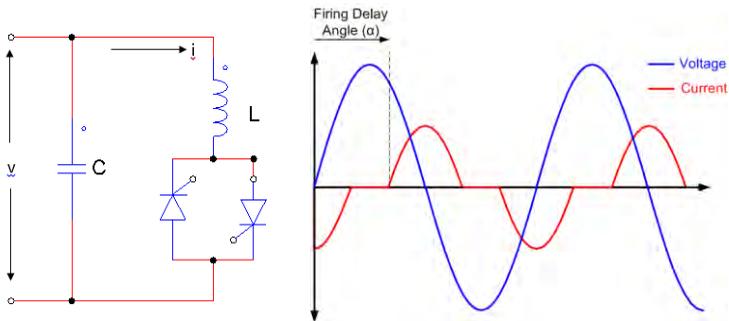
Impedansi thevenin yang dominan ialah reaktansi bersifat induktif seperti pada gambar diatas. Hubungan tegangan dan arus reaktif dapat dilihat dari karakteristik pada gambar 3.6. Tegangan V naik secara linier dan arus beban kapasitif turun secara linier pula dengan arus induktif.



Gambar 3.6 Karakteristik tegangan / arus reaktif

3.3. Thyristor Controlled Reactor (TCR)

Sesuai dengan yang dikutip pada referensi[2], saat kondisi beban pada sistem selalu berubah –ubah, diperlukan suatu peralatan yang mampu mengkompensasi daya reaktif secara kontinyu dan cepat. Dari itulah salah satu keunggulan dari teknologi elektronika daya. Maka dari itu pada peralatan SVC digunakan lah TCR dimana memiliki konfigurasi reaktor dengan *thyristor* yang terhubung anti paralel seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7. Jika TCR dihubungkan secara paralel dengan suatu kapasitor bernilai tetap (*Fixed Capacitor*) pada suatu bus maka akan dapat mengontrol daya reaktif baik *leading* maupun *lagging*.



Gambar 3.7 Rangkaian TCR dan gelombang keluarannya

Dua buah *Thyristor* yang terhubung anti paralel pada TCR bekerja layaknya *bi-directional switch* dimana *thyristor* T1 akan terkonduksi pada

setengah gelombang positif dan *thyristor* T2 akan terkonduksi pada setengah gelombang negatif.

Sudut penyalan (*Firing Delay Angle*) mengakibatkan berkurangnya rugi daya pada *thyristor*, namun disamping itu juga mengakibatkan harmonisa sehingga mengubah bentuk gelombang sinusoidal. *Range* untuk pengaturan sudut penyalan (α) mulai dari 90° hingga 180° . Saat sudut 90° menyebabkan *thyristor* akan terkonduksi secara penuh, sedangkan saat sudut 180° *thyristor* tidak terkonduksi atau dalam kondisi *blocked mode*. Sudut penyalan antara 0° hingga 90° tidak diperbolehkan karena justru akan menghasilkan arus tak simetri pada komponen DC.

Pengaruh penambahan sudut penyalan adalah berkurangnya komponen harmonisa dasar dari arus, sedangkan nilai induktansi pada reaktor akan bertambah dan daya reaktif akan berkurang berbanding lurus dengan arus. Dengan pengaturan komponen fundamental dari arus, TCR merupakan susceptansi yang dapat diatur sehingga dapat diaplikasikan sebagai suatu komponen statis. Berdasarkan rangkaian pada gambar 3.7, nilai arus sesaat yang disuplai oleh tegangan sumber $v = \sqrt{2} V \sin \omega t$ dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} V \sin \omega t \quad (3.1)$$

Inisial kondisi pada persamaan (3.1) adalah $i = 0$ saat $\omega t = \alpha$, sehingga dapat persamaan dapat dinyatakan :

$$i = \frac{\sqrt{2} V}{\omega L} [\cos \alpha - \cos \omega t] \quad \dots \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \quad (3.2)$$

$$i = 0 \quad \dots \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \quad (3.3)$$

Dimana :

V = tegangan rms sumber

ω = kecepatan sudut pada tegangan sumber

σ = sudut konduksi

L = induktansi pada reaktor

α = sudut penyalan thyristor

Arus fundamental pada reaktor dapat dihitung dengan analisis Fourier dan dinyatakan fungsi terhadap sudut penyalan sebagai berikut :

$$I_L = \frac{2V}{\pi\omega L} \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \quad (3.4)$$

Persamaan (3.4) dapat ditulis kembali sebagai berikut :

$$I_L = B(\alpha) \cdot V \quad (3.5)$$

Dimana $B(\alpha)$ merupakan susceptansi terkontrol yang dapat diatur nilainya melalui sudut penyalan, dan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$B(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi\omega L} \quad (3.6)$$

Saat sudut penyalan diatur antara 90° hingga 180° , susceptansi ekuivalen pada reaktor akan berubah juga. Semakin besar sudut penyalan, akan semakin kecil nilai arus fundamental pada reaktor dan secara otomatis mengurangi nilai susceptansi juga mengurangi nilai daya reaktifnya. Oleh karena itu, TCR digunakan sebagai susceptansi yang mampu dikontrol untuk rangkaian SVC.

3.3.1. Karakteristik Operasi TCR Pada SVC

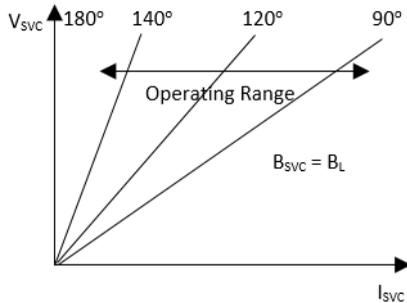
Konfigurasi sederhana SVC terdiri dari TCR yang terhubung paralel dengan sistem. Pada analisa kompensator, karakter frekuensi dasar sangat diperhatikan. Pada kondisi praktek, harmonisa dikurangi hingga mencapai nilai yang sangat rendah. Seluruh cabang TCR digantikan oleh variabel reaktor kontinyu yang sebanding. Arus yang sinusoidal mengalir dalam reaktor ini sama dengan komponen dasar arus non sinusoidal yang juga mengalir dalam TCR. Diketahui bahwa BTCR merupakan susceptansi BSVC dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$I_{SVC} = V_i B_{SVC} \quad (3.7)$$

Terdapat 2 jenis karakteristik operasi SVC yang dijelaskan sebagai berikut :

3.3.1.1. Karakteristik Tegangan – Arus

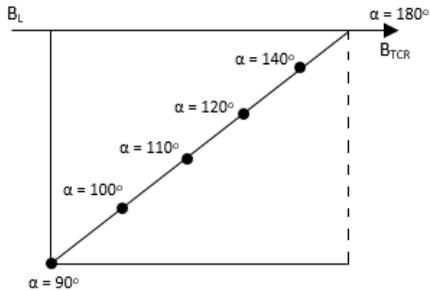
Karakteristik tegangan – arus ditunjukkan pada gambar 3.8. Karakteristik ini menunjukkan arus SVC sebagai fungsi tegangan sistem untuk sudut penyalan yang berbeda. Karakteristik ini memiliki arti yang sangat luas. Tidak ada sistem kontrol yang digunakan untuk mengubah sudut penyalan, setiap titik operasi didalam 2 batas mungkin tergantung pada tegangan sistem dan pengaturan sudut penyalan (arus – arus dan tegangan yang lain mungkin juga ditampilkan). Karakteristik ini dengan jelas menunjukkan batasan jangkauan operasi, dan mungkin juga meliputi karakteristik *steady state* untuk beberapa kontrol yang lain. Karakteristik ini merupakan cara yang biasa digunakan karena menunjukkan unjuk kerja SVC pada kondisi *steady state*.



Gambar 3.8 Karakteristik tegangan – arus TCR

3.3.1.2. Karakteristik Susceptansi

Karakteristik susceptansi ditunjukkan pada gambar 3.9. Karakteristik ini menunjukkan perubahan susceptansi total SVC ketika susceptansi TCR diubah – ubah. Karakteristik susceptansi pada keadaan ini sangat sederhana karena $B_{SVC} = B_{TCR}$. Perhatikan bahwa susceptansi TCR bernilai negatif, menunjukkan bahwa TCR menyerap daya reaktif. Karakteristik ini sangat penting dalam menganalisa sistem kontrol, pengaturan terhadap sudut penyalan yang akan mengatur nilai B_{SVC} yang akhirnya mempengaruhi sistem.



Gambar 3.9 Karakteristik susceptansi TCR

3.3.2. Keunggulan TCR

TCR memiliki beberapa keunggulan sebagai berikut :

1. Dapat mengatur 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 ini reaktansi TCR akan bersifat resistif – induktif. Resonansi ini tidak boleh dibiarkan terjadi terlalu lama sehingga harus diredam.
4. TCR dapat dipakai untuk menaikkan tegangan, dimana TCR terdapat kapasitor seri yang bersifat reaktansi kapasitif yang dapat mengkompensasi reaktansi saluran sehingga regulasi tegangan dapat dikurangi.

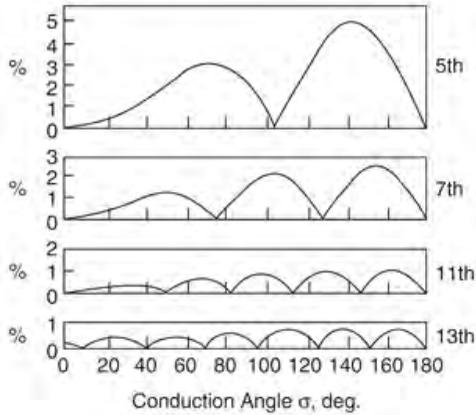
3.3.3. Pengaruh TCR Pada Harmonisa Sistem

Dengan mengurangi besar sudut penyalan akan memiliki 2 pengaruh penting. Pertama, rugi – rugi daya akan berkurang pada kontrol *thyristor* dan reaktor itu sendiri. Kedua, bentuk arus semakin tidak sinusoidal, dengan kata lain TCR mengakibatkan arus harmonisa pada sistem. Jika sudut penyalan seimbang pada tiap *thyristor* tiap fasanya, semua harmonisa genap akan timbul, dan nilai efektif dari komponen harmonisa dapat dinyatakan sebagai berikut :

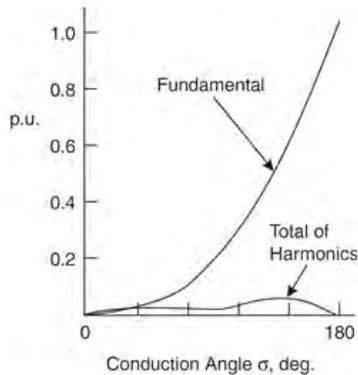
$$I_n = \frac{4}{\pi} \frac{V}{XL} \left(\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos \alpha \frac{\sin n \alpha}{n} \right) \quad (3.8)$$

Dimana $n = 3, 5, 7, 9, \dots$

Pada gambar 3.10 menunjukkan beberapa variasi amplitudo untuk beberapa orde harmonisa tergantung dari besar sudut penyalaan, dan pada gambar 3.11 menunjukkan beberapa variasi total harmonisa.



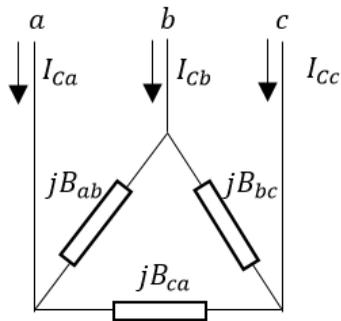
Gambar 3.10 Komponen arus harmonisa pada TCR[8]



Gambar 3.11 Total harmonisa pada arus TCR[8]

3.3.4. Rangkaian TCR Tiga Fasa

Rangkaian TCR 3 fasa terdiri dari 3 rangkaian TCR 1 fasa yang terhubung delta seperti yang ditunjukkan gambar 3.12. Tujuan dari konfigurasi ini yaitu agar seluruh harmonisa yang ditimbulkan bersirkulasi pada hubungan delta yang tertutup dan tidak mengganggu saluran. Selain itu, kedua sisi thyristor yang terpasang anti paralel terhubung pada induktor sehingga dapat mencegah munculnya tegangan AC penuh yang dapat merusakkan pada terminal *thyristor* apabila terjadi hubung singkat pada ujung terminal reaktor.



Gambar 3.12 Rangkaian TCR 3 fasa terhubung delta

3.4. Fixed Capacitor – Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)

FC-TCR merupakan SVC dengan gabungan dari dua komponen yang saling berlawanan, yaitu kapasitor dan induktor / reaktor yang dapat diatur. TCR secara kontinyu hanya mampu diatur pada kondisi daya reaktif *lagging*. Untuk dapat diatur menjadi *leading*, sebuah kapasitor bernilai tetap dihubungkan secara paralel dengan TCR. Susunan konfigurasi FC-TCR ditunjukkan pada gambar 3.1 sebelumnya.

Fixed Capacitor mengembangkan *range* kontrol SVC pada sistem yang *leading*. Arus SVC dapat dinyatakan sebagai fungsi tegangan sistem, dan susceptansi kompensator B_{svc} dinyatakan sebagai berikut :

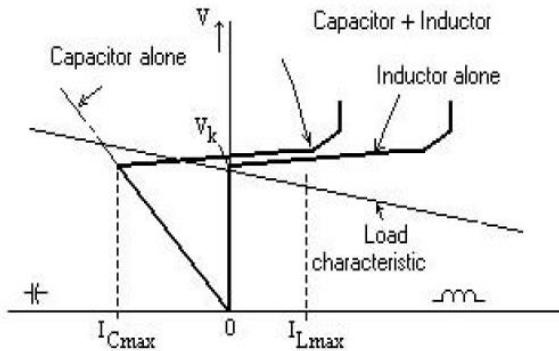
$$I_{svc} = V \cdot B_{svc} \quad (3.9)$$

Dimana :

$$B_{SVC} = B_{FC} + B_{TCR} \quad (3.10)$$

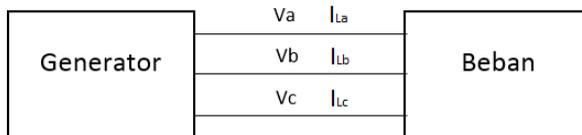
$$B_{FC} = j\omega C \quad (3.11)$$

Kurva karakteristik V-I pada FC-TCR ditunjukkan pada gambar 3.13 sebagai berikut :



Gambar 3.13 Karakteristik operasi FC-TCR[7]

3.5. Reduksi Arus Urutan Negatif Melalui SVC FC-TCR Dengan Metode Komponen Simetri



Gambar 3.14 Sistem sebelum kompensasi

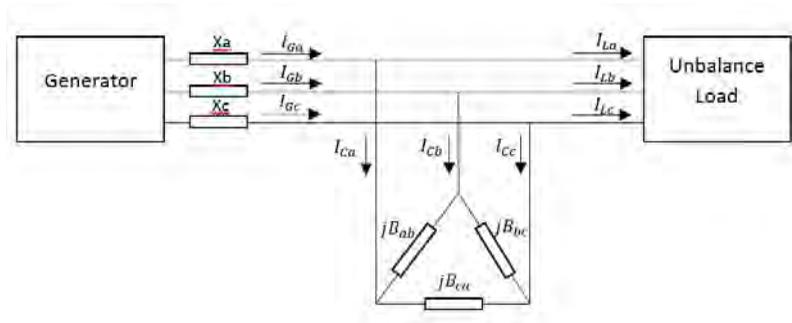
Diagram sistem sebelum diberi kompensasi ditunjukkan oleh gambar 3.14. Sesuai dengan yang dikutip dari referensi[5], diasumsikan bahwa beban sistem tidak seimbang sehingga timbul arus urutan negatif

pada terminal generator. Hubungan antara tegangan dan arus pada gambar dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_a &= I_{La} Z_{La} \\ V_b &= I_{Lb} Z_{Lb} \\ V_c &= I_{Lc} Z_{Lc} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Maka dibutuhkan suatu peralatan yang mampu mengkompensasi arus urutan negatif yang dapat mengganggu kinerja generator. Oleh karena itu, suatu SVC tipe FC-TCR di desain untuk mengatasi masalah tersebut. Konfigurasi sistem secara keseluruhan menggunakan SVC ditunjukkan pada gambar 3.15. Setelah dikompensasi, arus sumber pada generator menjadi penjumlahan dari arus beban dan arus pada kompensator, sehingga dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_{Ga} &= I_{La} + I_{Ca} \\ I_{Gb} &= I_{Lb} + I_{Cb} \\ I_{Gc} &= I_{Lc} + I_{Cc} \end{aligned} \quad (3.13)$$



Gambar 3.15 Sistem dengan kompensator

Komponen simetri dari arus beban dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_{L0} \\ I_{L1} \\ I_{L2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_a}{Z_{La}} \\ \frac{V_b}{Z_{Lb}} \\ \frac{V_c}{Z_{Lc}} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Komponen simetri dari arus kompensator dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_{C0} \\ I_{C1} \\ I_{C2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ca} \\ I_{Cb} \\ I_{Cc} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Diasumsikan arus yang tak seimbang dapat dikompensasi secara sempurna oleh SVC, sehingga komponen arus urutan negatif pada arus generator sama dengan nol. Kompensator berfungsi untuk menyuntikkan besar arus tertentu untuk dapat mengurangi arus urutan negatif dari beban, seperti dinyatakan sebagai berikut :

$$I_{L2} + I_{C2} = 0 \quad (3.16)$$

Kompensator yang terhubung delta seperti pada gambar 3.15, di representasikan dengan susceptansi per fasa B_{ab} , B_{bc} , dan B_{ca} . Arus kompensator dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_{ab} &= jB_{ab} V_{ab} = jB_{ab}(V_a - V_b) = jB_{ab}(1 - a^2)V_{a1} \\ I_{bc} &= jB_{bc} V_{bc} = jB_{bc}(V_b - V_c) = jB_{bc}(a^2 - a)V_{a1} \\ I_{ca} &= jB_{ca} V_{ca} = jB_{ca}(V_c - V_a) = jB_{ca}(a - 1)V_{a1} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Dan dapat pula dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_{Ca} &= I_{ab} - I_{ca} = (jB_{ab}(1 - a^2) - jB_{ca}(a - 1))V_{a1} \\ I_{Cb} &= I_{bc} - I_{ab} = (jB_{bc}(a^2 - 1) - jB_{ca}(1 - a^2))V_{a1} \\ I_{Cc} &= I_{ca} - I_{bc} = (jB_{ca}(a - 1) - jB_{bc}(a^2 - a))V_{a1} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, dimana $a = 1 \angle 120^\circ$ merupakan operator kompleks. Dengan mensubstitusikan persamaan (3.18) ke dalam persamaan (3.15), komponen simetri pada arus kompensator dapat di representasikan sebagai fungsi dari susceptansi pada rangkaian kompensator, dan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$I_{C1} = j(B_{ab} + B_{bc} + B_{ca})V_{a1} \quad (3.19)$$

$$I_{C2} = j(a^2 B_{ab} + B_{bc} + a B_{ca})V_{a1} \quad (3.20)$$

Dengan mensubstitusikan komponen impedansi pada persamaan (3.14) dari persamaan (3.12), di dapatkan persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} I_{L0} \\ I_{L1} \\ I_{L2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{I_{La}}{V_a} \\ a^2 \frac{I_{Lb}}{V_b} \\ a \frac{I_{Lc}}{V_c} \end{bmatrix} V_{a1} \quad (3.21)$$

Dari persamaan diatas dapat diketahui bahwa komponen simetri dari arus beban setelah dikompensasi di representasikan oleh tegangan dan arus sebelum kompensasi. Arus urutan negatif pada sistem dianggap nol, sehingga persamaan (3.19) dan (3.20) disubstitusikan ke dalam persamaan (3.16) dan didapatkan persamaan berikut :

$$-j(a^2 B_{ab} + B_{bc} + a B_{ca}) + \frac{1}{3} \left(\frac{I_{La}}{V_a} + a \frac{I_{Lb}}{V_b} + a^2 \frac{I_{Lc}}{V_c} \right) = 0 \quad (3.22)$$

Nilai komponen urutan positif dapat diatur pada nilai apapun dengan tujuan koreksi faktor daya sistem. Namun untuk menyederhanakan perhitungan susceptansi pada kompensator, nilai urutan positif I_{C1} pada arus kompensator dianggap nol. Sehingga persamaan (3.22) dapat ditulis ulang menjadi berikut :

$$-j((1 - a^2)B_{bc} + (a - a^2)B_{ca}) + \frac{1}{3} \left(\frac{I_{La}}{V_a} + a \frac{I_{Lb}}{V_b} + a^2 \frac{I_{Lc}}{V_c} \right) = 0 \quad (3.23)$$

Dengan menghitung nilai riil dan imajiner pada persamaan (3.23), nilai susceptansi B_{bc} dan B_{ca} dapat ditemukan. Nilai susceptansi B_{ab} dapat dihitung dengan mensubstitusikan persamaan B_{bc} dan B_{ca} ke dalam persamaan (3.24), sehingga persamaan susceptansi kompensator dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} B_{ab} &= \frac{1}{3\sqrt{3}} \operatorname{Re} \left(\frac{I_{La}}{V_a} + a \frac{I_{Lb}}{V_b} + a^2 \frac{I_{Lc}}{V_c} \right) - \frac{1}{9} \operatorname{Im} \left(\frac{I_{La}}{V_a} + a \frac{I_{Lb}}{V_b} + a^2 \frac{I_{Lc}}{V_c} \right) \\ B_{bc} &= \frac{2}{9} \operatorname{Im} \left(\frac{I_{La}}{V_a} + a \frac{I_{Lb}}{V_b} + a^2 \frac{I_{Lc}}{V_c} \right) \\ B_{ca} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}} \operatorname{Re} \left(\frac{I_{La}}{V_a} + a \frac{I_{Lb}}{V_b} + a^2 \frac{I_{Lc}}{V_c} \right) - \frac{1}{9} \operatorname{Im} \left(\frac{I_{La}}{V_a} + a \frac{I_{Lb}}{V_b} + a^2 \frac{I_{Lc}}{V_c} \right) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

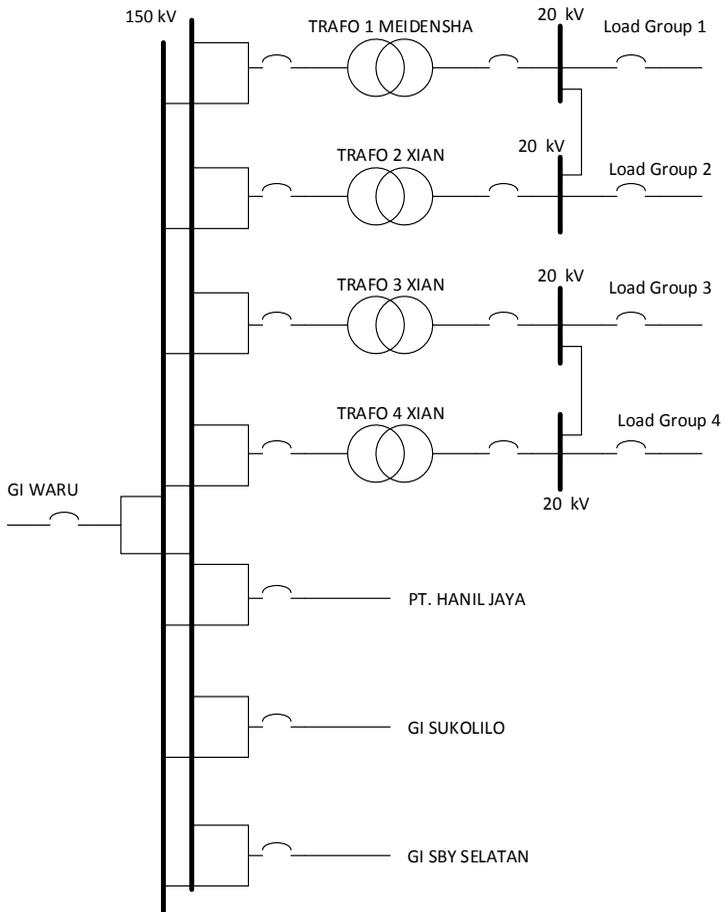
SIMULASI DAN ANALISIS

4.1. Single Line Diagram

Dalam tugas akhir ini, SVC dirancang berdasarkan kondisi kelistrikan yang sebenarnya sesuai dengan beban industri dengan harapan tugas akhir ini dapat diaplikasikan. Data yang digunakan yaitu diambil dari sistem distribusi PT. PLN (Persero) Gardu Induk Rungkut Surabaya. Gardu Induk ini disuplai dari Gardu Induk Waru dan menyuplai, PT. Hanil Jaya, Gardu Induk Sukolilo dan Gardu Induk Surabaya Selatan serta beberapa beban industri dan perumahan. Sistem distribusi ini merupakan tipe jaringan radial. Gardu Induk ini memiliki beberapa transformator 150 kV / 20 kV dengan menggunakan sistem *double busbar*.

Beban yang akan dianalisis nantinya yaitu pada salah satu *feeder* PT. Hanil Jaya. Pada *feeder* ini ditemukan fenomena ketidakseimbangan akibat beban yang fluktuatif (berubah – ubah). Hal tersebut disebabkan oleh mayoritas beban industri, juga karena industri ini merupakan industri peleburan baja. Pembebanan yang fluktuatif tersebut juga berdampak pada ketidakseimbangan arus beban. Selain itu hal tersebut mempengaruhi faktor daya sistem karena setiap beban yang berubah – ubah memiliki faktor daya yang berbeda pula. Maka dari itu *Static VAR Compensator* dirancang untuk mengatasi ketidakseimbangan beban yang menyebabkan timbulnya arus urutan negatif yang dapat mengganggu kinerja peralatan sumber seperti generator. *Feeder* PT. Hanil Jaya terhubung pada bus tegangan 150 kV dan tidak melewati transformator di Gardu Induk Rungkut Surabaya.

Untuk sistem distribusi Gardu Induk Rungkut diilustrasikan pada *Single Line Diagram* pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 *Single line diagram* gardu induk rungkut surabaya

Didapatkan data beban PT. Hanil Jaya pada Gardu Induk Rungkut Surabaya sebagai berikut :

Tabel 4.1 Data beban PT. Hanil Jaya

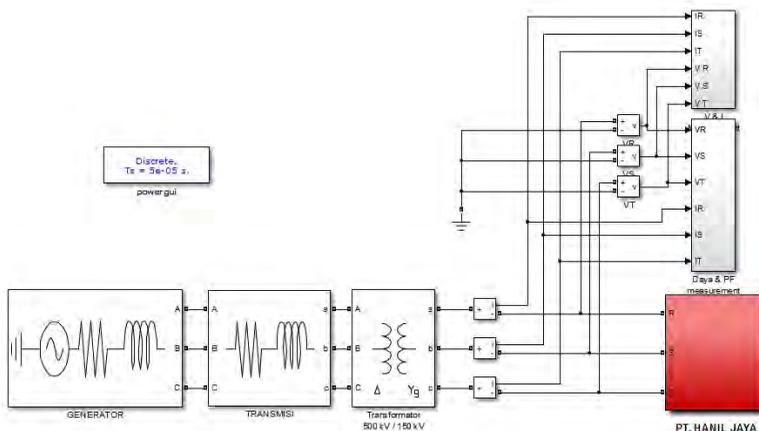
Tegangan (kV)	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)	Frekuensi (Hz)	Faktor Daya
83,06	4,97	4,03	49,8	0,77

4.2. Simulasi Sistem

Simulasi SVC tipe FC-TCR dilakukan menggunakan *software* MATLAB SIMULINK R2013a (8.1.0.604). Pada simulasi ini dibuat beberapa kondisi yaitu :

1. Simulasi sistem kondisi seimbang.
2. Simulasi sistem kondisi tak seimbang.
3. Simulasi sistem dengan kompensator.

Pada simulasi ini digambarkan sistem distribusi berdasarkan konfigurasi yang sebenarnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.2 berikut :



Gambar 4.2 Simulasi sistem kondisi seimbang

4.2.1. Simulasi Sistem Kondisi Seimbang

Pada kondisi ini beban per fasa dianggap seimbang. Konfigurasi beban sebagai berikut :

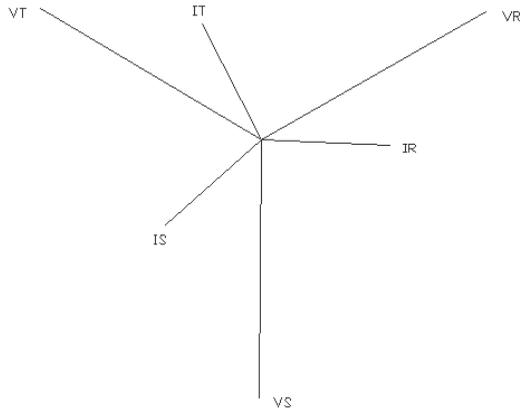
Tabel 4.2 Data konfigurasi beban seimbang

	Fasa R	Fasa S	Fasa T
Tegangan (kV)	150	150	150
Daya Aktif (MW)	1,67	1,67	1,67
Daya Reaktif (MVAR)	1,05	1,05	1,05

Setelah melakukan simulasi pada data tersebut, didapatkan data hasil sebagai berikut :

Tabel 4.3 Data simulasi kondisi beban seimbang

	Fasa R	Fasa S	Fasa T
Arus (A)	$7,589 \angle - 2,67$	$7,589 \angle - 122,7$	$7,589 \angle 117,3$
Tegangan (kV)	$86,53 \angle 29,48$	$86,53 \angle - 90,52$	$86,53 \angle 149,5$
Daya Aktif (MW)	1,66	1,66	1,66
Daya Reaktif (MVAR)	1,048	1,048	1,048
Faktor Daya	0,86	0,86	0,86



Gambar 4.3 Diagram fasor arus dan tegangan kondisi seimbang



Gambar 4.4 Gelombang arus sumber kondisi jika seimbang

Dari data diatas dapat ditentukan besar arus urutan nol (I_0), arus urutan positif (I_1), dan arus urutan negatif (I_2) sebagai berikut :

$$I_0 = 0,02 \angle -123,69 \quad \text{A}$$

$$I_1 = 7,585 \angle -56 \quad \text{A}$$

$$I_2 = 0,173 \angle 54,334 \quad \text{A}$$

Besarnya presentase ketidakseimbangan yaitu :

$$\% \text{ Unbalance} = \frac{0,173}{7,585} \times 100\% = 2,28 \%$$

Pada kondisi ini terlihat jelas bahwa arus beban per fasa seimbang karena beban per fasa sama. Hal tersebut juga dibuktikan dengan nilai arus urutan negatif yang bernilai kecil sebesar 0,173 A. Selain itu juga ditunjukkan oleh presentase ketidakseimbangan yang kecil sebesar 2,28%. Sehingga menandakan sistem tersebut aman dari gangguan ketidakseimbangan.

4.2.2. Simulasi Sistem Kondisi Tak Seimbang

Untuk memperoleh kondisi yang tak seimbang, maka beban diatur dengan nilai sebagai berikut :

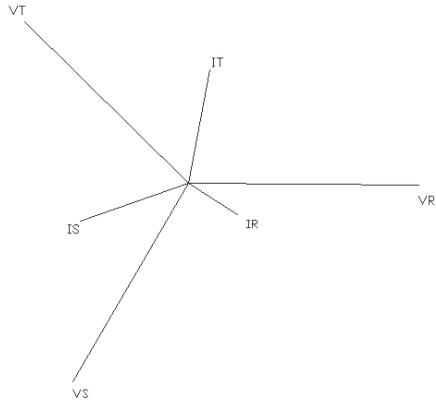
Tabel 4.4 Data konfigurasi beban tak seimbang

	Fasa R	Fasa S	Fasa T
Tegangan (kV)	150	150	150
Daya Aktif (MW)	0,8	2,05	2,05
Daya Reaktif (MVAR)	0,5	1,75	1,75

Setelah disimulasikan menggunakan MATLAB SIMULINK R2013a, didapatkan data hasil sebagai berikut :

Tabel 4.5 Data simulasi kondisi beban tak seimbang

	Fasa R	Fasa S	Fasa T
Arus (A)	3,62 \angle - 32,46	10,36 \angle - 160,9	10,36 \angle 79,06
Tegangan (kV)	86,6 \angle - 0,45	86,6 \angle - 120,4	86,6 \angle 119,6
Daya Aktif (MW)	0,8	2,05	2,05
Daya Reaktif (MVAR)	0,5	1,75	1,75
Faktor Daya	0,84	0,76	0,76



Gambar 4.5 Diagram fasor arus dan tegangan kondisi tak seimbang



Gambar 4.6 Gelombang arus sumber kondisi tak seimbang

Dari data diatas dapat ditentukan besar arus urutan nol (I_0), arus urutan positif (I_1), dan arus urutan negatif (I_2) sebagai berikut :

$$I_0 = 0,8 \angle 39,5 \quad \text{A}$$

$$I_1 = 8,09 \angle - 50,2 \quad \text{A}$$

$$I_2 = 2,27 \angle - 45,5 \quad \text{A}$$

Besarnya presentase ketakseimbangan yaitu :

$$\% \text{ Unbalance} = \frac{2,27}{8,09} \times 100\% = 28 \%$$

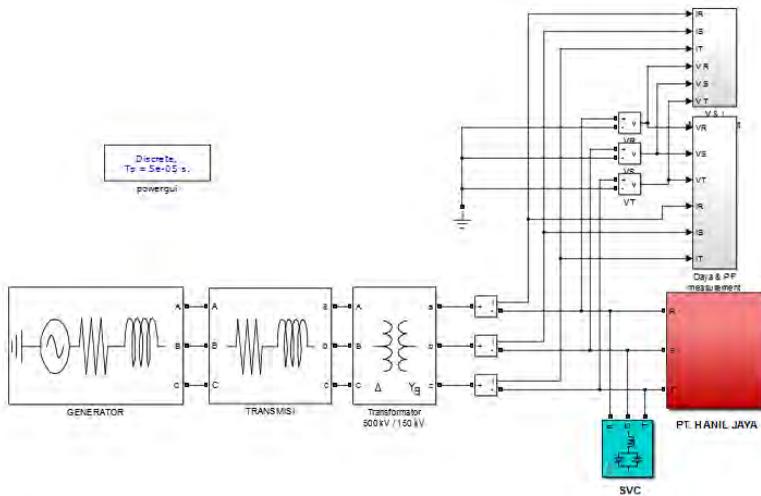
Pada kondisi ini terjadi ketakseimbangan beban. Terlihat dari besarnya arus tiap fasa yang tak sama, dan dibuktikan dengan besarnya nilai arus urutan negatif sebesar 2,27 A. Hal tersebut juga ditunjukkan oleh presentase ketakseimbangan sebesar 28%.

4.2.3. Simulasi Sistem Dengan Kompensator

Untuk mengatasi permasalahan ketakseimbangan tersebut, diperlukan peralatan yang mampu mengkompensasi sistem dengan cara mereduksi nilai arus urutan negatif sehingga mampu mengurangi presentase ketakseimbangan.

4.2.3.1. Desain SVC Tipe FC-TCR

Dalam tugas akhir ini digunakan SVC tipe *Fixed Capacitor – Thyristor Contolled Reactor* (FC-TCR) sebagai peralatan penyeimbang beban. SVC jenis ini terdiri dari rangkaian kapasitor bernilai tetap yang diparalel reaktor dengan *switch* berupa *thyristor* yang dapat dikontrol sudut penyalannya. Sudut penyalan (α) ini nantinya yang akan diatur untuk mendapatkan nilai susceptansi yang tepat sehingga mampu mengatur nilai arus per fasa. SVC ini akan dipasang paralel sebelum beban dengan susceptansi per fasa terkonfigurasi delta. Simulasi rangkaian sistem yang dilengkapi dengan SVC ditunjukkan pada gambar 4.7 berikut :



Gambar 4.7 Simulasi sistem dengan SVC

Dalam bab sebelumnya telah dijelaskan rumusan untuk menentukan nilai susceptansi per fasa yang tepat untuk mengkompensasi sistem. Nilai susceptansi per fasa tersebut didapatkan dari nilai arus dan tegangan sistem per fasa. Berdasarkan data tabel 4.5, nilai susceptansi per fasa didapatkan sebagai berikut :

$$B_{RS} = -25,74 \times 10^{-6} \quad \text{U}$$

$$B_{ST} = 30,08 \times 10^{-6} \quad \text{U}$$

$$B_{TR} = -4,34 \times 10^{-6} \quad \text{U}$$

Lalu berdasarkan rumusan perbaikan faktor daya yang telah dibahas bab sebelumnya, nilai kapasitansi untuk filter pada SVC didapatkan sebagai berikut :

$$\cos\theta \text{ awal} = 0,77 \quad \rightarrow \quad \cos\theta \text{ diharapkan} = 0,95$$

$$\Delta Q = P [\tan(\cos^{-1}\text{awal}) - \tan(\cos^{-1}\text{baru})]$$

$$\Delta Q = 2,5 \text{ MVAR}$$

$$C = \frac{\Delta Q}{\omega V^2}$$

$$C = 0,36 \times 10^{-6} \text{ F} \quad \rightarrow \quad B_C = 113,04 \times 10^{-6} \text{ U}$$

Sehingga nilai susceptansi induktif per fasa pada SVC didapatkan sebagai berikut :

$$B_{RS}^L = -25,74 \times 10^{-6} - 113,04 \times 10^{-6} = -138,78 \times 10^{-6} \text{ U}$$

$$B_{ST}^L = 30,08 \times 10^{-6} - 113,04 \times 10^{-6} = -82,96 \times 10^{-6} \text{ U}$$

$$B_{TR}^L = -4,34 \times 10^{-6} - 113,04 \times 10^{-6} = -117,38 \times 10^{-6} \text{ U}$$

Setelah didapatkan nilai susceptansi induktif per fasa, digunakan rumusan untuk mendapatkan nilai sudut penyalaan (α) sebagai berikut :

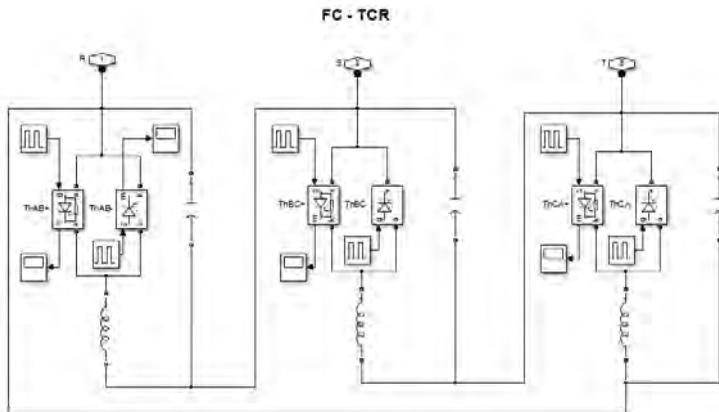
$$B_L(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi\omega L}$$

Dengan menentukan nilai susceptansi induktif terlebih dahulu yang disamakan dengan kompensasi kapasitif ($L = 27,7 \text{ H}$) maka didapatkan nilai sudut penyulutan setiap fasa sebagai berikut:

$$\alpha_{RS} = 90,5^\circ$$

$$\alpha_{ST} = 108,9^\circ$$

$$\alpha_{TR} = 97,37^\circ$$

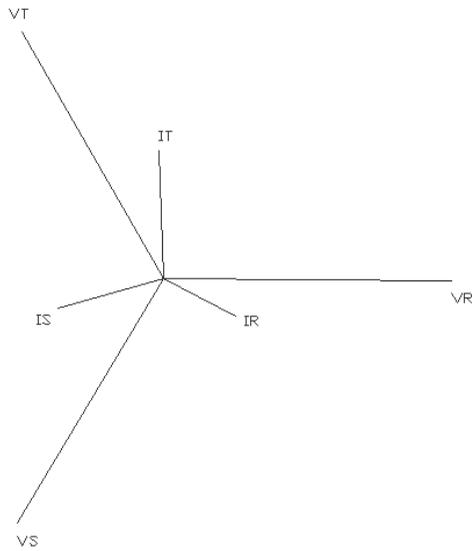


Gambar 4.8 Simulasi rangkaian SVC tipe FC-TCR

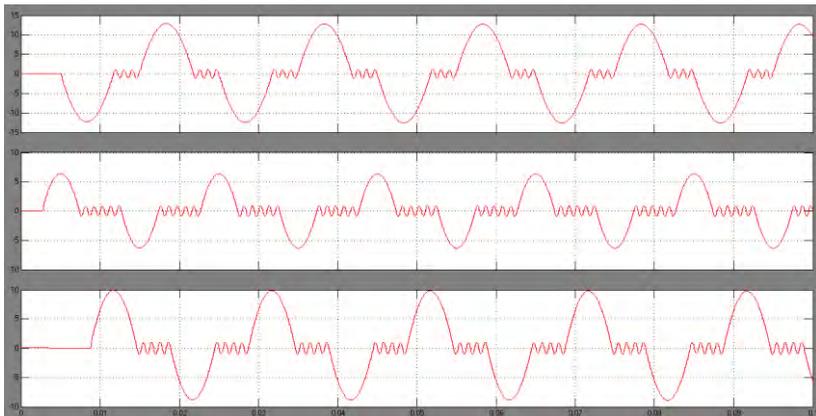
Gambar 4.8 menunjukkan konfigurasi rangkaian FC-TCR yang tersusun delta. Setelah didapatkan parameter – parameter tersebut, didapatkan data hasil sebagai berikut :

Tabel 4.6 Data simulasi sistem dengan kompensator

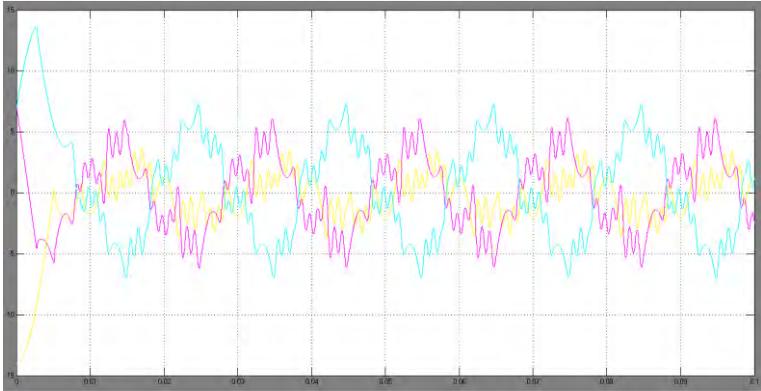
	Fasa R	Fasa S	Fasa T
Arus (A)	$5,6 \angle - 27,84$	$7,7 \angle - 163,9$	$9,2 \angle 99,9$
Tegangan (kV)	$86,66 \angle - 0,45$	$86,66 \angle - 120,5$	$86,66 \angle 119,5$
Daya Aktif (MW)	1,125	1,467	2,308
Daya Reaktif (MVAR)	0,582	1,388	0,823
Faktor Daya	0,88	0,72	0,94



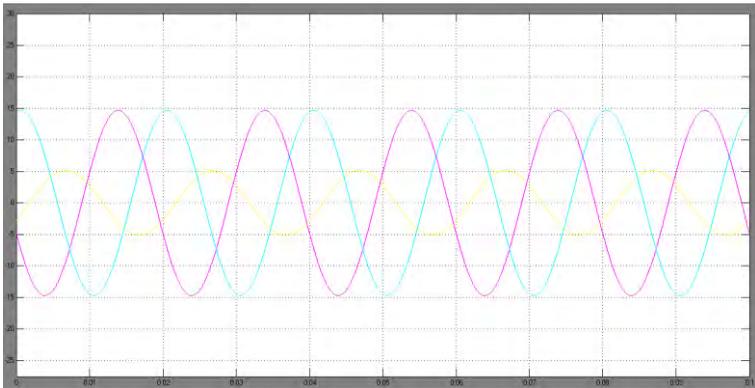
Gambar 4.9 Diagram fasor arus dan tegangan sistem dengan kompensator



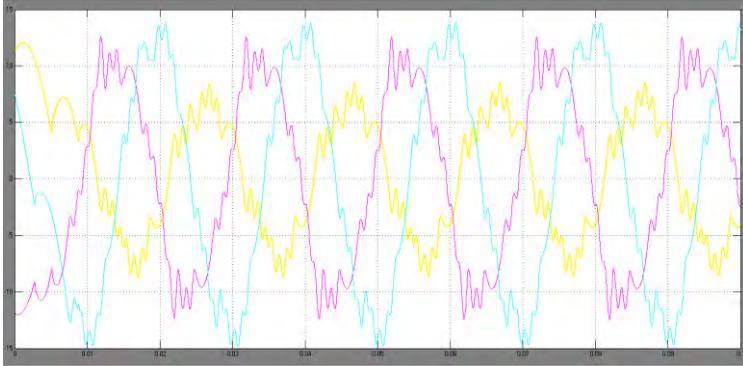
Gambar 4.10 Gelombang arus pada TCR (fasa R, fasa S, dan fasa T)



Gambar 4.11 Gelombang arus pada SVC



Gambar 4.12 Gelombang arus pada beban



Gambar 4.13 Gelombang arus sumber dengan SVC

Dari data diatas dapat ditentukan besar arus urutan nol (I_0), arus urutan positif (I_1), dan arus urutan negatif (I_2) sebagai berikut :

$$I_0 = 0,9 \angle 26,3 \quad \text{A}$$

$$I_1 = 7,38 \angle -59,4 \quad \text{A}$$

$$I_2 = 0,32 \angle 68,9 \quad \text{A}$$

Besarnya presentase ketakseimbangan yaitu :

$$\% \text{ Unbalance} = \frac{0,32}{7,38} \times 100\% = 4,4 \%$$

Berdasarkan data hasil pada tabel 4.6 menunjukkan arus tiap fasa pada sistem setelah pemasangan SVC menjadi lebih seimbang.. Dengan mengatur besarnya sudut penyalan pada TCR setiap fasa nya, didapatkan nilai arus urutan negatif yang semula sebesar 2,2 A berkurang menjadi 0,32 A. Presentase ketakseimbangan pun semula sebesar 28% berkurang menjadi sebesar 4,4%.

BAB 5

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Pada sistem Gardu Induk Rungkut Surabaya disimulasikan pada 3 kondisi, yaitu kondisi sistem seimbang, kondisi sistem tak seimbang, dan kondisi sistem dengan kompensator. Pada kondisi seimbang, presentase ketakseimbangan bernilai kecil karena beban dengan jumlah yang rata pada setiap fasanya.

Dari simulasi kondisi sistem tak seimbang, didapatkan arus urutan negatif sebesar 2,2 A dengan presentase ketakseimbangan sebesar 28%. Dengan menggunakan SVC tipe FC – TCR, mampu mereduksi arus urutan negatif menjadi 0,32 A dan presentase ketakseimbangan mampu turun menjadi 4,4%. Nilai tersebut telah berhasil memenuhi standar minimum ketakseimbangan.

5.2. Saran

Karena SVC tipe FC – TCR menggunakan elektronika daya pada rangkaianannya, hal yang perlu diperhatikan yaitu harmonisa yang timbul. Maka dibutuhkan desain filter harmonisa yang tepat untuk menanggulangnya. Selain itu perlu diperhatikan pula, faktor daya sistem perlu disesuaikan dengan adanya kompensator ini.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Penangsang, Ontoseno. “*Analisis Aliran Daya*”. ITS Press, Surabaya, 2006.
- [2] Rashid, Muhammad H. “*Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, And Applications 3rd Edition*”. University of West Florida. 2011.
- [3] C. L. Fortescue, “*Method of Symmetrical Coordinates Applied To The Solution of Polyphase Networks*”, Transactions of AIEE, vol 37, 1918, pp. 1027-1140.
- [4] Grainger, John J., Stevenson, William D., “*Power System Analysis*”. International Editions. 1994.
- [5] Lee, Wei Jen. Ho, Tze Yee. Liu, Jih Phong. Liu, Yui Hong. “*Negative Sequence Current Reduction For Generator/Turbine Protection*”. Texas. 1993.
- [6] Bachtiar, Andy. “*Penggunaan SVC Pada Sistem Tidak Seimbang*”. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya. 2006.
- [7] MATLAB SIMULINK R2013a (8.1.0.604). mathworks.inc (help)
- [8] Barua, Sajib, “Thyristor-Controlled Equipment”
<<http://protorit.blogspot.com/2013/03/thyristor-controlled-equipment.html>>, 2013.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap I Nyoman Aditya dan dilahirkan di Balikpapan pada tanggal 27 Juli 1992. Penulis memulai pendidikan di SD Nasional KPS Balikpapan dan melanjutkan pendidikan SMP Nasional KPS Balikpapan dan SMA Negeri 5 Denpasar. Pada tahun 2010, penulis melanjutkan pendidikan jenjang Diploma di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya dengan konsentrasi bidang studi Teknik Elektro Industri. Pada tahun 2013 penulis berhasil menyelesaikan pendidikan diploma dan pada saat itu juga melanjutkan pendidikan untuk jenjang sarjana. Pendidikan sarjana ditempuh di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di jurusan teknik elektro dengan konsentrasi bidang studi sistem tenaga.

Halaman ini sengaja dikosongkan