

**TESIS**

**OPTIMASI TRANSMISI DAYA MENGGUNAKAN  
KONDENSOR SINKRON DAN ALIRAN DAYA BERBASIS  
PATTERN SEARCH PARTICLE SWARM OPTIMIZATION**

*Power Transmission Optimization  
Using Synchronous Condenser  
Incorporated with Hybrid  
Particle Swarm Pattern Search Algorithm*

**RISHAN KARANGAN  
D032202010**



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**PENGAJUAN TESIS**

**OPTIMASI TRANSMISI DAYA MENGGUNAKAN  
KONDENSOR SINKRON DAN ALIRAN DAYA BERBASIS  
PATTERN SEARCH PARTICLE SWARM OPTIMIZATION**

Tesis  
Sebagai Salah Satu Syarat Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Ilmu Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

**RISHAN KARANGAN  
D032202010**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

## TESIS

### **OPTIMASI TRANSMISI DAYA MENGGUNAKAN KONDENSOR SINKRON DAN ALIRAN DAYA BERBASIS *PATTERN SEARCH PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

**RISHAN KARANGAN  
D032202010**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 24 Mei 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph.D  
NIP. 197804242001122001

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. H. Rhiza S. Sadjad, MS.EE  
NIP. 195709061982031004

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM  
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi  
S2 Teknik Elektro



Dr.Eng. Ir. Wardi, S.T, M.Eng  
NIP. 1972082819997031003

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Rishan Karangan  
Nomor Mahasiswa : D032202010  
Program Studi : Magister Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “OPTIMASI TRANSMISI DAYA MENGGUNAKAN KONDENSOR SINKRON DAN ALIRAN DAYA BERBASIS PATTERN SEARCH PARTICLE SWARM OPTIMIZATION” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (ibu Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph.D sebagai pembimbing utama dan bapak Dr. Ir. H. Rhiza S. Sadjad, MS.EE sebagai pembimbing pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di *IEEE Xplore*<sup>®</sup> sebagai artikel dengan judul “*Power Transmission Optimization Using Synchronous Condenser Incorporated with Hybrid Particle Swarm Pattern Search Algorithm*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 24 Mei 2023

Yang menyatakan



Rishan Karangan

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Kuasa atas rahmatnya sehingga tesis ini dapat diselesaikan.

Gagasan utama Optimasi Transmisi Daya menggunakan kondensor sinkron yang digabungkan dengan algoritma hibrid *pattern search particle swarm optimization* (PSPSO) adalah penurunan performa sistem tenaga listrik yang diakibatkan pengoperasian pembangkit energi terbarukan intermiten dan penghentian pengoperasian pembangkit termal yang semakin banyak sehingga dengan penggunaan kondensor sinkron yang dipadukan dengan algoritma hibrid PSPSO diharapkan dapat memaksimalkan performa sistem tenaga listrik dengan meningkatkan profil tegangan dan menurunkan rugi-rugi daya.

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan tesis, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka tesis ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Ibu Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph. D sebagai pembimbing utama dan bapak Dr. Ir. H. Rhiza S. Sadjad, MS.EE sebagai pembimbing pendamping.
2. Prof. Dr. Ir. Salama, M.T. sebagai komisi tim penguji.
3. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
4. Bapak Anton Sugiarto dari PT. PLN (Persero) UIP3B Sulawesi yang telah mengizinkan saya untuk melaksanakan penelitian di lapangan. Terima kasih juga saya sampaikan kepada saudara Pinanggih Rahayu dan saudara Gora Anadi Santika atas bantuan dalam pengujian data.

Akhirnya, kepada orang tua tercinta, saya mengucapkan terima kasih dan penghormatan atas doa dan motivasi dari mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada istri saya Putri Indrayani, S.ST atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Penulis

RISHAN KARANGAN

## ABSTRAK

**RISHAN KARANGAN.** *Optimasi Transmisi Daya Menggunakan Kondensor Sinkron Yang Digabungkan Dengan Algoritma Hibrid Particle Swarm Pattern Search* (dibimbing oleh **Ardiaty Arief, Rhiza S. Sadjad**)

Kondensor sinkron atau *synchronous condenser* (SC) diuji dalam penelitian ini untuk meningkatkan kinerja dan performa jaringan transmisi daya 275 kV dan 150 kV pada model sistem tahun 2023 dari Jaringan Tenaga Listrik Sulawesi Selatan, di Indonesia, sebuah sistem tenaga listrik multi-pembangkit, menggunakan algoritma hibrid *particle swarm optimization* (PSO) dan *pattern search* (PS). Metode ini menggunakan MATLAB dan DigSILENT, yang dihubungkan oleh sebuah protokol pertukaran data otomatis. Perhitungan aliran daya dilakukan dengan menggunakan DigSILENT, dan algoritma *pattern search particle swarm optimization* (PSPSO) diimplementasikan menggunakan MATLAB. Metode ini telah terbukti dapat meningkatkan indeks kestabilan tegangan dari 1,05 menjadi 1,07, menjaga deviasi tegangan tetap berada pada ambang batas  $\pm 5\%$  dan mengurangi susut daya hingga 11,87% dari 51,09 MW menjadi 45,02 MW.

**Kata kunci:** Optimasi daya; Kondensor sinkron; Algoritma pintar; MATLAB; DigSILENT

## ABSTRACT

**RISHAN KARANGAN.** *Power Transmission Optimization Using Synchronous Condenser Incorporated with Hybrid Particle Swarm Pattern Search Algorithm* (supervised by **Ardiaty Arief, Rhiza S. Sadjad**)

The synchronous condenser (SC) was tested in this research to improve the performance of the 275 kV and 150 kV power transmission networks in the 2023 model of the South Sulawesi Power Grid in Indonesia. This power system is a multi-generator system, and the testing was conducted using a hybrid algorithm combining Particle Swarm Optimization (PSO) and Pattern Search (PS). MATLAB and DigSILENT were used in conjunction with an automated data exchange protocol. Power flow calculations were performed using DigSILENT, and the Pattern Search Particle Swarm Optimization (PSPSO) algorithm was implemented using MATLAB. This method has been proven to enhance the voltage stability index from 1.05 to 1.07, maintaining voltage deviations within the  $\pm 5\%$  threshold, and reducing power losses by 11.87% from 51.09 MW to 45.02 MW.

**Keywords:** Power optimization; Synchronous condenser; Artificial algorithm; MATLAB; DigSILENT

## DAFTAR ISI

	<u>Halaman</u>
HALAMAN SAMBUNG.....	i
HALAMAN PENGANTAR.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan Masalah.....	4
I.3 Tujuan Penelitian.....	4
I.4 Manfaat Penelitian.....	5
I.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
II.1 Penelitian Terdahulu.....	6
II.2 Optimasi Transmisi Daya.....	9
II.2.1 Studi Aliran Daya.....	9
II.2.2 Stabilitas Transien.....	9
II.2.3 Stabilitas Frekuensi.....	11
II.2.4 Stabilitas Tegangan.....	13
II.2.5 Transmisi Daya Sulawesi Bagian Selatan.....	15
II.3 Kondensator Sinkron (SC).....	16
II.3.1 Pemanfaatan SC.....	16
II.3.2 Pengaturan Daya Reaktif pada SC.....	18
II.4 SC untuk Optimasi Jaringan Transmisi.....	21
II.4.1 Peran SC dalam Meningkatkan Kapasitas Transfer Daya.....	21
II.4.2 Peran SC dalam Meningkatkan Inersia Sistem Tenaga.....	21
II.4.3 Peran SC dalam Meningkatkan Nilai Arus Hubung Singkat.....	22
II.4.4 Peran SC dalam Mengurangi Ketidakseimbangan Tegangan.....	22
II.5 Perbandingan SC dengan Kompensator Daya Reaktif lain.....	23
II.5.1 Perbandingan SC dengan Kapasitor Bank.....	23
II.5.2 Perbandingan SC dengan Static Var Compensator (SVC).....	23



II.6 Pengenalan PSO dan Algoritma PS.....	24
II.6.1 PSO.....	24
II.6.2 Algoritma PS .....	25
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>26</b>
III.1 Tahapan Penelitian.....	26
III.2 Waktu dan Lokasi Penelitian .....	26
III.2.1 Waktu .....	26
III.2.2 Lokasi.....	27
III.3 Jenis Penelitian.....	27
III.4 Sumber Data.....	28
III.5 Skenario Penelitian.....	29
III.5.1 Pemodelan Jaringan Transmisi .....	29
III.5.2 Pemodelan SC untuk Sistem Sulbagsel .....	31
III.5.3 Pembuatan Kode Program Algoritma Optimasi .....	34
III.5.4 Simulasi Aliran Daya Sistem Sulbagsel.....	35
III.5.5 Prosedur Hibridisasi PPSO untuk Optimasi Sistem .....	37
III.5.6 Prosedur Analisa Penghematan Pemasangan SC.....	46
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>49</b>
IV. 1 Hasil Simulasi Aliran Daya pada Model Transmisi .....	49
IV. 2 Hasil Simulasi Optimasi Algoritma Pintar .....	53
IV.2.1 Hasil Simulasi Algoritma PS .....	53
IV.2.2 Hasil Simulasi Algoritma PSO .....	56
IV.2.3 Hasil Simulasi Algoritma PPSO.....	62
IV. 3 Analisis VSI dan VD .....	66
IV.4 Kelayakan Ekonomi Pemasangan SC.....	74
IV.4.1 Biaya Investasi SC pada Sistem Sulbagsel.....	74
IV.4.2 Penghematan dari Pengurangan Rugi-rugi daya pada Sistem .....	75
IV.4.3 Kajian Kelayakan Ekonomi .....	76
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>80</b>
V.1 Kesimpulan .....	80
V.2 Saran.....	81
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>82</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>86</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1</b> SoTA penelitian optimasi sistem dengan kondensor sinkron .....	6
<b>Tabel 2</b> Perbandingan kondensor sinkron dan SVC.....	23
<b>Tabel 3</b> Jadwal pelaksanaan penelitian.....	27
<b>Tabel 4</b> Kebutuhan data sekunder penelitian.....	28
<b>Tabel 5</b> Spesifikasi transmisi Sulbagsel .....	29
<b>Tabel 6</b> Spesifikasi generator Westcan PLTG Tello (Westinghouse, 1962).....	31
<b>Tabel 7</b> Hasil load flow jaringan eksisting Sulbagsel .....	49
<b>Tabel 8</b> Daftar SC terpasang di grid Sulsel .....	49
<b>Tabel 9</b> Daftar generator terkontrol dalam <i>grid</i> Sulsel.....	50
<b>Tabel 10</b> Daftar transformator terkontrol dalam grid Sulsel .....	51
<b>Tabel 11</b> Daftar gardu induk terkontrol dalam grid Sulsel.....	52
<b>Tabel 12</b> Data hasil optimasi algoritma PS .....	54
<b>Tabel 13</b> Data hasil optimasi algoritma PSO .....	59
<b>Tabel 14</b> Hasil optimasi sistem Sulbagsel dengan PPSO.....	64
<b>Tabel 15</b> Daftar nilai VSI dan VD sistem Sulbagsel.....	66
<b>Tabel 16</b> Nilai VD pada GI under-voltage sistem Sulbagsel .....	69
<b>Tabel 17</b> Nilai VD pada GI over-voltage sistem Sulbagsel .....	70
<b>Tabel 18</b> Daftar biaya investasi SC pada sistem Sulbagsel.....	74
<b>Tabel 19</b> Nilai penghematan dari penurunan losses sistem Sulbagsel .....	75
<b>Tabel 20</b> Perhitungan NPV untuk tingkat diskonto 12% (dalam rupiah).....	76
<b>Tabel 21</b> Nilai Perhitungan <i>IRR</i> dengan diskonto 12% (dalam rupiah).....	77
<b>Tabel 22</b> Perhitungan PI dengan diskonto 12 % (dalam rupiah).....	78
<b>Tabel 23</b> Perhitungan <i>payback period</i> dengan diskonto 12% .....	78
<b>Tabel 24</b> Parameter kelayakan investasi pemasangan SC.....	79

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1</b> Kurva $P - \delta$ (Pertl et al., 2018) .....	10
<b>Gambar 2</b> Peta transmisi daya sistem Sulbagsel (PT. PLN (Persero), 2021).....	15
<b>Gambar 3</b> Struktur dasar sistem kondensor sinkron (Min et al., 2019).....	16
<b>Gambar 4</b> Kurva kapabilitas reaktif sebuah SC (Fogarty and Nold, 2017).....	18
<b>Gambar 5</b> Diagram vektor SC (Min et al., 2019) .....	19
<b>Gambar 6</b> Diagram alir pengaturan VAR dengan SC .....	20
<b>Gambar 7</b> Perbandingan kondensor sinkron dan kapasitor bank .....	23
<b>Gambar 8</b> Diagram alir dasar algoritma PSO .....	24
<b>Gambar 9</b> Diagram alir algoritma PS .....	25
<b>Gambar 10</b> SLD transmisi Sulbagsel dalam aplikasi DIGSILENT .....	30
<b>Gambar 11</b> Rencana SLD generator Westcan saat diinstal ke sistem Sulbagsel.	32
<b>Gambar 12</b> Kapabilitas reaktif Westcan sebagai SC (Westinghouse, 1962).....	33
<b>Gambar 13</b> Alur kerja program optimasi.....	34
<b>Gambar 14</b> Diagram alir optimasi algoritma PS .....	38
<b>Gambar 15</b> Diagram alir metode PSO.....	41
<b>Gambar 16</b> Diagram alir algoritma metode hibrid PPSO.....	44
<b>Gambar 17</b> Tampilan hasil optimasi algoritma PS di MATLAB.....	53
<b>Gambar 18</b> Grafik hasil optimasi Algoritma PS.....	54
<b>Gambar 19</b> Tampilan proses optimasi PSO tanpa batasan stall iteration .....	57
<b>Gambar 20</b> Tampilan nilai optimal metode PSO.....	58
<b>Gambar 21</b> Grafik hasil optimasi algoritma PSO.....	59
<b>Gambar 22</b> Tampilan nilai optimal optimasi PPSO di MATLAB .....	62
<b>Gambar 23</b> Grafik hasil optimasi PPSO pada sistem jaringan transmisi .....	63
<b>Gambar 24</b> Grafik nilai VSI pada sistem Sulbagsel .....	68
<b>Gambar 25</b> Grafik VD pada GI under-voltage sistem Sulbagsel .....	72
<b>Gambar 26</b> Grafik VD pada GI over-voltage sistem Sulbagsel .....	73

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1</b> Diagram satu garis sistem Sulbagsel .....	86
<b>Lampiran 2</b> Nilai hasil aliran daya pada sistem Sulbagsel sebelum optimasi.....	86
<b>Lampiran 3</b> Lokasi penempatan SC di sistem transmisi Sulbagsel.....	87
<b>Lampiran 4</b> Nilai hasil aliran daya sistem Sulbagsel setelah optimasi.....	87
<b>Lampiran 5</b> Nilai tegangan busbar sebelum optimasi .....	88
<b>Lampiran 6</b> Chart tegangan busbar sebelum optimasi .....	90
<b>Lampiran 7</b> Nilai tegangan busbar setelah optimasi .....	90
<b>Lampiran 8</b> Chart tegangan busbar setelah optimasi.....	92
<b>Lampiran 9</b> Hasil Optimasi MATLAB dengan Algoritma PS .....	93
<b>Lampiran 10</b> Hasil Optimasi MATLAB dengan Algoritma PSO .....	96
<b>Lampiran 11</b> Hasil Optimasi MATLAB dengan Algoritma PPSO.....	97

## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/singkatan	=	Arti dan keterangan
$Q_L$	=	Daya reaktif beban
$P_L$	=	Daya aktif beban
J	=	Momen inersia
H	=	Nilai konstanta inersia
$\delta v$	=	Sudut fasa tegangan
E	=	Gaya gerak listrik
U	=	Tegangan terminal
I	=	Arus armatur
X	=	reaktansi
VSI	=	Voltage stability indeks
VD	=	Voltage deviation
VAR	=	Daya reaktif
SC	=	Synchronous condenser
SVC	=	Static var compensator
STATCOM	=	Static synchronous compensator
FACTS	=	Flexible alternating current transmission system
HVDC	=	High voltage direct current
SFC	=	Static frequency converters
VSD	=	Variable speed drive

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 Latar Belakang**

Karena masalah dampak lingkungan di dunia, dalam beberapa tahun terakhir pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) telah dikonversi ke pembangkit energi terbarukan seperti pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB). Di banyak negara maju, energi terbarukan sudah menjadi energi utama yang digunakan dengan presentase hingga 80%. Sementara untuk negara-negara berkembang, menurut penelitian (Igbinovia *et al.*, 2019), saat ini masih sangat bergantung dengan energi fosil, dimana hanya sekitar 5% - 6% dari pembangkit listrik negara berkembang yang sudah menggunakan energi baru terbarukan (EBT). Setali tiga uang, di dalam buku rencana penyediaan tenaga listrik periode tahun 2019-2028 (PT. PLN (Persero), 2019), pemerintah Indonesia telah memasang target untuk menaikkan presentase jumlah pembangkit energi terbarukan hingga 23% di tahun 2025.

Penutupan beberapa PLTU dan PLTD yang diiringi dengan naiknya jumlah pembangkit PLTS dan PLTB, walaupun berdampak signifikan pada perbaikan kondisi lingkungan, namun kondisi ini menurut (Glaninger-Katschnig, 2013) menghadirkan persoalan baru bagi para provider dan legulator kelistrikan, yaitu menurunnya level kehandalan sistem transmisi akibat berkurangnya inersia sistem yang berujung pada ketidakstabilan frekuensi sistem dan berkurangnya daya hubung singkat di jaringan. Kondisi yang serupa juga terjadi di Indonesia, walaupun perusahaan listrik negara (PLN) sebagai regulator tunggal kelistrikan belum sampai melakukan penutupan PLTU namun sudah banyak PLTD yang diistirahatkan, dan dengan digencarkannya pembangunan PLTS dan PLTB, maka pada saat ini, berdasarkan penelitian (Surya *et al.*, 2020), para operator sistem juga sudah mengalami masalah ketidakstabilan sistem karena berkurangnya inersia beserta semua dampak turunannya.

Selama ini, permasalahan ketidakstabilan sistem karena kurangnya pasokan daya reaktif akibat semakin banyaknya pembangkit energi terbarukan, telah ditangani dengan pemanfaatan berbagai peralatan *flexible alternating current transmission system* (FACTS) seperti *static var compensator* (SVC) dan *static synchronous compensator* (STATCOM), namun peralatan seperti ini menurut (Nielsen, 2015), tidak mampu menangani masalah kurangnya inersia sistem. Dan salah satu kelemahan yang menonjol dari penggunaan peralatan FACTS berdasarkan penelitian (Rusek *et al.*, 2015), adalah timbulnya harmonisa, sehingga berdampak pada turunnya efisiensi sistem transmisi karena harmonisa menyebabkan arus lebih dan rugi-rugi daya tambahan. Dengan menimbang semua latar belakang ini, teknologi kondensor sinkron atau biasa disebut *synchronous condenser* (SC) akhirnya digunakan kembali, pemanfaatannya untuk memproduksi dan menyerap daya reaktif, meningkatkan inersia sistem tenaga, serta memperbesar kapasitas arus hubung singkat tanpa menimbulkan harmonisa, telah diteliti oleh (Fogarty and Nold, 2017; Nedd, Booth and Bell, 2017; Hirase *et al.*, 2018; Marrazi, Yang and Weinreich-Jensen, 2018; Igbiovina *et al.*, 2019; Min *et al.*, 2019; Manditereza, 2020; Shi *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2020; Surya *et al.*, 2020). Selain itu, alat ini dapat terus dimanfaatkan di era pengembangan energi terbarukan di masa depan karena tidak lagi memerlukan bahan bakar fosil dalam pengoperasiannya.

SC sendiri adalah sebuah teknologi mapan, sehingga fenomena pemanfaatannya saat ini telah membuat beberapa perusahaan kelistrikan dunia kembali memproduksi SC. Sebagaimana yang dikatakan oleh (Nedd, Booth and Bell, 2017), alat ini pun dapat dibeli dan dipasang dengan mudah di jaringan, walaupun harganya masih cukup mahal, yaitu sekitar 12 Miliar rupiah untuk daya 10 MVAR saja. Kendala seperti ini dapat diatasi dengan memanfaatkan generator pembangkit listrik termal yang telah dijadwalkan untuk dinonaktifkan seperti yang telah diteliti oleh (Fogarty, James M., 2011) sehingga biaya implementasinya akan menjadi lebih rendah. Untuk mencapai berbagai manfaat dari alat ini maka lokasi penempatan dan besaran kapasitas yang optimal dari SC dalam jaringan listrik masih harus dipelajari secara terus menerus. Saat menerapkan SC, isu terpenting yang harus selalu diperhatikan adalah apakah efek langsung dari kehadirannya sudah memenuhi persyaratan kode jaringan dari operator sistem kelistrikan.

Atas semua hal yang sudah dipaparkan di atas, peneliti tertarik untuk melakukan optimasi jaringan transmisi dengan pemasangan kondensor sinkron karena walaupun sudah digunakan di berbagai negara di dunia, namun sampai sekarang, alat ini belum diimplementasikan di dalam sistem kelistrikan di Indonesia yang dikelola oleh PLN. Sehingga ketika diintegrasikan ke dalam sistem, alat ini akan tergolong pionir inovasi, mengingat pengaturan khusus harus selalu dilakukan berdasarkan karakteristik setiap sistem transmisi kelistrikan yang sangat beragam, termasuk pada sistem transmisi daya Sulawesi bagian selatan (Sulbagsel) yang memiliki karakteristik dan *grid code* tersendiri sebagaimana yang tercantum di dalam buku peraturan jaringan (Kementrian ESDM, 2020), yang akan menjadi standar acuan dari penelitian ini.

Untuk mendapatkan hasil terbaik dalam penelitian ini maka peneliti akan menentukan penempatan dan pengoptimalan SC dengan memanfaatkan *software* penganalisa sistem yang digunakan langsung oleh PLN yaitu DIGSILENT, dan kemudian memanfaatkan *software* MATLAB untuk mengimplementasikan algoritma pengoptimalan pintar, perpaduan dari kedua *tools* ini telah diteliti oleh (Tabatabaei *et al.*, 2017; Marrazi, Yang and Weinreich-Jensen, 2018) dengan hasil yang sangat baik.

Di dalam penelitian ini, peneliti juga akan menggabungkan dua algoritma optimasi pintar yaitu *particle swarm optimization* (PSO) dan *pattern search* (PS). Metode optimasi PSO dipilih untuk digunakan karena telah terbukti memberikan solusi kualitas yang lebih baik jika dibanding dengan metode *genetic algorithm* yang lain, bahkan pada faktanya PSO dapat diadaptasi pada kasus-kasus nyata dalam jaringan daya berdasarkan penelitian (Zhang and Liu, 2004; Park *et al.*, 2005; Bai and Zhao, 2006; Lee and Park, 2006; Alinejad-Beromi, Sedighizadeh and Sadighi, 2008; Kansal, Kumar and Tyagi, 2013). Jebakan optimasi lokal yang menjadi kelemahan signifikan dari PSO akan ditutup dengan menggunakan algoritma tambahan yaitu algoritma PS. Dengan fleksibilitas yang dimilikinya, dengan tidak membutuhkan *gradient* dan *objective function*, algoritma PS dapat diintegrasikan dengan algoritma heuristik seperti PSO untuk melakukan pencarian global. Hibridisasi kedua metode ini akan disebut algoritma *pattern search particle swarm optimization* (PSPSO).



Dan akhirnya, demi kepraktisan dan penghematan biaya pengadaan, kondensor sinkron (SC) yang digunakan dalam studi ini berasal dari konversi generator pembangkit termal eksisting yang telah atau akan dinonaktifkan yang akan memberikan penghematan signifikan dalam implementasinya pada jaringan daya.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Beberapa masalah yang perlu dijawab melalui penelitian yang terkait dengan latar belakang yang telah dipaparkan di atas adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menentukan lokasi penempatan SC agar penurunan rugi-rugi daya di sistem transmisi daya Sulbagsel dapat menjadi optimal.
2. Bagaimana melakukan optimasi aliran daya sistem transmisi daya Sulbagsel dengan algoritma PPSO.
3. Bagaimana melakukan kajian dampak pemasangan SC dan optimasi aliran daya pada sistem transmisi daya Sulbagsel terhadap jumlah rugi-rugi daya, nilai indeks kestabilan tegangan dan nilai deviasi tegangan.
4. Bagaimana mengevaluasi jumlah penghematan yang bisa dicapai saat SC dioperasikan dan aliran daya dioptimalkan di sistem transmisi daya Sulbagsel.

## **I.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan lokasi penempatan SC agar penurunan rugi-rugi daya di sistem transmisi daya Sulbagsel dapat menjadi optimal.
2. Melakukan optimasi aliran daya sistem transmisi daya Sulbagsel dengan algoritma PPSO.
3. Melakukan kajian dampak pemasangan SC dan optimasi aliran daya pada sistem transmisi daya Sulbagsel terhadap jumlah rugi-rugi daya, nilai indeks kestabilan tegangan dan nilai deviasi tegangan.
4. Mengevaluasi jumlah penghematan yang bisa dicapai saat SC dioperasikan dan aliran daya dioptimalkan di sistem transmisi daya Sulbagsel.

#### **I.4 Manfaat Penelitian**

Sebagaimana yang telah disampaikan sebelumnya bahwa karena teknologi SC belum diimplementasikan di Indonesia maka, besar harapan hasil penelitian ini dapat menjadi acuan metode pengaplikasian SC secara luas dan utamanya di dalam sistem transmisi PT. PLN (Persero) di berbagai tempat di Indonesia. Secara khusus, diharapkan hasil penelitian ini dapat menyediakan data aliran daya optimal yang menunjukkan pengaruh besar pemanfaatan SC dalam sistem transmisi daya Sulawesi Bagian Selatan. Pada akhirnya penelitian ini akan menjadi landasan pemanfaatan kembali generator-generator bekas layak pakai dari pembangkit-pembangkit *diesel* yang sudah dipensiunkan, dan hal ini tentunya akan sangat menguntungkan PT. PLN (Persero).

#### **I.5 Ruang Lingkup Penelitian**

Demi mencapai hasil penelitian yang jelas, maka tinjauan riset ini akan dikerjakan secara spesifik dengan batasan masalah sebagai berikut:

1. Fokus dari penelitian ini adalah untuk menentukan lokasi penempatan SC untuk mengontrol daya reaktif, meningkatkan indeks kestabilan sistem, dan menjaga besaran deviasi tegangan tetap memenuhi standar IEEE dan *grid code* Sulawesi, serta menurunkan rugi-rugi daya.
2. Pengaturan sistem dalam penelitian ini mengacu pada data rencana operasi sistem yang disediakan oleh (PT. PLN (Persero) UIKL Sulawesi, 2022), yang saat tesis ini disusun telah berganti nama menjadi Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (UIP3BS) Sulawesi.
3. Acuan optimasi parameter dalam penelitian ini didasarkan pada aturan jaringan sistem tenaga listrik IEEE dan *grid code* Sulawesi.
4. Pengoptimalan aliran daya sistem akan dilakukan dengan bantuan aplikasi MATLAB dengan menggunakan algoritma PPSO.
5. Simulasi pengaruh penggunaan SC dan simulasi aliran daya di dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan aplikasi DIGSILENT.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### II.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini merupakan tindak lanjut dari penelitian sebelumnya terkait optimasi sistem melalui pemanfaatan kondensator sinkron (SC). Tabel 1 menjelaskan tentang *state of the art* (SoTA) dari penelitian sebelumnya dari rentang tahun 2017 hingga tahun 2021.

**Tabel 1** SoTA penelitian optimasi sistem dengan kondensator sinkron

No	Judul	Metode	Hasil	Ref.
1	Application of Synchronous Condensers in the Modern Power Grid	Studi pemanfaatan SC sebagai <i>failure defence task</i> atas kejadian <i>blackout</i> di AS dan Kanada pada tahun 2003.	Merekomendasikan pemanfaatan SC untuk merespon perubahan tegangan secara mendadak dan sebagai penambah daya inerti sistem.	(Fogarty and Nold, 2017)
2	Potential solutions to the challenges of low inertia power systems with a case study concerning synchronous condensers	Studi pemanfaatan SC sebagai salah satu solusi potensial untuk menangani masalah <i>rate of change of frequency</i> (RoCoF).	SC dapat menurunkan angka RoCoF dan meningkatkan daya hubung singkat pada sistem.	(Nedd, Booth and Bell, 2017)
3	Allocation of synchronous condensers for restoration of system short-circuit power	Menggunakan metode GA untuk menentukan alokasi SC untuk meningkatkan daya hubung singkat. Metode GA di jalankan di MATLAB dan hasilnya disimulasikan pada DIgSILENT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posisi terbaik SC berhasil ditentukan pada lokasi dengan <i>short circuit ratio</i> (SCR) terendah</li> <li>• Hasil simulasi merekomendasikan pemasangan SC berkapasitas 170 MVA</li> <li>• SCR berhasil ditingkatkan</li> </ul>	(Marrazi, Yang and Weinreich-Jensen, 2018)

No	Judul	Metode	Hasil	Ref.
4	Reputation of the Synchronous Condenser Technology in Modern Power Grid	Studi kasus pemanfaatan SC:  1. Pemanfaatan SC hanya sebagai penyedia daya reaktif. 2. Pemanfaatan SC untuk menopang pembangkit RE.	SC secara solid dan efisien mampu menyediakan daya reaktif dan mampu menopang stabilitas jaringan transmisi di era moderen.	(Igbinovi <i>et al.</i> , 2019)
5	Analysis of the Influence of Installing Synchronous Condenser in HVDC Inverter Station to Receiving-End Grid	Melakukan simulasi dampak SC pada jaringan HVDC.	Menggunakan SC akan meningkatkan SCR dan menaikkan tegangan pada saat sistem sedang mengalami gangguan	(Min <i>et al.</i> , 2019)
6	Rocof Enhancement Using Synchronous Condensers in Systems Integrated with Renewable Energy Sources	Melakukan simulasi penggunaan SC pada sistem 9-bus IEEE	SC membantu dalam meningkatkan RoCoF dan menaikkan level inersia pada sistem	(Mandite reza, 2020)
7	Study of Synchronous Condenser Impact in Jawa-Madura-Bali System to Provide Ancillary Services	Menggunakan PSS/E simulation untuk mensimulasikan model sistem di masa depan yang dikuasai pembangkit dari sumber RE.	SC akan meningkatkan <i>stiffness</i> sistem dari 680 MW menjadi 794 MW saat terhubung ke jaringan. SC memberikan kontribusi inersia dan daya reaktif ke sistem.	(Surya <i>et al.</i> , 2020)

No	Judul	Metode	Hasil	Ref.
8	Characteristic Analysis and Parameter optimization of Synchronous Condensers	Menggunakan software PSCAD untuk menganalisa respon daya reaktif SC saat mengalami gangguan	Saat terjadi gangguan satu fasa ke tanah, SC akan secara dramatis menghasilkan daya reaktif dan menjaga kestabilan tegangan sistem, hal yang sama akan terjadi ketika satu fasa hilang, namun ketika dua fasa yang hilang maka tegangan sistem tidak bisa dijaga tetap stabil.	(Dai <i>et al.</i> , 2020)
9	Optimal Allocation of Synchronous Condensers in an Actual Weak Received Power Grid with an UHVDC System	Menganalisa penempatan SC generasi terbaru pada sistem UHVDC (dari pembangkit EBT) dengan metode simulasi domain waktu	Dapat mengurangi cadangan putar pembangkit dan menekan jumlah (biaya) penggunaan SC	(Cui <i>et al.</i> , 2020)
10	Design of LQR Excitation Controller of Synchronous Condenser in HVDC System	Menggunakan MATLAB/SIMULINK untuk menganalisa desain kontroler <i>linear quadratic regulator</i> (LQR) untuk mengatur sistem eksitasi SC	SC pada sistem HVDC yang diuji memberi respon yang lebih cepat dalam menyuplai dan menyerap daya reaktif	(Li <i>et al.</i> , 2021)

## II.2 Optimasi Transmisi Daya

### II.2.1 Studi Aliran Daya

Untuk melakukan optimasi pada jaringan transmisi maka perlu dilakukan studi aliran daya. Studi ini berfokus pada bus jaringannya dan bukan pada generator dayanya. Dalam studi aliran daya terdapat 3 jenis bus yang dipelajari yaitu:

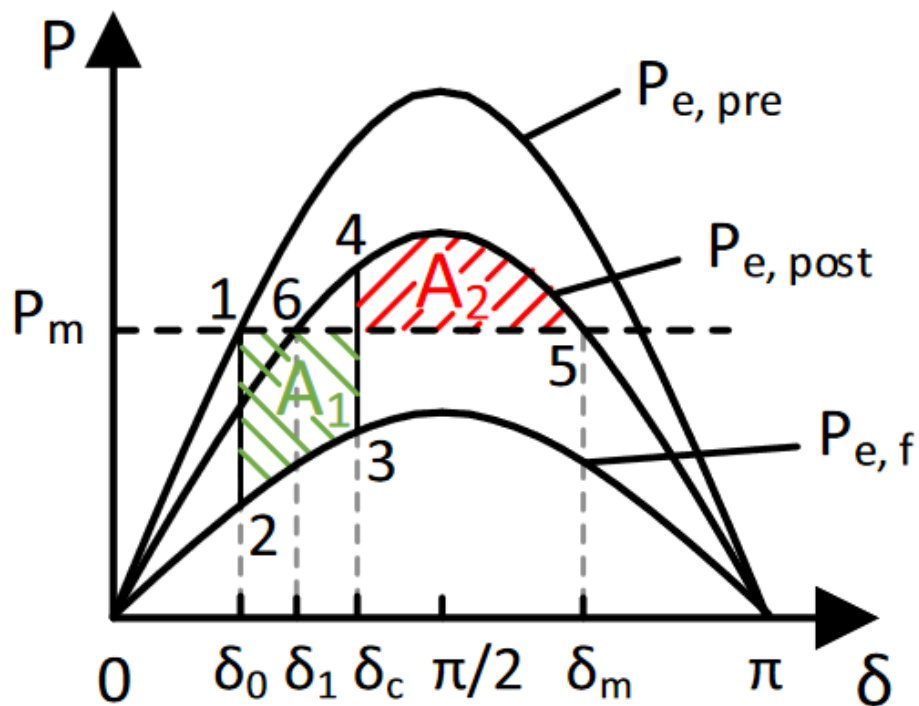
1. Bus Referensi, biasa disebut *slack bus* atau *swing bus*, yaitu bus yang mempunyai besaran  $|V|$  tegangan dengan harga skalarnya dan sudut fasa tegangan ( $\delta v$ ) dengan titik nol sebagai referensinya.
2. Generator Bus (Bus Pembangkitan), yaitu bus yang diketahui daya nyata ( $P$ ) dan tegangan  $|V|$  pada harga skalarnya.
3. Bus Pembebanan, yaitu bus yang diketahui daya aktif beban ( $P_L$ ) dan daya reaktif beban ( $Q_L$ ).

Saat ini penghitungan aliran daya sudah dilakukan dengan menggunakan aplikasi, diantaranya adalah aplikasi DIGSILENT. Tujuan dari studi aliran daya adalah untuk:

1. Mengetahui komponen jaringan sistem tenaga listrik pada umumnya.
2. Mengetahui besarnya tegangan pada setiap bus (rel) dari suatu sistem tenaga listrik.
3. Menghitung aliran-aliran daya, baik daya nyata maupun daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran.
4. Mengetahui rugi-rugi jaringan.

### II.2.2 Stabilitas Transien

Stabilitas transien adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk menjaga sinkronisasi ketika terganggu dari suatu gangguan yang besar, seperti: terjadinya trip unit pembangkit, dan terlepasnya beban sistem. Dampak dari gangguan ini menyebabkan penyimpangan dari sudut rotor generator yang sangat dipengaruhi oleh hubungan antar daya output dan sudut rotor yang sifatnya non-linier. Hubungan itu dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Kurva  $P - \delta$  (Pertl *et al.*, 2018)

Dalam kondisi normal di titik “1” sebelum gangguan terjadi nilai  $P_0$  sama dengan  $P_m$ , pada saat gangguan terjadi daya output yaitu  $P_e$  akan turun sehingga titik operasi bergerak dari “1” ke “2”. Inersia pembangkit akan menahan  $\delta$  agar tidak berubah secara instan. Di sini  $P_m > P_e$  sehingga rotor mengalami akselerasi ke titik “3”. Ketika sumber gangguan ditriapkan maka titik operasi akan bergerak ke titik “4”. Karena  $P_m > P_e$  maka kecepatan rotor  $\omega_r > \omega_0$ , sehingga  $\delta$  akan meningkat dan titik operasi bergerak dari titik “4” ke “5” membuat  $A_1 > A_2$ . Pada titik operasi “5” nilai  $\delta = \delta_m$ , dan saat  $P_e > P_m$  maka percepatan rotor  $\omega_r$  diperlambat menuju  $\omega_0$  sehingga titik operasi bergerak kembali dari titik “5” ke titik “4”. Jika kondisi tidak stabil berlanjut maka kecepatan sudut rotor akan tetap berada di atas  $\omega_0$  sehingga  $\delta$  terus bertambah dan ketika  $P_e > P_m$  sudut rotor dan kecepatan rotor akan terus meningkat hingga mengalami *loss of synchronism* (lepas sinkron).

Rumus antara daya mekanik dan elektrikal berdasarkan *equal area criterion* (EAC) adalah:

$$P_a = P_m \quad P_e = J\omega_0 \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (1)$$

dimana,

- $P_{e,pre}$  adalah kapasitas transfer daya aktif sebelum gangguan
- $P_{e,f}$  adalah kapasitas transfer daya aktif selama gangguan
- $P_{e,post}$  adalah kapasitas transfer daya setelah gangguan
- $P_m$  adalah daya mekanik
- $P_a$  adalah daya percepatan/perlambatan
- $J$  adalah momen inersia
- $\delta_0$  adalah sudut rotor stabil sebelum gangguan
- $\delta_1$  adalah sudut rotor stabil sebelum setelah gangguan
- $\delta_c$  adalah sudut rotor kritis yang menentukan batas stabil selama gangguan
- $\delta_m$  adalah deviasi sudut rotor maksimal yang diijinkan setelah gangguan diputus
- $A_1, A_2$  adalah area percepatan dan perlambatan

### II.2.3 Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi adalah kemampuan suatu sistem tenaga untuk menjaga frekuensi dalam batas nominal setelah terjadi suatu gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan suatu bentuk ayunan frekuensi yang berdampak pada trip unit pembangkit dan/atau beban. Secara umum, masalah stabilitas frekuensi dapat dikaitkan dengan kekurangan respon peralatan, kekurangan koordinasi kontrol dan proteksi sistem. Ketidaksetimbangan antara pembangkit dan beban juga berdampak pada ketidaksetimbangan daya reaktif. Ketidakseimbangan daya reaktif antara pasokan dan permintaan menyebabkan perubahan tegangan dari nilai nominalnya. Apabila ketidakseimbangan ini cukup signifikan, kondisi *overvoltage* atau sebaliknya *undervoltage* akan terjadi. Pada sisi generator, proteksi untuk *under/over* eksitasi dan *loss-of-excitation* mungkin akan bereaksi. Kecepatan penurunan frekuensi dipengaruhi oleh dua hal yaitu, besarnya pembangkit yang terlepas (*trip*) dari sistem, dan nilai inersia sistem. Semakin besar daya unit pembangkit yang hilang semakin besar turun frekuensinya, dan sejalan dengan itu semakin kecil inersia sistem makin cepat turun frekuensinya.



Konstanta inersia pembangkit (H) merupakan konstanta dari karakteristik kelambanan suatu mesin berputar. Inilah adalah sebuah ukuran kekakuan sistem (*stiffness*). Suatu mesin generator yang sebelumnya berputar pada kecepatan konstan pada frekuensi nominalnya akan mengalami perlambatan setelah terjadi kelebihan beban. Perlambatan ini terjadi karena adanya energi kinetik yang tersimpan dalam putaran rotor. Mula-mula kelebihan beban ini dilayani oleh sebagian energi kinetik yang dimiliki mesin-mesin tersebut. Hal inilah yang menyebabkan frekuensi sistem turun. Dengan demikian konstanta inersia dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara energi kinetik yang tersimpan pada rotor yang berputar pada frekuensi nominal dengan daya generatornya.

Nilai konstanta inersia dari suatu unit pembangkit ditentukan dengan persamaan berikut:

$$H = \frac{\text{Energi Kinetik Mesin (MWs)}}{\text{Rating Mesin (MVA)}} \quad (2)$$

Untuk menghitung penurunan frekuensi rata-rata dapat dilakukan dengan rumus:

$$H \frac{d_{f_{ave}}(t)}{dt} = \frac{DPG}{2p(H_1 + H_2)} \quad (3)$$

dengan:

- $d_{f_{ave}}(t)/dt$  adalah rata-rata penurunan frekuensi pada sistem
- DPG adalah beban unit pembangkit trip (MW)
- $H_1, H_2$  adalah koefisien inersia dari area 1 dan area 2

Dari persamaan ini dapat terlihat bahwa semakin besar konstanta inersia sistem, laju penurunan frekuensi menjadi semakin lambat. Karena sebagaimana yang disampaikan sebelumnya, besaran inersia sistem (H) adalah merupakan ukuran kekakuan (*stiffness*) sistem.

## II.2.4 Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk menjaga tegangan tetap atau *steady* di semua bus setelah mengalami gangguan pada suatu kondisi operasi. Tegangan dalam suatu sistem tenaga dinyatakan stabil apabila besar tegangan setelah terjadinya gangguan mendekati besar tegangan pada saat kondisi normal operasi. Sementara itu, ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan suatu sistem tenaga untuk menjaga tegangan tetap di setiap bus pada sistem setelah terjadi gangguan pada suatu kondisi operasi. Hal ini dapat disebabkan karena gangguan yang terjadi mengakibatkan meningkatnya kebutuhan daya reaktif sehingga melebihi dari total kapasitas dari sumber daya reaktif yang tersedia di sistem tersebut.

Tingkat kestabilan tegangan dapat dinilai dari tingkat indeks stabilitas tegangan yang didefinisikan dengan rasio dari  $V/V_0$  dengan  $V$  adalah tegangan dari busbar dengan kondisi adanya beban dan  $V_0$  adalah tegangan dari busbar dengan kondisi tanpa beban, kedua parameter ini diperoleh dari hasil kalkulasi load flow suatu sistem. Secara keseluruhan tingkat kestabilan sistem dirumuskan pada persamaan berikut:

$$VSI = \sum_{i=1}^T \left| 1 - \frac{V_i}{V_{i0}} \right| \quad (4)$$

dengan  $V_i$  adalah tegangan dari busbar ke- $i$  dengan kondisi adanya beban,  $V_{i0}$  adalah tegangan dari busbar ke- $i$  dengan kondisi tanpa beban, dan  $T$  adalah jumlah busbar yang memiliki beban.

Untuk mendapatkan hasil optimal dari nilai parameter tegangan maka digunakan parameter deviasi tegangan, yaitu tingkat batasan penyimpangan tegangan atau dapat dianggap sebagai total penjumlahan penyimpangan tegangan yang paling kecil pada setiap bus beban, parameter ini didefinisikan sebagai berikut:

$$VD = \sum_{j=1}^M |V_j - V_{j\text{ref}}| \quad (5)$$

dengan  $V_j$  merupakan nilai aktual tegangan pada busbar ke- $j$  dengan kondisi adanya beban,  $V_{j\text{ref}}$  adalah beban ideal tegangan busbar ke- $j$ , dan  $M$  merupakan jumlah busbar yang memiliki beban.

Kontrol tegangan dan ketidakstabilan tegangan adalah masalah yang bersifat lokal. Akan tetapi, dampak dari ketidakstabilan tegangan dapat menyebabkan efek yang lebih luas, yaitu runtuh tegangan (*voltage collapse*). Runtuh tegangan dapat didefinisikan sebagai dampak besar dari serangkaian kejadian gangguan yang mengakibatkan tegangan rendah hampir di seluruh bus dalam rentang waktu yang sangat cepat atau bahkan *blackout* pada suatu sistem tenaga listrik. Berdasarkan jenis gangguannya, stabilitas tegangan diklasifikasikan menjadi dua bagian:

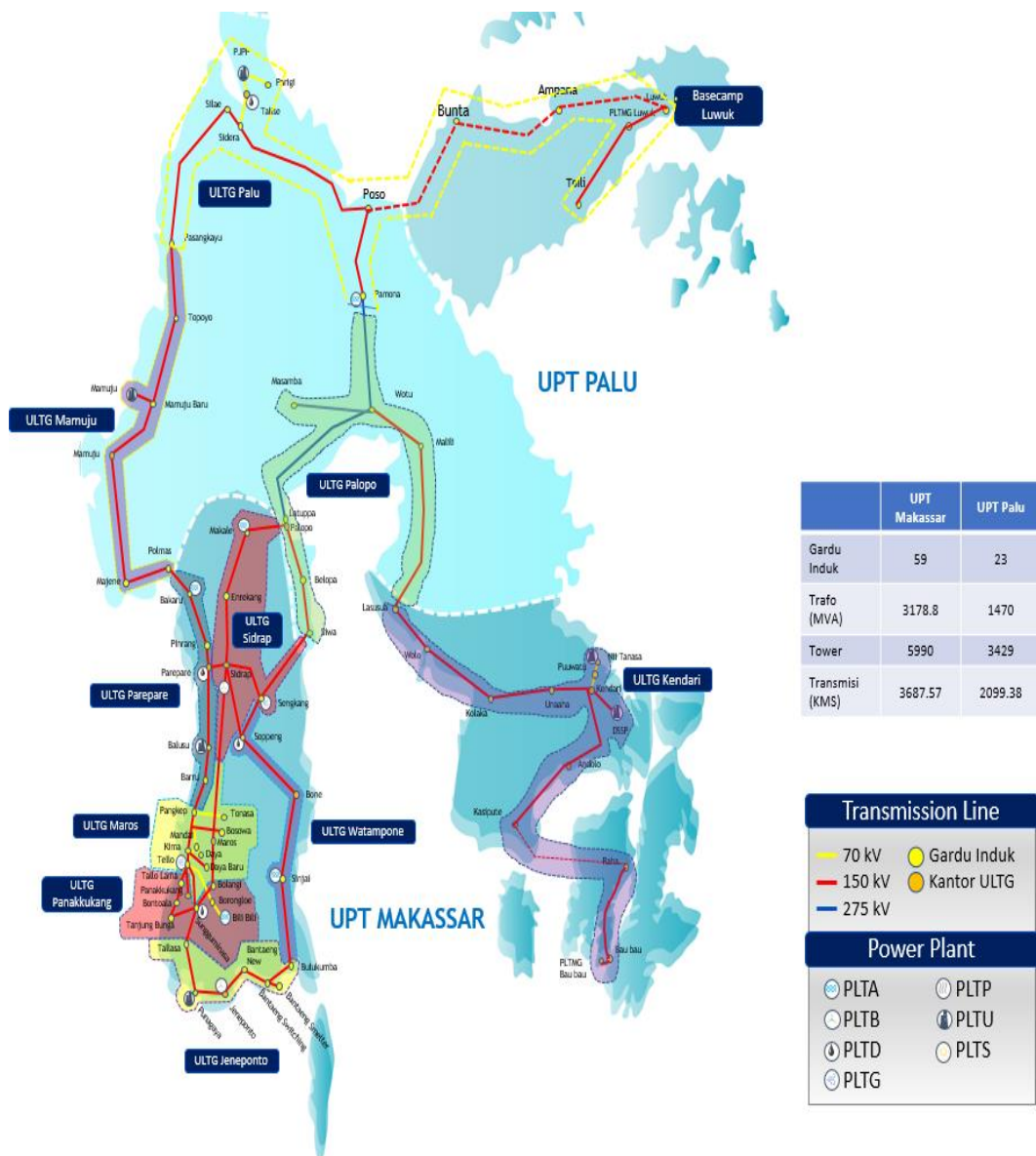
1. Stabilitas tegangan gangguan kecil (*Small disturbance voltage stability/Steady state stability*), yaitu kemampuan untuk menjaga tegangan tetap dalam kondisi normal setelah terjadi gangguan kecil, seperti kenaikan beban secara bertahap.
2. Stabilitas tegangan gangguan besar (*Large disturbance voltage stability/Dynamic voltage stability*), yaitu kemampuan untuk menjaga tegangan tetap dalam kondisi normal setelah terjadi gangguan besar, seperti trip suatu pembangkit berkapasitas besar dan kontingensi saluran transmisi.

Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap ketidakstabilan tegangan adalah jatuh tegangan yang terjadi ketika daya aktif dan daya reaktif mengalir melalui jaringan transmisi yang bersifat sangat induktif. Hal ini akan membatasi kemampuan suatu jaringan transmisi untuk menyalurkan daya dan penyokong tegangan. Disamping tingkat kemampuan daya hantar jaringan, beberapa faktor yang berpengaruh terhadap stabilitas tegangan:

1. Kemampuan daya reaktif dari generator sinkron
2. Kontrol tegangan otomatis dari generator sinkron
3. Karakteristik beban
4. Distribusi atau sebaran sistem pengatur tegangan dan reaksi *tap-changer* pada trafo.
5. Karakteristik peralatan kompensator daya reaktif

## II.2.5 Transmisi Daya Sulawesi Bagian Selatan

Jaringan transmisi daya Sulawesi bagian selatan (Sulbagsel) saat penelitian ini berlangsung terbagi dari tiga sub-sistem yaitu sistem Sulawesi Selatan-Barat (Sulselbar), sistem Sulawesi Tengah dan sistem Sulawesi Tenggara. Pengoperasian jaringan transmisi ini dilaksanakan oleh unit pelaksana pengatur beban (UP2B) Makassar, yang secara teknis dipelihara dan diawasi oleh dua unit pelaksana transmisi (UPT), yaitu UPT Makassar dan UPT Palu. Bagan sistem transmisi Sulbagsel ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Peta transmisi daya sistem Sulbagsel (PT. PLN (Persero), 2021)



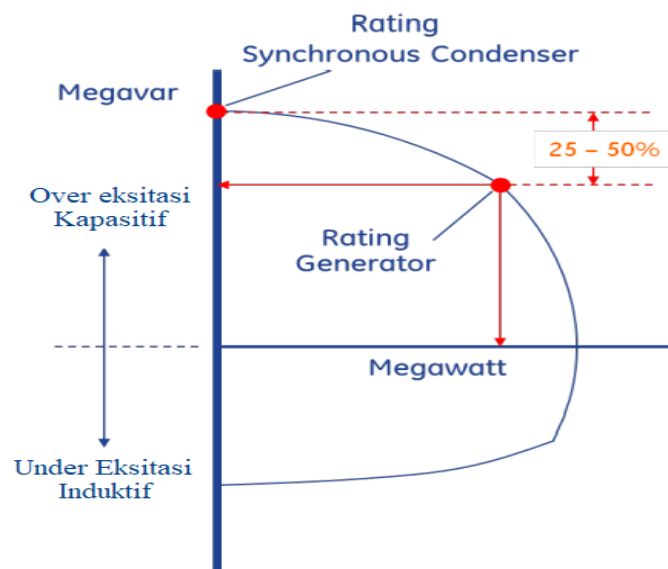
Dari sejak awal, bersamaan dengan lahirnya jaringan transmisi tenaga listrik, SC sudah digunakan sebagai salah satu pembangkit utama untuk mengatur tegangan. Dalam perkembangannya, teknologi baru yang lebih murah, seperti *static var compensator* (SVC) dan peralatan *static synchronous compensator* (STATCOM) bermunculan dan menggantikan fungsi SC untuk mengatasi masalah daya reaktif di sistem transmisi daya listrik (Igbinovia *et al.*, 2019). Hal ini kemudian membuat SC pernah dianggap sebagai teknologi yang sudah usang, namun sekarang, manfaat dan nilai dari SC ini kembali naik ke permukaan. Faktor yang paling mendukung sehingga teknologi SC ini digunakan kembali sekitar sepuluh tahun yang lalu adalah:

- Penutupan beberapa pembangkit termal akibat isu dampak lingkungan, membuat inersia sistem tenaga listrik menurun secara signifikan. Potensi solusi untuk masalah seperti ini menurut beberapa penelitian adalah pemanfaatan SC (Ulbig, Borsche and Andersson, 2014; Nielsen, 2015; Nedd, Booth and Bell, 2017; Nguyen *et al.*, 2019; Stiger, Rivas and Halonen, 2019; Surya *et al.*, 2020).
- Meningkatnya pembangkitan daya listrik non-sinkron seperti PLTS dan PLTB, yang terhubung ke transmisi dengan menggunakan konverter *high voltage direct current* (HVDC) atau *static frequency converters* (SFC), yang berdasarkan hasil penelitian (Nahid-Al-Masood *et al.*, 2015; Ri *et al.*, 2018; Aamir *et al.*, 2019; Min *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2019; Cui *et al.*, 2020; Dai *et al.*, 2020; Manditereza, 2020; Richard *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021) membutuhkan tambahan pemasangan alat kompensator daya reaktif agar sistem dapat bertahan dengan lebih baik pada saat terjadi gangguan, dan sekali lagi SC menjadi primadona solusinya.
- Sistem tenaga yang mentransmisikan daya aktif yang besar, tidak menyediakan dukungan daya reaktif yang memadai sehingga daya hubung singkat menurun dan membuat stabilitas sistem ikut menurun secara signifikan ketika beberapa sistem transmisi dikoneksikan untuk membentuk jaringan interkoneksi yang lebih besar. Sekali lagi, selain beberapa penelitian yang sudah disebutkan di atas, penelitian (Jia *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2020) juga menyarankan SC sebagai salah satu metode penyelesaiannya.

Di kanca internasional sudah tersedia beberapa produsen SC, namun demi mengurangi modal awal penyediaan alat, sebuah generator laik pakai dari sebuah pembangkit yang sudah di nonaktifkan berdasarkan penelitian (Masood *et al.*, 2016) dapat dimanfaatkan menjadi sebuah SC, karena pada dasarnya SC adalah sebuah generator yang dioperasikan seperti sebuah motor listrik besar yang tidak menghasilkan daya aktif.

### II.3.2 Pengaturan Daya Reaktif pada SC

Daya reaktif adalah karakteristik output yang sudah melekat pada sebuah SC, hal ini bertemu dengan kebutuhan pengaturan daya reaktif pada sebuah jaringan listrik yang mengalami gangguan. Prinsip pengaturan daya reaktif pada SC ini sama dengan proses pengaturan daya reaktif pada generator biasa ketika sudah terhubung dengan jaringan. Karena daya aktif yang diserap oleh SC dari jaringan adalah sangat kecil sehingga dapat diabaikan, maka sudut daya dari SC itu sama dengan 0. Gambar 4 menunjukkan kemampuan daya reaktif sebuah generator saat dioperasikan sebagai SC. Karena SC beroperasi tanpa beban maka SC tidak akan memiliki masalah kestabilan dan karena itu dapat menghasilkan daya reaktif yang lebih besar hingga 50% dibandingkan ketika dioperasikan sebagai generator biasa.

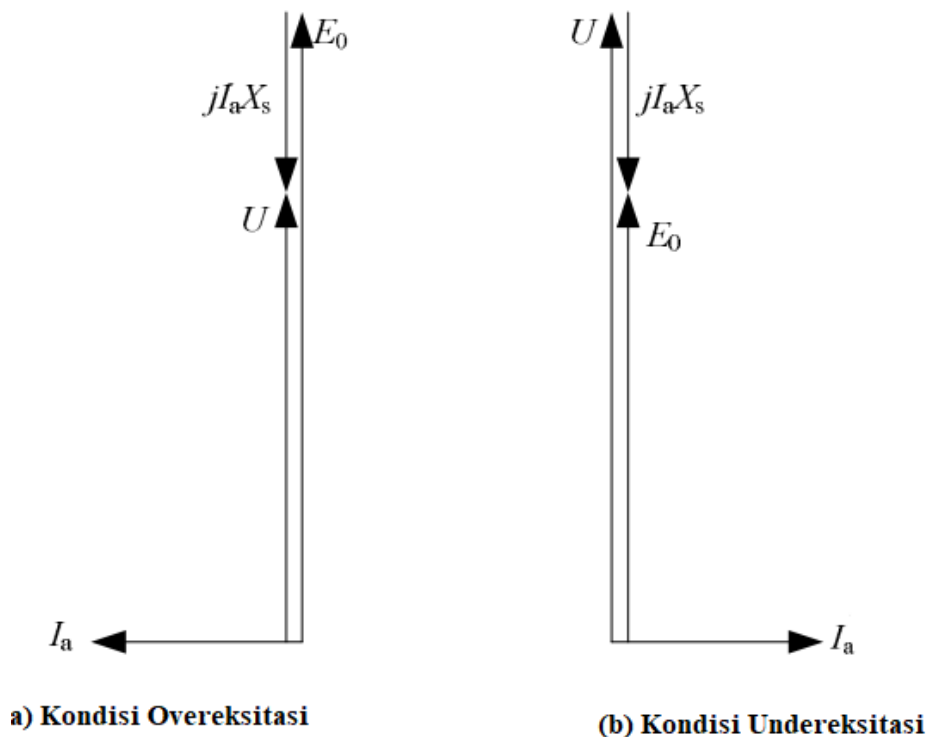


**Gambar 4** Kurva kapabilitas reaktif sebuah SC (Fogarty and Nold, 2017)

Berdasarkan teori dasar listrik maka kita dapat menuliskan persamaan tegangan SC sebagai berikut:

$$U = E_0 + jI_a X_s \quad (6)$$

Di mana,  $E_0$  adalah gaya gerak listrik,  $U$  adalah tegangan terminal,  $I_a$  adalah arus armatur dan  $X_s$  adalah reaktansi SC. Berdasarkan rumus (6) di atas maka vektor diagram dari sebuah SC saat berputar secara ideal dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.

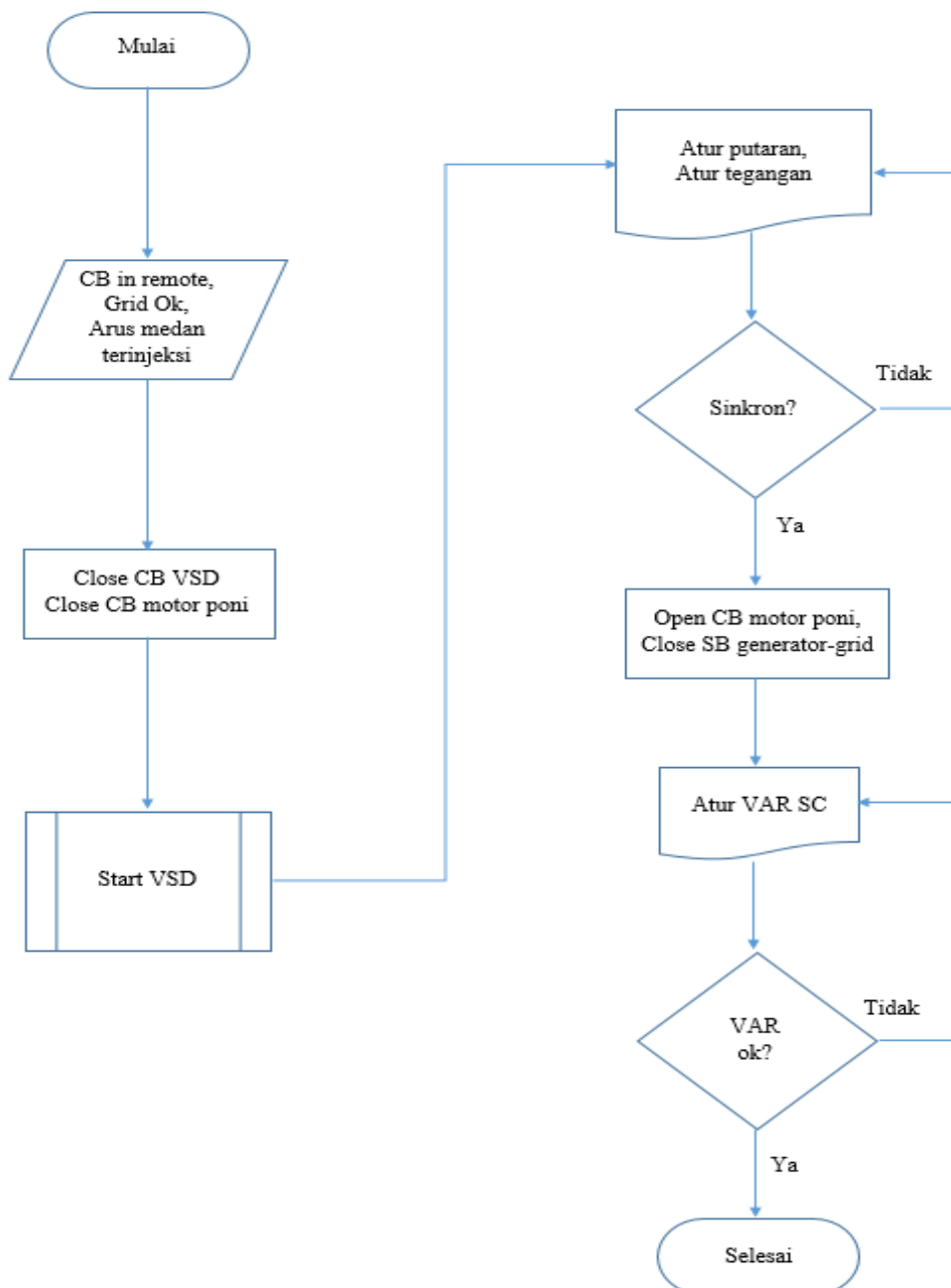


**Gambar 5** Diagram vektor SC (Min *et al.*, 2019)

Jadi dengan mengatur arus eksitasi untuk mengubah  $E_0$ , keluaran daya reaktif dapat diatur menyesuaikan pengaturan daya reaktif di jaringan. Ketika SC dioperasikan dalam kondisi *over-excitation* (a),  $I_a$  akan mendahului  $U$  sebesar  $90^\circ$ , maka SC menyuplai daya reaktif pada jaringan, sehingga tegangan sistem dapat meningkat ketika tegangan *drop* karena adanya gangguan. Ketika SC dioperasikan dalam kondisi *under-excitation* (b),  $U$  akan mendahului  $I_a$  sebesar  $90^\circ$ , maka SC akan menyerap daya reaktif dari jaringan, sehingga kelebihan daya reaktif tersebut terserap dan keseimbangan tegangan pada sistem dapat tercapai (Min *et al.*, 2019).



Pada Gambar 6 kita dapat melihat diagram alir dari proses pengontrolan daya reaktif yang dilakukan dengan memanfaatkan generator pembangkit *standby* menjadi sebuah SC, perlu dicatat bahwa dalam diagram ini *prime mover* dari generator eksisting telah diganti dengan sebuah motor poni yang dikontrol dengan sebuah *variable speed drive* (VSD).



**Gambar 6** Diagram alir pengaturan VAR dengan SC

## **II.4 SC untuk Optimasi Jaringan Transmisi**

Banyak regulator transmisi di seluruh dunia yang sudah melihat pentingnya menggunakan SC sebagai bagian dari solusi masalah yang terjadi dalam jaringan transmisi mereka, baik itu dengan menggunakan sebuah SC yang baru maupun dengan cara mengkonversi salah satu dari generator pembangkit daya mereka menjadi SC. Urgensi pemanfaatan SC saat ini menjadi semakin tinggi akibat tingginya penetrasi pembangkit dari energi terbarukan seperti PLTS dan PLTB.

### **II.4.1 Peran SC dalam Meningkatkan Kapasitas Transfer Daya**

Pengaturan daya reaktif yang dihasilkan atau diserap oleh SC dilakukan untuk mengatur tegangan pada jaringan. Dengan optimalnya tegangan jaringan pada setiap titik, maka rugi-rugi daya pada sistem kelistrikan juga ikut menurun. Dengan kata lain, kapasitas transfer daya pada sistem kelistrikan dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan SC. Sehingga dengan sistem kelistrikan yang tersedia, para regulator kelistrikan seperti PLN dapat mengirimkan daya dengan jumlah yang lebih banyak tanpa harus memodifikasi jaringan yang telah ada (Marazzi, 2015; Nielsen, 2015).

### **II.4.2 Peran SC dalam Meningkatkan Inersia Sistem Tenaga**

Adanya rencana penetrasi pembangkit listrik dari energi terbarukan memunculkan masalah dalam hal stabilitas. Pembangkit listrik energi terbarukan yang melakukan sinkronisasi dengan sistem transmisi melalui konverter *ultra high voltage direct current* (UHVDC) tidak berkontribusi dalam penambahan inersia jaringan yang sangat penting dalam kestabilan sistem tenaga (Cui *et al.*, 2020). Untuk meningkatkan inersia sistem tenaga setelah adanya penetrasi pembangkit listrik energi terbarukan, salah satu pilihan adalah dengan mengoperasikan SC. Inersia dari sistem jaringan dapat bertambah sebanding dengan kapasitas dari generator yang dikonversi menjadi sebuah SC.

### **II.4.3 Peran SC dalam Meningkatkan Nilai Arus Hubung Singkat**

Sama halnya dengan inersia, pembangkit listrik EBT tidak berkontribusi meningkatkan kapasitas hubung singkat dari sistem. Alasannya karena pembangkit listrik EBT hanya terdiri dari komponen elektronika daya. Adanya penetrasi pembangkit listrik EBT pada jaringan sistem tenaga harus diselaraskan dengan kenaikan kapasitas hubung singkat, supaya tidak ada kegagalan pada rele arus lebih dalam mendeteksi adanya hubung singkat. Dengan mengoperasikan SC, kapasitas hubung singkat suatu sistem tenaga dapat ditingkatkan. Kenaikan kapasitas hubung singkat sistem tenaga berbanding terbalik dengan nilai reaktansi sub-transien dari SC tersebut (Masood *et al.*, 2016; Min *et al.*, 2019; Richard *et al.*, 2020).

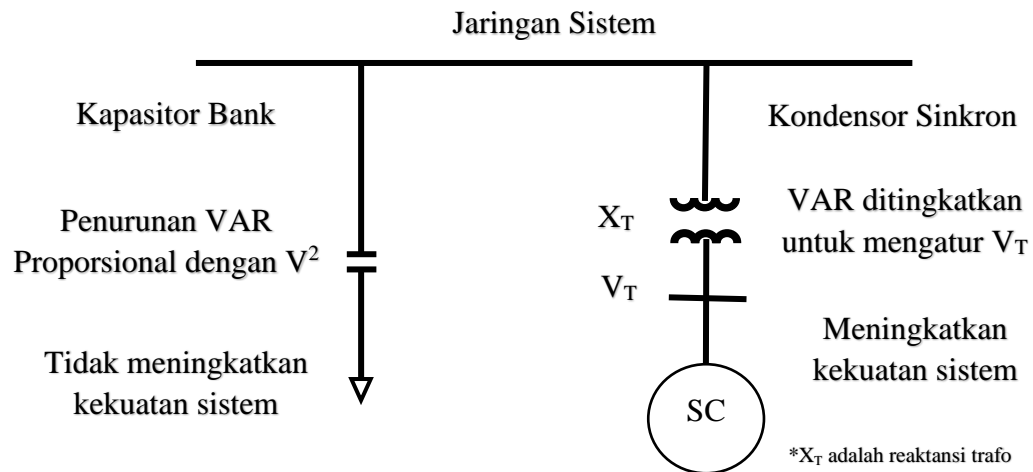
### **II.4.4. Peran SC dalam Mengurangi Ketidakseimbangan Tegangan**

Ketidakseimbangan sering terjadi pada sistem *alternating current* (AC) tiga fasa. Hal ini terjadi karena pemasangan beban satu fasa yang tidak seimbang dan efek saluran transmisi yang tidak di-*transpose*. Tegangan atau arus yang tidak seimbang menghasilkan komponen urutan negatif dan nol, yang akan mengurangi efisiensi sistem akibat *losses* daya dan menurunkan torka pada motor listrik. Secara sederhana, ketidakseimbangan dapat diatasi dengan menambah impedansi jaringan, namun akan berdampak pada susut tegangan yang signifikan, sehingga tegangan pada sisi penerima akan jauh lebih rendah dari sisi pengirim.

SC mampu mengurangi efek ketidakseimbangan karena dapat dioperasikan untuk menghasilkan daya reaktif dengan mengatur arus eksitasinya. Dengan menghasilkan daya reaktif, maka tegangan pada sistem dapat diperbaiki, baik nilainya maupun ketidakseimbangannya (Jia *et al.*, 2019).

## II.5 Perbandingan SC dengan Kompensator Daya Reaktif lain

### II.5.1 Perbandingan SC dengan Kapasitor Bank



**Gambar 7** Perbandingan kondensor sinkron dan kapasitor bank

Terlihat pada gambar 7 bahwa kondensor sinkron dapat berperan tidak hanya sebagai kapasitor (yang menghasilkan VAR) sebagaimana kapasitor bank, tetapi kondensor sinkron juga berfungsi sebagai induktor (yang menyerap VAR) sehingga penggunaannya akan lebih menguntungkan jika dibandingkan dengan kapasitor bank.

### II.5.2 Perbandingan SC dengan Static Var Compensator (SVC)

**Tabel 2** Perbandingan kondensor sinkron dan SVC

Static Var Compensator	Kondensor Sinkron
Dapat menyerap dan menghasilkan daya reaktif	Dapat menyerap dan menghasilkan daya reaktif
Tidak berpengaruh pada inersia sistem	Mampu meningkatkan inersia sistem
Tidak berpengaruh pada kapasitas hubung singkat sistem	Mampu meningkatkan kapasitas hubung singkat sistem
Lebih murah	Lebih mahal

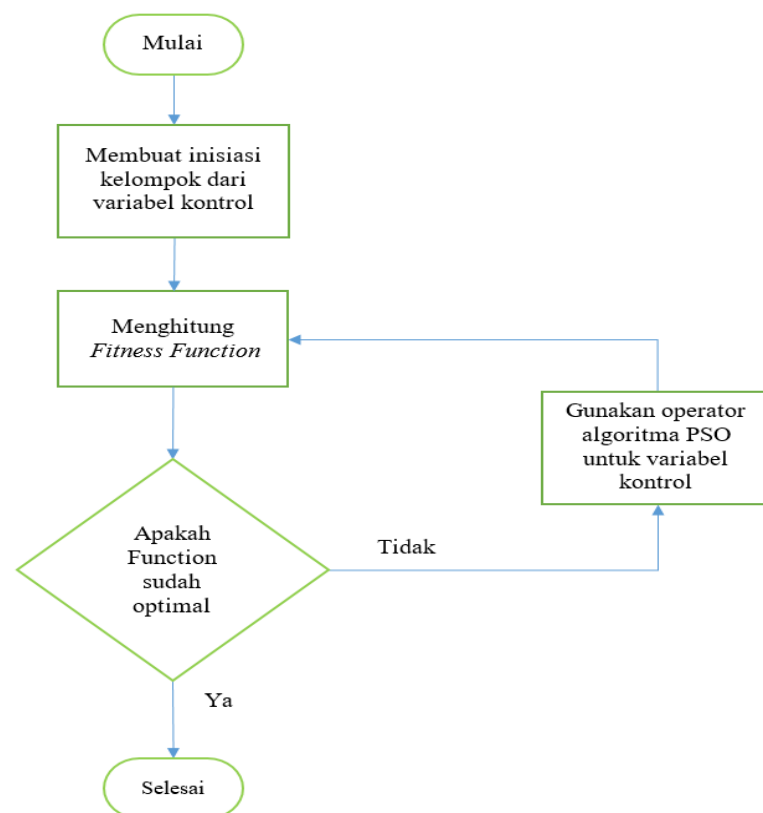
Berdasarkan tabel 2, jika dibandingkan dengan SVC maka kondensor sinkron dapat membantu meningkatkan stabilitas sistem kelistrikan dengan lebih baik karena mampu meningkatkan inersia dan jumlah kapasitas hubung singkat sistem sehingga dapat membantu mengatasi masalah seperti fluktuasi tegangan, gangguan harmonik, dan penurunan kestabilan sistem.

## II.6 Pengenalan PSO dan Algoritma PS

### II.6.1 PSO

Menurut tulisan (Okwu and Tartibu, 2021) metode *particle swarm optimization* (PSO) pertama kali dikembangkan oleh Jamie Kennedy dan Russell Eberhart pada tahun 1995. Ide utama dibalik metode ini adalah untuk meneladani kemampuan sekelompok burung untuk terbang beriringan, mengubah arah, berpencar dan kemudian bergabung kembali dalam satu kelompok.

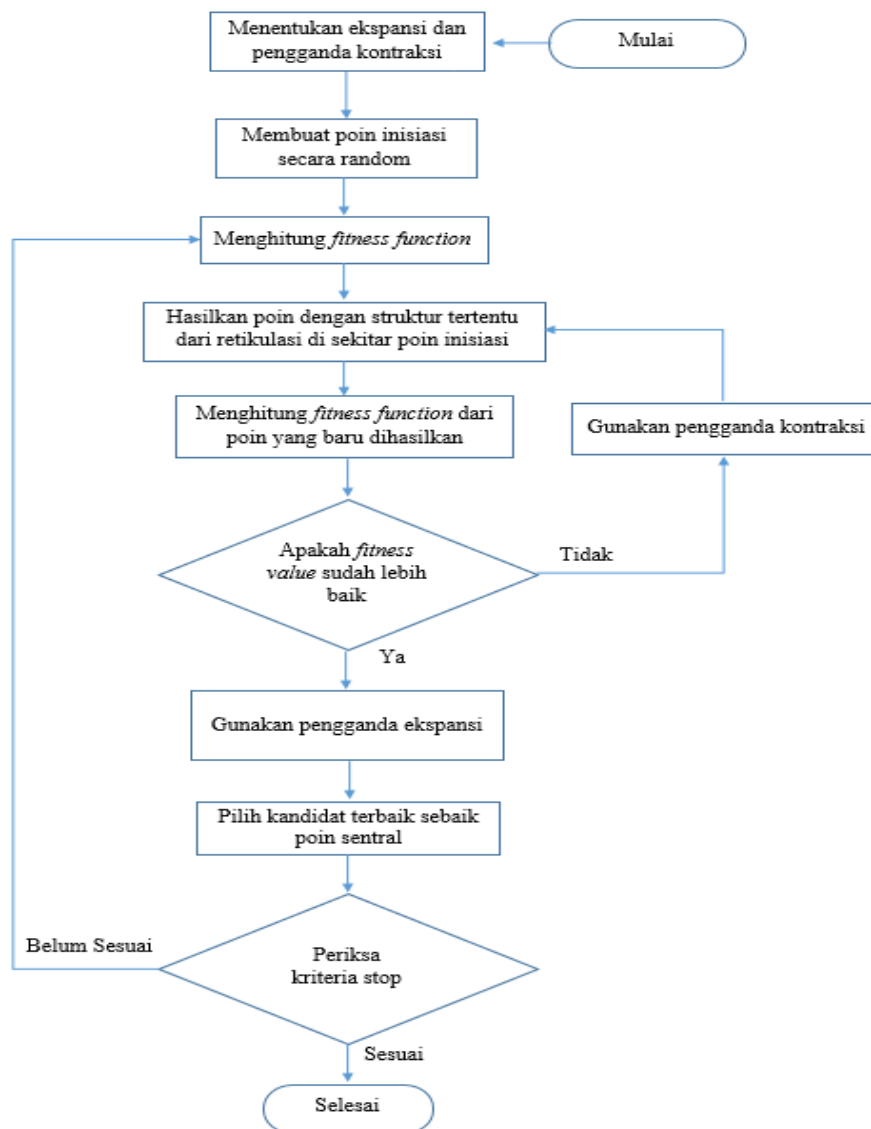
Langkah-langkah dalam algoritma PSO relatif sederhana karena hanya *velocity*, posisi, personal terbaik, dan posisi global yang diperbarui di setiap pengulangan. Keuntungan utama dari algoritma PSO terdapat pada konfigurasi yang sederhana dan dengan mudah dapat diimplementasikan (Park *et al.*, 2005) serta menurut pendapat para peneliti PSO telah menunjukkan hasil yang sukses ketika diterapkan pada optimasi sistem tenaga (Yu, Xiong and Wu, 2004; Bai and Zhao, 2006; Lee and Park, 2006; Alinejad-Beromi, Sedighzadeh and Sadighi, 2008). Gambar 8 menunjukkan diagram alir dasar dari sebuah algoritma PSO.



**Gambar 8** Diagram alir dasar algoritma PSO

## II.6.2 Algoritma PS

Algoritma *Pattern Search* (PS) adalah merupakan sebuah pendekatan aritmetika yang tidak memerlukan *gradient* dan *objective function* yang hendak dioptimasi, sehingga algoritma PS dapat digunakan pada fungsi-fungsi dikrit yang tidak terdiferensiasi juga. Metode ini terkenal dengan nama metode pencarian langsung, bebas turunan atau metode *black-box*. Karena fleksibilitas dari metode ini maka metode ini dapat diintegrasikan dengan algoritma heuristik (*global optimizer*) untuk melakukan pencarian global tanpa beresiko terjebak di dalam satu titik optimum lokal. Secara sederhana cara kerja algoritma PS dapat dilihat pada Gambar 9 berikut:



**Gambar 9** Diagram alir algoritma PS