

PROPOSAL PENELITIAN
PENYETELAN OPTIMAL KONDENSOR SINKRON
UNTUK OPTIMASI JARINGAN TRANSMISI



RISHAN KARANGAN

D032202010

DOSEN PEMBIMBING :

Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph. D
Dr. Ir. Rhiza S. Sadjad, MSEE

PROGRAM PASCASARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2021

LEMBAR PENGAJUAN

Judul Tesis : PENYETELAN OPTIMAL KONDENSOR SINKRON UNTUK
MENINGKATKAN OPTIMASI JARINGAN TRANSMISI

Nama : RISHAN KARANGAN
NIM : D032202010
Program Studi : Teknik Elektro

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Akademik Pada Program Pasca Sarjana
Universitas Hasanuddin Makassar

Menyetujui:

Pembimbing 1,

Pembimbing 2,

Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph. D
NIP. 19780424 200112 2 001

Dr. Ir. Rhiza S. Sadjad, MSEE
NIP. 195709061982031004

Ketua Program Studi,

Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T, M.Eng, IPU
NIP. 197405301999031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : RISHAN KARANGAN
NIM : D032202010
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya yang berjudul

**PENYETELAN OPTIMAL KONDENSOR SINKRON UNTUK
MENINGKATKAN OPTIMASI JARINGAN TRANSMISI**

adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan dari orang lain, dan bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 29 Agustus 2021

Yang Menyatakan

(RISHAN KARANGAN)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGAJUAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Kondensor Sinkron.....	6
2.1.1 Pemanfaatan Kondensor Sinkron	6
2.1.2 Pengaturan Daya Reaktif pada Kondensor Sinkron	9
2.1.3 Rencana Kondensor Sinkron di Sistem Sulawesi Bagian Selatan	10
2.2. Optimasi Jaringan Transmisi	12
2.2.1 Aliran Daya.....	13
2.2.2 Stabilitas Transien	13
2.2.3 Stabilitas Frekuensi.....	15
2.2.4 Stabilitas Tegangan.....	17
2.2.6 Jaringan Transmisi Sulawesi Bagian Selatan.....	20
2.3. Kondensor Sinkron untuk Optimasi Jaringan Transmisi	21
2.3.1 Peran Kondensor Sinkron dalam Meningkatkan Kapasitas Transfer Daya	21
2.3.2 Peran Kondensor Sinkron dalam Meningkatkan Inersia Sistem Tenaga	22
2.3.3. Peran Kondensor Sinkron dalam Meningkatkan Nilai Arus Hubung Singkat.....	22
2.3.4. Peran Kondensor Sinkron dalam Mengurangi Ketidakseimbangan Tegangan	23
2.3.5 Prognosa Peran Kondensor Sinkron di Transmisi Sulawesi Bagian Selatan	23
2.4. SOTA Penelitian Terkait.....	24
2.5 Hibridisasi Metode PSO dan Algoritma PS	25
2.5.1 Pengenalan PSO	25
2.5.2 Pengenalan Algoritma PS.....	26
2.5.3 Prosedur metode hibridisasi PPSO dalam Penyetelan SC.....	28
BAB III METODE PENELITIAN	29
3.1 Tahapan Penelitian.....	29
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	29
3.2.1 Waktu.....	29

3.2.2 Lokasi.....	30
3.3 Jenis Penelitian	30
3.4 Sumber Data	31
3.5 Progres Penelitian.....	32
3.5.1 Pemodelan Jaringan Transmisi	32
3.5.2 Penyetelan Kondensor Sinkron	34
3.5.2 Pengujian Jaringan Transmisi.....	35
DAFTAR PUSTAKA.....	vi

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel SoTA Penelitian Synchronous Condenser	24
Tabel 3.1 Tabel Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	30
Tabel 3.2 Tabel Kebutuhan Data Sekunder Penelitian	31

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Dasar Sistem Kondensor Sinkron [27].....	6
Gambar 2.2 Kurva Kapabilitas Generator sebagai Synchronous Condensor [43].....	8
Gambar 2.3 Diagram Vektor Synchronous Condensor.....	9
Gambar 2.4 Kurva Kapabilitas Generator Westcan [44]	10
Gambar 2.5 Daya Reaktif Maksimal Generator Westcan sebagai SC	11
Gambar 2.6 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.....	12
Gambar 2.7 Kurva $P - \delta$ [45].....	14
Gambar 2.8 Diagram Satu Garis Sistem Dua Bus (Radial)	18
Gambar 2.9 Kurva Q-V.....	19
Gambar 2.10 Gambar Jaringan Transmisi Sulawesi Bagian Selatan [46]	20
Gambar 2.11 Diagram Alir Dasar dari PSO	26
Gambar 2.12 Diagram Alir Algoritma PS	27
Gambar 2.13 Gambar Diagram Alir PPSO.....	28
Gambar 3.1 Rancangan Penempatan SC di sub-sistem Sulselbar.....	32
Gambar 3.2 Rancangan Penempatan SC di sub-sistem Sulteng	33
Gambar 3.3 Rancangan Penempatan SC di sub-sistem Sultra.....	33
Gambar 3.4 Flowchart Metode Optimasi Penyetelan SC	34

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Karena masalah dampak lingkungan di dunia, dalam beberapa tahun terakhir Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) 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, saat ini masih sangat bergantung dengan energi fosil, dimana hanya sekitar 5%-6% dari pembangkit listrik negara berkembang yang sudah menggunakan energi terbarukan [1]. Sejalan dengan itu, pemerintah Indonesia telah memasang target untuk menaikkan presentase jumlah pembangkit energi terbarukan hingga 23% di tahun 2025 [2], [3].

Penutupan beberapa PLTU dan PLTN yang diiringi dengan naiknya jumlah pembangkit PLTS dan PLTB, walaupun berdampak signifikan pada perbaikan kondisi lingkungan, namun kondisi ini 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 [4]. Kondisi yang serupa juga terjadi di Indonesia, walaupun Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai regulator tunggal kelistrikan belum sampai melakukan penutupan pembangkit-pembangkit PLTU namun sudah banyak pembangkit-pembangkit diesel (PLTD) yang diistirahatkan, dan dengan digencarkannya pembangunan PLTS dan PLTB, maka pada saat ini para operator sistem juga sudah mengalami masalah ketidakstabilan sistem karena berkurangnya inersia beserta semua dampak turunannya [3], [5].

Selama ini, permasalahan ketidakstabilan sistem karena kurangnya pasokan daya reaktif akibat menjamurnya 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 tidak mampu menangani masalah kurangnya inersia sistem [6]. Dan salah satu kelemahan yang menonjol dari penggunaan peralatan FACTS adalah timbulnya harmonisa, sehingga berdampak pada turunnya efisiensi sistem transmisi karena harmonisa menyebabkan arus lebih, rugi-rugi tambahan dan *noise* pada sistem telekomunikasi [7]. Dengan pertimbangan tersebut, teknologi Kondensor Sinkron atau biasa disebut Synchronous Condenser (SC) akhirnya dilahirkan kembali, pemanfaatannya untuk memproduksi dan menyerap daya reaktif, meningkatkan inersia sistem tenaga, serta memperbesar kapasitas arus hubung singkat tanpa menimbulkan harmonisa, telah banyak diteliti [1], [4]–[6], [8]–[19]. Fenomena kebangkitan SC ini kemudian membuat beberapa perusahaan kelistrikan dunia sudah mulai memproduksi SC, namun harganya saat ini masih sangat mahal, yaitu sekitar 12 Miliar rupiah untuk daya 10 MVAR saja. Selain itu penelitian terhadap pemanfaatan SC saat ini masih terbatas pada pemanfaatan salah satu fungsi dari SC, sehingga secara umum alat ini belum dimanfaatkan secara maksimal.

Atas semua hal yang sudah dipaparkan diatas, peneliti tertarik untuk melakukan penyetelan optimal SC untuk meningkatkan kinerja jaringan transmisi 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 penyetelan khusus harus selalu dilakukan berdasarkan karakteristik setiap sistem transmisi kelistrikan yang sangat beragam, termasuk pada sistem transmisi Sulawesi Bagian Selatan yang memiliki karakteristik dan *grid code* tersendiri [20], yang akan menjadi obyek dari penelitian ini.

Untuk mendapatkan hasil terbaik maka dalam penelitian ini, peneliti akan melakukan penyetelan SC dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada *software* MATLAB dan hasilnya akan disimulasikan dan dianalisa dengan menggunakan *software* DIgSILENT, perpaduan dari kedua tools ini telah diteliti memberikan hasil yang sangat baik [19], [21]. Metode optimasi PSO akan digunakan karena juga telah terbukti memberikan solusi kualitas yang terbaik dengan sedikit iterasi dibanding dengan metode *Genetic Algorithm* (GA) yang lain, bahkan pada faktanya PSO menunjukkan waktu komputasi yang lebih pendek dan dapat diadaptasi pada kasus-kasus nyata dalam jaringan daya [22]–[26]. Jebakan optimasi lokal yang menjadi kelemahan signifikan dari PSO akan ditutup dengan menggunakan algoritma tambahan yaitu algoritma *Pattern Search* (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 *Particle Swarm Pattern Search Optimization* (PSPSO). Dan akhirnya untuk mengatasi persoalan mahal nya penyediaan SC yang baru, maka penelitian ini akan memaparkan kajian pemanfaatan generator bekas laik pakai menjadi SC, yang banyak tersedia di PLN sebagai imbas dari penutupan pembangkit-pembangkit PLTD yang akan memberikan penghematan pengadaan SC hingga 50%.

1.2 Rumusan Masalah

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

- a. Bagaimana menentukan bentuk penyetelan terbaik dari SC dalam mengatur daya reaktif, meningkatkan inersia sistem dan menaikkan level arus hubung singkat?
- b. Bagaimana merancang penyetelan SC dengan menggunakan algoritma PSPSO?
- c. Bagaimana menentukan penempatan terbaik SC di jaringan Sulawesi Bagian Selatan dengan menggunakan algoritma PSPSO agar optimasi sistem dapat tercapai?

- d. Bagaimana mengevaluasi jumlah penghematan yang bisa dicapai saat SC dioperasikan di sistem transmisi Sulawesi Bagian Selatan?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Menentukan bentuk penyetelan terbaik dari SC dalam mengatur daya reaktif, meningkatkan inersia sistem dan menaikkan level arus hubung singkat.
- b. Merancang penyetelan SC dengan menggunakan algoritma PPSO.
- c. Menentukan penempatan terbaik SC di jaringan Sulawesi Bagian Selatan dengan menggunakan algoritma PPSO agar optimasi sistem dapat tercapai.
- d. Mengevaluasi jumlah penghematan yang bisa dicapai saat SC dioperasikan di sistem transmisi Sulawesi Bagian Selatan.

1.4 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 untuk meningkatkan kinerja jaringan transmisi. Dan secara khusus, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan hasil perhitungan penyetelan SC yang paling optimal, demi meningkatkan kehandalan dan efisiensi sistem transmisi Sulawesi Bagian Selatan sembari memanfaatkan kembali sejumlah generator bekas laik pakai dari pembangkit-pembangkit diesel yang sudah dipensiunkan.

1.5 Batasan Masalah

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

- a. Fokus dari penelitian ini adalah untuk menentukan bentuk penyetelan terbaik dari SC dalam mengatur daya reaktif, meningkatkan inersia sistem dan menaikkan level arus hubung singkat.
- b. Acuan optimasi parameter dalam penelitian ini didasarkan pada aturan jaringan sistem tenaga listrik (*grid code*) Sulawesi.
- c. Penyetelan SC akan dilakukan dengan bantuan aplikasi MATLAB dengan menggunakan algoritma PPSO.
- d. Simulasi pengaruh penggunaan kondensor sinkron di dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan aplikasi DIGSILENT.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan proposal ini disusun secara sistematis yang terdiri atas 3 (tiga) bab yang saling berhubungan. Bab pertama berisikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab kedua menjelaskan tentang gambaran umum dari *synchronous condenser* (SC), jaringan transmisi dan *optimasi dispatch* serta penelitian-penelitian terkait pemanfaatan kondenser sinkron. Bab ketiga berisi tentang metode penelitian, penentuan masalah, dan metode optimasi serta penjelasan metode pengumpulan data dan analisis data.

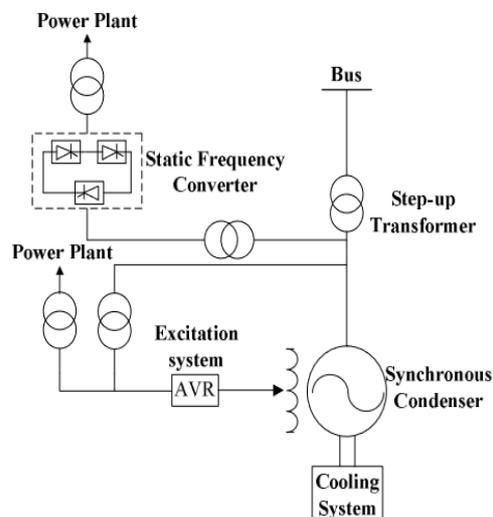
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kondensor Sinkron

2.1.1 Pemanfaatan Kondensor Sinkron

Kondenser sinkron atau *synchronous condenser* (SC), terkadang disebut kapasitor sinkron atau kompensator sinkron adalah sebuah alat yang identik dengan motor sinkron, namun porosnya dibiarkan berputar bebas tanpa beban. Fungsi awalnya adalah untuk menyuplai daya reaktif ke dalam sistem dan meningkatkan faktor daya. Dibandingkan dengan generator sinkron, alat ini tidak memiliki pengaturan kapabilitas daya aktif karena SC tidak memiliki penggerak mula dan sistem kontrol kecepatan [27]. Struktur dasar sistem SC dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur Dasar Sistem Kondensor Sinkron [27]

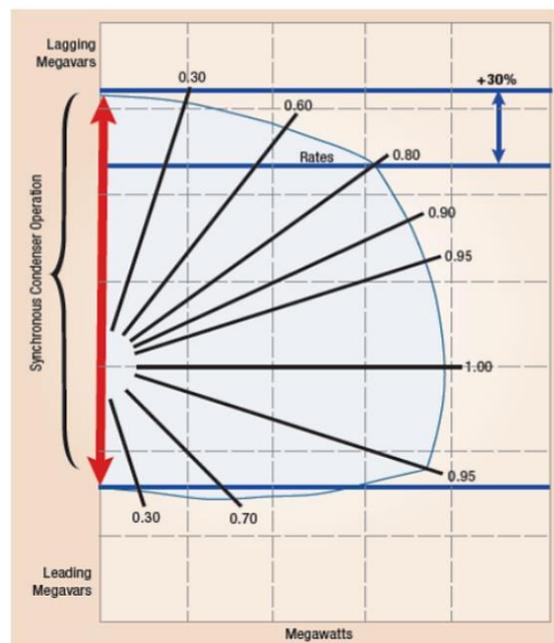
Dari sejak awal, bersamaan dengan lahirnya jaringan transmisi tenaga listrik, SC sudah digunakan sebagai salah satu pembangkit utama untuk mengatur tegangan. Dalam perkembangannya, teknologi baru yang lebih murah, seperti *Static VAR Compensator* (SVC) dan peralatan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) bermunculan dan menggantikan fungsi SC untuk mengatasi masalah daya reaktif di sistem transmisi daya listrik [1].

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 dilahirkan kembali sekitar sepuluh tahun yang lalu adalah:

- Penutupan beberapa pembangkit PLTU dan PLTN akibat isu dampak lingkungan, membuat inersia sistem tenaga menurun secara signifikan. Potensi solusi untuk masalah seperti ini menurut beberapa penelitian adalah pemanfaatan SC [5], [6], [8], [13], [28], [29].
- 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 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 [10], [27], [30]–[39].
- Sistem tenaga yang mentransmisikan daya aktif yang besar, tidak menyediakan daya reaktif untuk sistem transmisi kelistrikan Arus Bolak-balik (AC), sehingga cadangan reaktif dinamis dan daya hubung singkat yang menurun membuat stabilitas sistem pun menurun secara signifikan ketika beberapa sistem transmisi dikoneksikan untuk membentuk jaringan interkoneksi yang lebih besar. Terkait persoalan ini, penelitian terkait pun menunjuk SC sebagai salah satu metode penyelesaiannya [5], [11], [12], [15], [17]–[19], [37], [40], [41].

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 dapat dimanfaatkan menjadi sebuah SC [42], karena pada dasarnya SC adalah sebuah generator yang dioperasikan seperti sebuah motor listrik besar, yang tidak dibebani.

Mengacu pada hasil penelitian kapabilitas daya reaktif generator [43] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, di mana sumbu mendatar dari kurva kapabilitas generator ini adalah daya aktif dan sumbu tegaknya adalah daya reaktif. Dari sumbu tegak ini dapat diketahui bahwa daya reaktif pada mesin sinkron ini dapat mengalir di kedua arah (menghasilkan ataupun menyerap daya reaktif). Hal ini yang menjadi salah satu fungsi dioperasikannya mesin sinkron sebagai SC.



Gambar 2.2 Kurva Kapabilitas Generator sebagai Synchronous Condenser [43]

SC dioperasikan dengan nilai daya aktif nol sehingga interval operasi SC pada kurva kapabilitas tersebut hanya pada garis berwarna merah. Garis berwarna merah menunjukkan variasi nilai daya reaktif saat nilai daya aktif sama dengan nol. Dengan mengatur arus eksitasi, aliran daya reaktif pada SC dapat dikendalikan. Selain itu, pada Gambar 2.2 di atas dapat diketahui bahwa faktor daya nominal dari generator tersebut sama dengan 0.8, jadi apabila generator tersebut dioperasikan sebagai synchronous condenser, maka nilai daya reaktif maksimal yang dapat dihasilkan meningkat sampai dengan 30%-35% jika dibandingkan dengan kondisi operasi sebagai generator [7].

2.1.2 Pengaturan Daya Reaktif pada Kondensor Sinkron

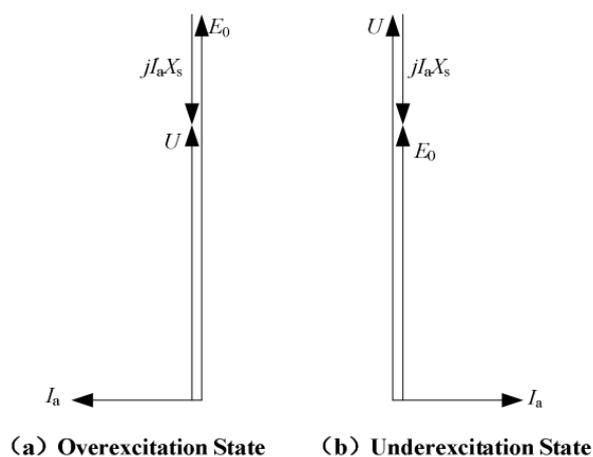
Daya reaktif adalah karakteristik output yang sudah melekat pada sebuah SC, hal ini bertemu dengan kebutuhan pengaturan daya reaktif pada sebuah jaringan listrik yang mengalami gangguan. Prinsip pengaturan daya reaktif pada SC ini sama dengan proses pengaturan daya reaktif pada generator biasa ketika 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. Berdasarkan teori dasar listrik maka kita dapat menuliskan persamaan tegangan SC sebagai berikut

$$U = E_0 + jI_a X_s \quad (1)$$

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 (1) maka vektor diagram dari sebuah SC saat berputar secara ideal dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.

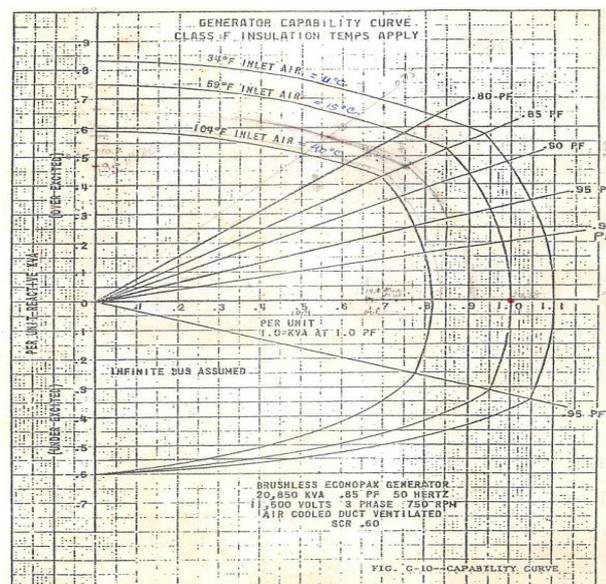


Gambar 2.3 Diagram Vektor Synchronous Condensor [27]

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*, I_a akan mendahului U sebesar 90° , 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*, U akan mendahului I_a sebesar 90° , maka SC akan menyerap daya reaktif dari jaringan, sehingga kelebihan daya reaktif tersebut terserap dan keseimbangan tegangan dapat tercapai saat sistem sedang dioperasikan pada beban rendah [27].

2.1.3 Rencana Kondensor Sinkron di Sistem Sulawesi Bagian Selatan

Sebagaimana yang sudah disebutkan di awal, untuk mengurangi biaya pengadaan SC maka dalam penelitian ini akan dipaparkan kajian pemanfaatan SC yang berasal dari generator bekas laik pakai yang dimiliki oleh PT. PLN (Persero) Unit Pembangkitan dan Penyaluran Sulawesi yang berada di Unit Pengendali Pembangkitan (UPDK) Tello di kota Makassar. Rating daya dari generator tersebut berdasarkan *manual book* adalah 17,7 MVA dengan kurva kapabilitas seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.

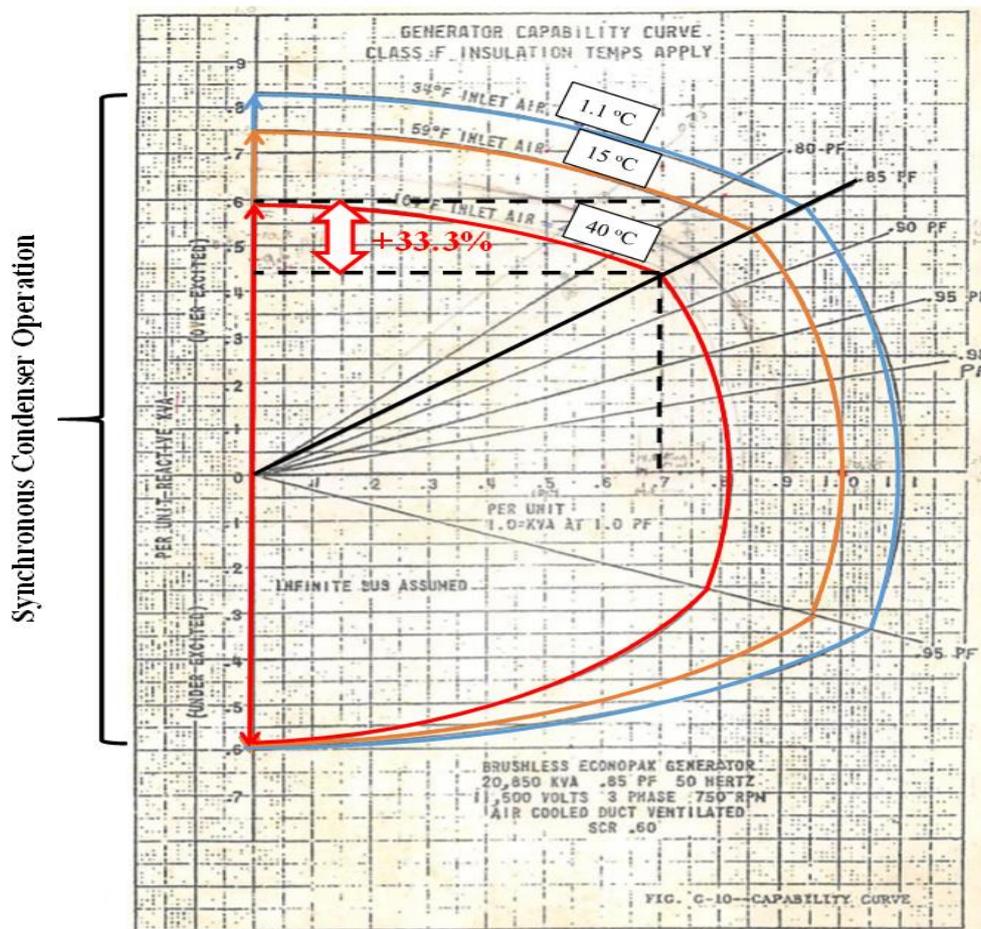


Gambar 2.4 Kurva Kapabilitas Generator Westcan [44]

Berdasarkan Gambar 2.4, maka dapat terlihat bahwa pada suhu 40°C, generator *Westcan* jika dikonversi menjadi SC akan mampu menghasilkan dan menyerap daya reaktif sampai 0.6 pu. Dengan mengacu pada rumus sistem per-unit, di mana:

$$\text{per-unit} = \text{actual_value} / \text{base_value} \quad (2)$$

maka besarnya daya reaktif yang dapat diharapkan dari generator yang berdaya 17.7 MVA ini saat dikonversi menjadi SC adalah 10.62 MVAR. Pada Gambar 2.5, kembali dapat terlihat bahwa daya reaktif maksimal yang mampu dihasilkan SC pada kondisi ini lebih tinggi 33.3% jika dibandingkan apabila beroperasi sebagai generator pada rating faktor dayanya.



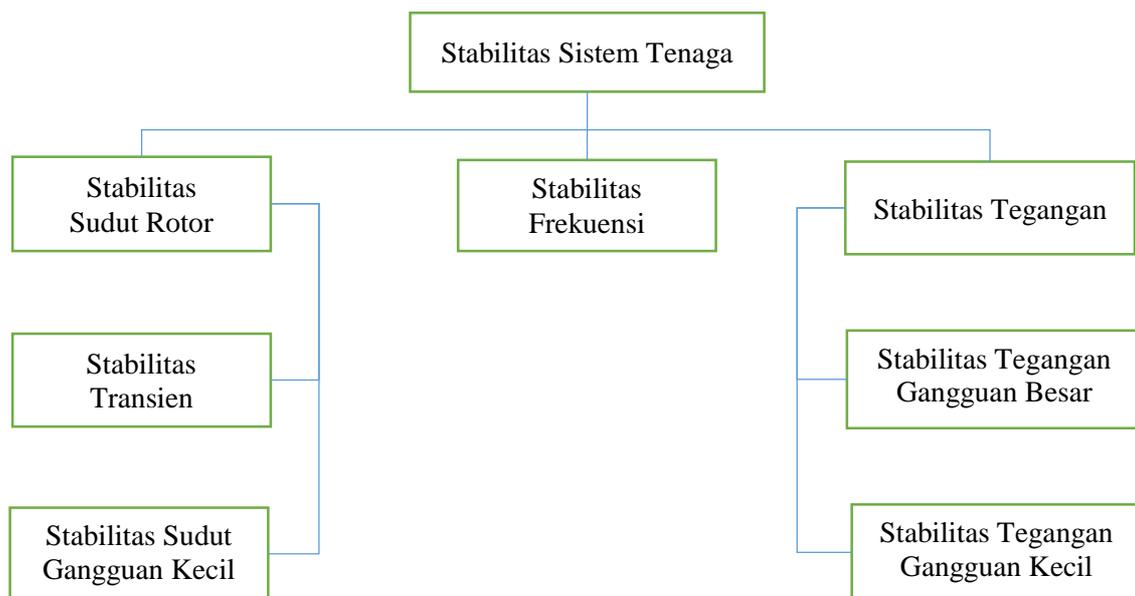
Gambar 2.5 Daya Reaktif Maksimal Generator *Westcan* sebagai SC

2.2. Optimasi Jaringan Transmisi

Sebuah sistem daya harus dirancang untuk memenuhi beberapa persyaratan dasar agar dapat beroperasi pada standar yang diinginkan dalam menyalurkan energi listrik, di antara persyaratan itu adalah:

- Sistem harus mampu menahan fluktuasi beban daya aktif maupun reaktif yang terus berubah-ubah. Energi listrik tidak bisa disimpan dengan mudah, sehingga cadangan putar daya aktif maupun daya reaktif yang cukup harus diadakan sepanjang waktu.
- Sistem harus menyuplai energi dengan biaya seminimal mungkin dan dengan dampak lingkungan yang serendah mungkin.
- Kualitas daya harus memenuhi beberapa besaran dengan standar tertentu secara konstan, misalnya, frekuensi dan tegangan yang konstan dengan level kehandalan yang tinggi.

Secara umum pengelompokan dari upaya untuk mengusahakan stabilitas sistem daya listrik ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

2.2.1 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:

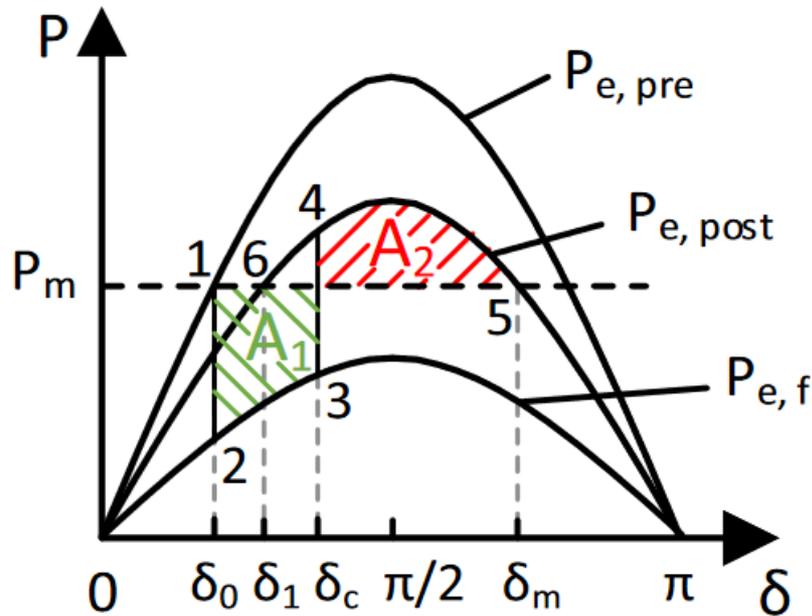
1. Bus Referensi, biasa disebut *slack bus* atau *swing bus*, yaitu bus yang mempunyai besaran $|V|$ tegangan dengan harga skalarnya dan sudut fasa tegangan (δv) dengan titik nol sebagai referensinya.
2. Generator Bus (Bus Pembangkitan), yaitu bus yang diketahui daya nyata (P) dan tegangan $|V|$ pada 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.

2.2.2 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 2.7.



Gambar 2.7 Kurva $P - \delta$ [45]

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 δ 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 δ 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 ω_r diperlambat menuju ω_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 ω_0 sehingga δ terus bertambah dan ketika $P_e > P_m$ sudut rotor dan kecepatan rotor akan terus meningkat hingga mengalami *loss of synchronism* (lepas sinkron).

Critical Clearing Time (CCT) menjadi penentu batasan stabilitas dengan cara menghitung maksimum sudut pemutusan, ini adalah waktu yang dibutuhkan generator untuk beralih dari sudut rotor awal ke sudut rotor kritis. Oleh karena itu, semakin besar CCT, maka akan semakin besar pula gangguan yang dapat ditanggung oleh generator atau sistem [45].

Rumus antara daya mekanik dan elektrik berdasarkan Equal Area Criterion (EAC) adalah:

$$P_a = P_m \quad P_e = J\omega_0 \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (3)$$

Dimana,

- $P_{e, \text{pre}}$ adalah kapasitas transfer daya aktif sebelum gangguan
- $P_{e, \text{f}}$ adalah kapasitas transfer daya aktif selama gangguan
- $P_{e, \text{post}}$ adalah kapasitas transfer daya setelah gangguan
- P_m adalah daya mekanik
- P_a adalah daya percepatan/perlambatan
- J adalah momen inersia
- δ_0 adalah sudut rotor stabil sebelum gangguan
- δ_1 adalah sudut rotor stabil sebelum setelah gangguan
- δ_c adalah sudut rotor kritis yang menentukan batas stabil selama gangguan
- δ_m adalah deviasi sudut rotor maksimal yang diijinkan setelah gangguan diputus
- A_1, A_2 adalah area percepatan dan perlambatan

2.2.3 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 dari sistem (trip), dan nilai inersia sistem. Semakin besar daya unit pembangkit yang hilang semakin besar turun frekuensinya, dan begitu juga 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:

$$H = \frac{\text{Energi Kinetik Mesin (MWs)}}{\text{Rating Mesin (MVA)}} \quad (4)$$

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

$$\frac{df_{ave}(t)}{dt} = \frac{DPG}{2p(H_1 + H_2)} \quad (5)$$

dimana:

- $df_{ave}(t)/dt$ 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 sistem (*Stiffness*).

2.2.4 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. 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.

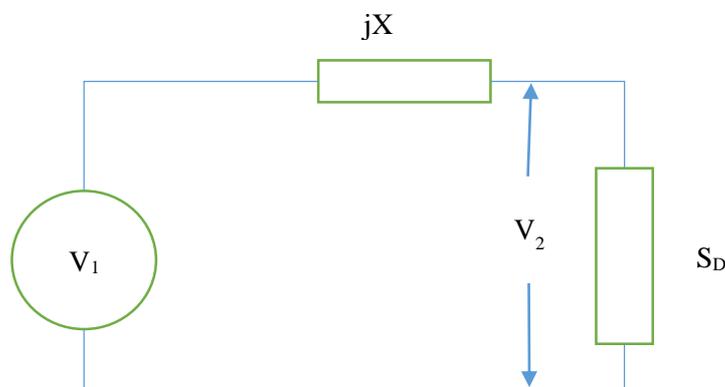
Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap ketidakstabilan tegangan adalah jatuh tegangan yang terjadi ketika daya aktif dan daya reaktif mengalir melalui jaringan transmisi yang bersifat sangat induktif. Hal ini akan membatasi kemampuan suatu jaringan transmisi untuk menyalurkan daya dan penyokong tegangan. Di samping 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

Metode kurva Q-V adalah salah satu metode yang digunakan dalam analisis stabilitas tegangan. Kurva Q-V adalah kurva yang menunjukkan hubungan antara daya reaktif (Q) dan tegangan ujung penerima (V) untuk berbagai macam daya aktif (P). Dari sebuah sistem sederhana seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8, kita dapat membuat persamaan berikut:

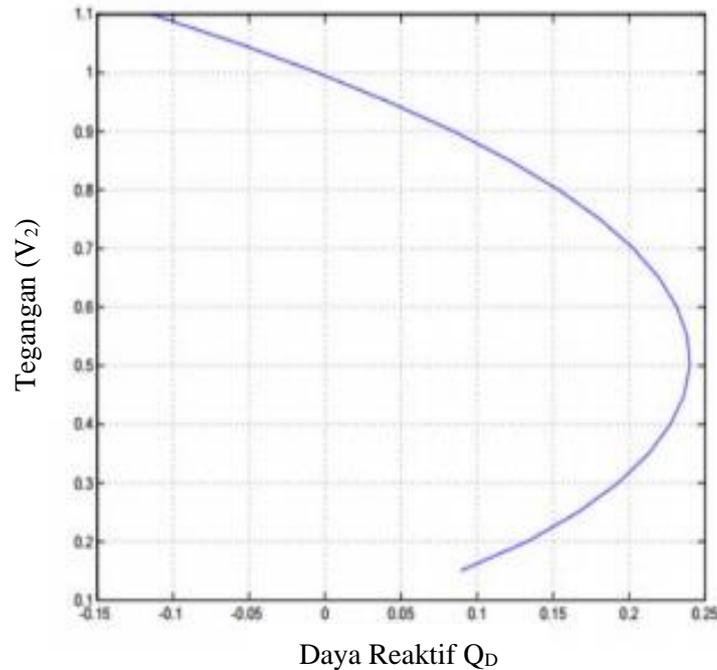
$$P_D = |V_1||V_2|B \sin \theta_{12} \quad (6)$$

$$Q_D = -|V_2|^2 B + |V_1||V_2|B \cos \theta_{12} \quad (7)$$



Gambar 2.8 Diagram Satu Garis Sistem Dua Bus (Radial)

Dengan mengasumsikan $V_1 = 1,0$, dan dengan nilai P_D dan V_2 yang diketahui, dapat dihitung Θ_{12} dari persamaan pertama dan Q dari persamaan kedua. Lalu dilakukan proses yang sama dengan berbagai macam nilai untuk mendapatkan kurva $Q-V$ untuk nilai P_D yang telah ditentukan.



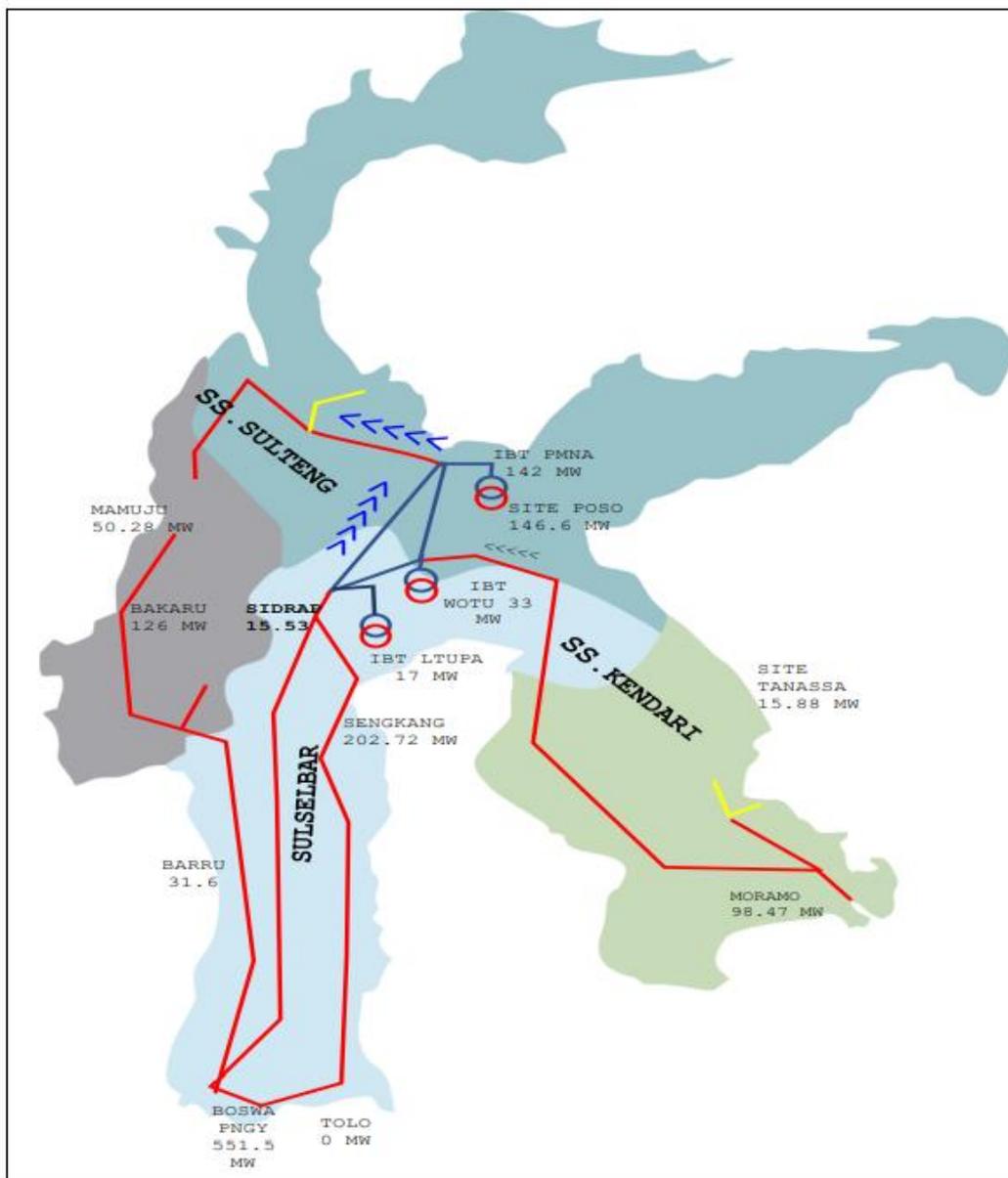
Gambar 2.9 Kurva $Q-V$

Beberapa informasi yang dapat diperoleh dari hubungan $Q-V$ antara lain:

- Sensitivitas dan variasi dari tegangan bus berdasarkan daya reaktif yang diinjeksikan pada bus tersebut
- Studi kebutuhan kompensasi daya reaktif (VAR)
- Ketidakstabilan tegangan terjadi pada saat dQ/dV negatif (critical voltage)
- Bagian bawah kurva $Q-V$ (pada $dQ/dV=0$) menunjukkan batas kestabilan tegangan, kurva $Q-V$ pada sisi kanan menunjukkan daerah stabil dan pada sisi kiri menunjukkan daerah tidak stabil

2.2.6 Jaringan Transmisi Sulawesi Bagian Selatan

Jaringan transmisi 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. Bagan sistem transmisi Sulbagsel ini dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Gambar Jaringan Transmisi Sulawesi Bagian Selatan [46]

Sistem transmisi ini beroperasi pada tiga level tegangan yang berbeda yaitu 275 kV, 150 kV dan 70 kV. Menurut data Evaluasi Operasi Tahunan (EOT) tahun 2020, sistem Sulbagsel menyalurkan beban puncak sistem tertinggi pada tanggal 27 Januari 2020 sebesar 1.391 MW, dengan kontribusi terbesar adalah sub-sistem Sulselbar yang melayani seluruh konsumen di provinsi Sulawesi Selatan dan Sulawesi Barat mencapai 78.01% atau 1,085 MW, disusul sub-sistem Sultra 11.50% atau 160 MW dan diikuti oleh sub-sistem Sulteng 10.49% atau 145 MW. Menurut data yang sama, di sepanjang tahun 2020 telah terjadi penyimpangan frekuensi sistem sebanyak 15 kali, yang disebabkan oleh fluktuasi beban. Untuk gangguan transmisi baik yang berefek padam maupun tidak padam terjadi sebanyak 97 kali. Total energi tidak tersalurkan (ENS) 327,6 MWh dan total susut transmisi (*losses*) sebesar 158,15 GWh [46]. Usaha-usaha jangka pendek dan jangka panjang untuk mengendalikan masalah ini yang akan dilakukan adalah dengan mengupayakan *capacity balance*, penguatan jaringan dan pemasangan kapasitor di sistem tegangan tinggi.

2.3. Kondensor Sinkron 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 pembangkit daya mereka menjadi SC. Urgensi pemanfaatan SC saat ini menjadi semakin tinggi akibat tingginya penetrasi pembangkit dari energi terbarukan seperti PLTS dan PLTB.

2.3.1 Peran Kondensor Sinkron 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 [6], [18].

2.3.2 Peran Kondensor Sinkron 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 stabilitas sistem tenaga [33]. 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.

2.3.3. Peran Kondensor Sinkron dalam Meningkatkan Nilai Arus Hubung Singkat

Sama halnya dengan inersia, pembangkit listrik energi terbarukan tidak berkontribusi dalam meningkatkan kapasitas hubung singkat dari sistem jaringan. Hal tersebut terjadi karena pembangkit listrik energi terbarukan hanya terdiri dari komponen elektronika daya. Adanya penetrasi pembangkit listrik energi terbarukan pada jaringan sistem tenaga harus diselaraskan dengan kenaikan kapasitas hubung singkat. Hal ini dilakukan 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 [10], [27], [42].

2.3.4. Peran Kondensator Sinkron dalam Mengurangi Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakeimbangan sering terjadi pada sistem *Alternating Current* (AC) tiga fasa. Ketidakeimbangan ini bisa 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. Komponen urutan negatif dan nol akan mengurangi efisiensi sistem akibat penambahan pembebanan dan menurunkan torka pada motor listrik. Secara sederhana, ketidakseimbangan dapat di atasi dengan menambah impedansi saluran. Namun hal ini membuat adanya susut tegangan yang signifikan, sehingga tegangan pada sisi penerima jauh lebih rendah dari sisi pengirim. SC mampu mengurangi efek ketidakseimbangan karena alat ini dapat dioperasikan untuk menghasilkan daya reaktif dengan mengatur arus eksitasinya. Dengan menghasilkan daya reaktif, maka tegangan pada sistem dapat diperbaiki, baik nilainya maupun ketidakseimbangannya [40].

2.3.5 Prognosa Peran Kondensator Sinkron di Transmisi Sulawesi Bagian Selatan

Seperti data dan hasil perhitungan yang sudah disampaikan di atas maka generator Westcan di UPRK Tello saat dikonversi menjadi SC akan dapat membantu sistem transmisi Sulbagsel dengan menyuplai dan menyerap daya reaktif sebesar 10,62 MVA. Dan karena SC memiliki nilai tipikal konstanta inersia sebesar 1 MJ/MVA maka generator dengan kapasitas 17.7 MVA tersebut jika dioperasikan sebagai SC, akan memberikan tambahan inersia sebesar 17.7 MJ ke dalam sistem Sulbagsel. Tambahan kompensator daya reaktif dan tambahan inersia ini tentu akan membantu meningkatkan stabilitas sistem transmisi, dengan besaran dampak sesuai dengan posisi penempatan SC.

2.4. SOTA Penelitian Terkait

Penelitian ini merupakan tindaklanjut dari penelitian sebelumnya terkait pemanfaatan kondensor sinkron dengan harapan hasilnya dapat memberikan optimalisasi yang lebih baik. Tabel 2.1 menjelaskan tentang *State of the Arts* (SOTA) dari penelitian sebelumnya dari rentang tahun 2015 hingga tahun 2021.

Tabel 2.1 Tabel SoTA Penelitian Synchronous Condenser

No	Judul	Thn.	Metode	Hasil	Ref.
1	Reputation of the Synchronous Condenser Technology in Modern Power Grid	2018	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.	[1]
2	Study of Synchronous Condenser Impact in Jawa-Madura-Bali System to Provide Ancillary Services	2021	Menggunakan PSS/E simulation untuk mensimulasikan model sistem di masa depan yang dikuasai pembangkit dari sumber RE.	Berdasarkan simulasi, SC akan meningkatkan stiffness sistem dari 680 MW menjadi 794 MW saat terhubung ke jaringan. SC sebagai layanan tambahan akan memberikan kontribusi inersia dan daya reaktif ke sistem Jawa-Madura-Bali.	[5]
3	Allocation of Synchronous Condensers for Low Inertia Systems	2015	Menggunakan metode Differential Evolution (DE) di software MATLAB untuk menentukan alokasi SC	SC dibuktikan memainkan peran penting dalam meningkatkan inersia sistem tenaga dengan menjaga pasokan daya hubung singkat ke dalam jaringan.	[6]
4	Comparative review of reactive power compensation technologies	2015	Studi komparasi SC, SVC dan STATKOM	Ditinjau dari segi Control Coordination, Harmonics, Low-Voltage Ride-Through, Maintainability, Availability of Spare-parts, dan Overload Duty-Cycle, SC menjadi teknologi kompensasi daya reaktif yang paling direkomendasikan.	[7]

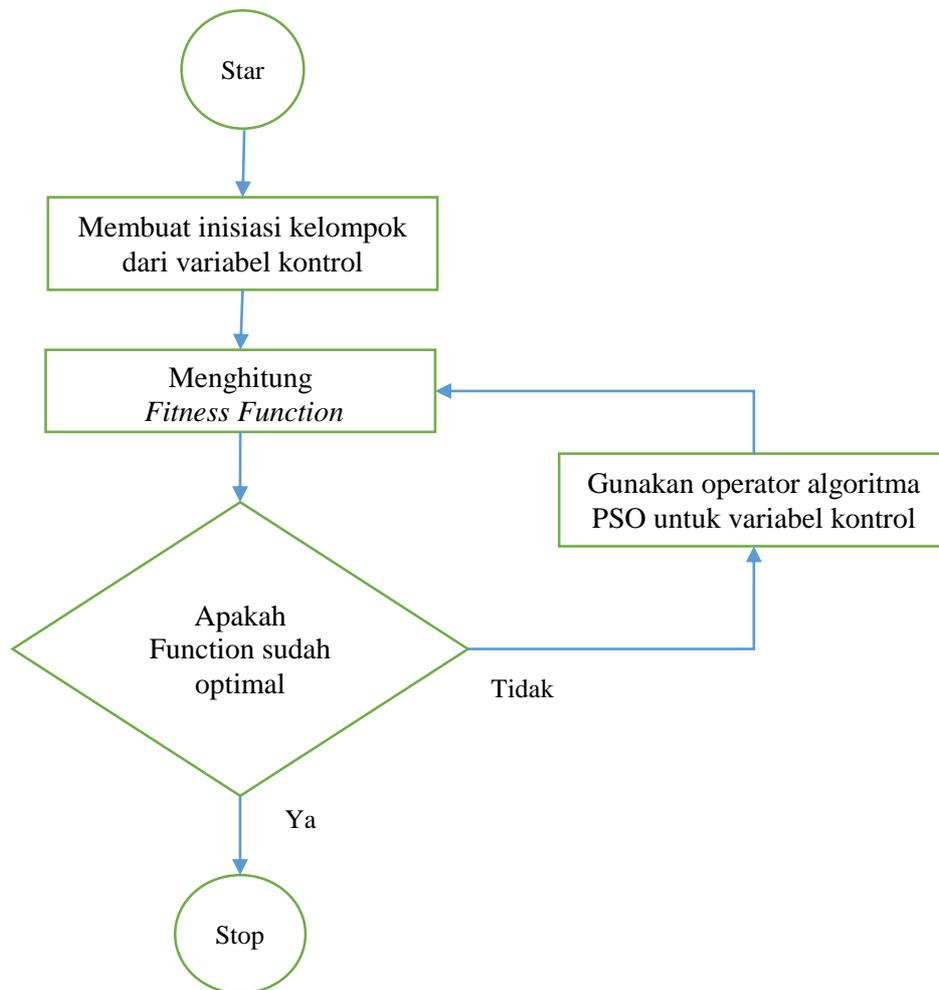
5	Optimal Allocation of Synchronous Condensers in Wind Dominated Power Grids.	2020	Menghitung Short-circuit Ratio dengan menggunakan metode GA pada software PSS@E	Konversi generator ke SC layak dilakukan dan SC dengan kapasitas 100MVA direkomendasikan dipasang di 5 titik berbeda pada sistem yang diteliti (Australia).	[10]
6	Optimal placement of synchronous condensers for power quality improvement in transmission system by using etap power station.	2016	Melakukan simulasi penempatan SC pada 14-bus system dengan menggunakan software simulator Etap Power Station	Merekomendasikan pemasangan 2 buah SC pada bus, penempatan SC terbukti menaikkan power faktor, meminimalkan terjadinya over voltage dan mengurangi lossess jaringan.	[12]
7	Allocation of synchronous condensers for restoration of system short-circuit power	2017	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"> • Posisi terbaik SC berhasil ditentukan pada lokasi dengan SCR terendah • Hasil simulasi merekomendasikan pemasangan SC berkapasitas 170 MVA • SCR berhasil ditingkatkan 	[19]

2.5 Hibridisasi Metode PSO dan Algoritma PS

2.5.1 Pengenalan PSO

Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) pertama kali dikembangkan oleh Jamie Kennedy dan Russell Eberhart pada tahun 1995 [47]. 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 [48] serta menurut pendapat para peneliti PSO telah menunjukkan hasil yang sukses ketika diterapkan pada optimasi sistem tenaga [22], [25], [26], [49].

Gambar 2.11 menunjukkan diagram alir dasar dari sebuah algoritma PSO.

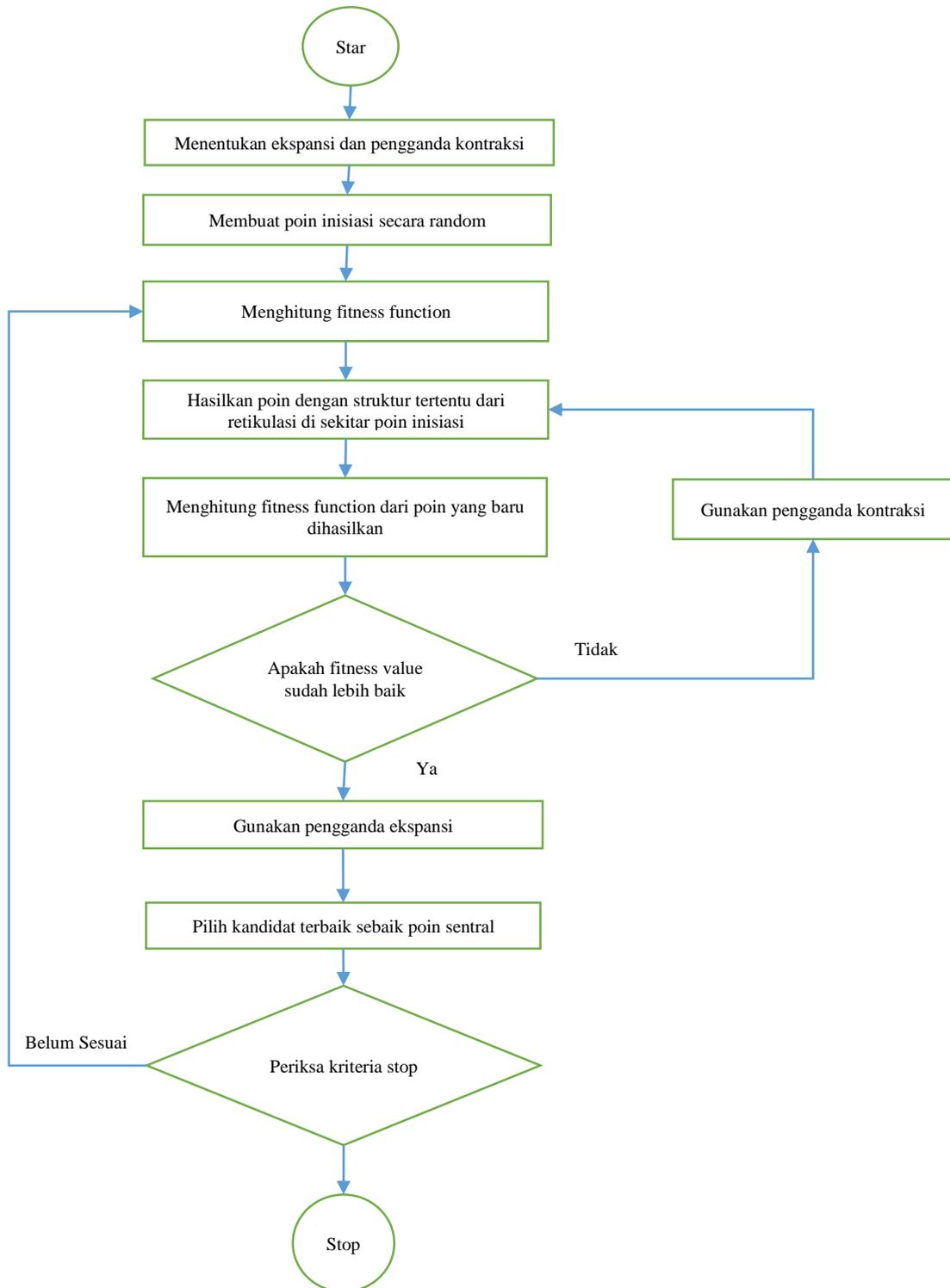


Gambar 2.11 Diagram Alir Dasar dari PSO

2.5.2 Pengenalan 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

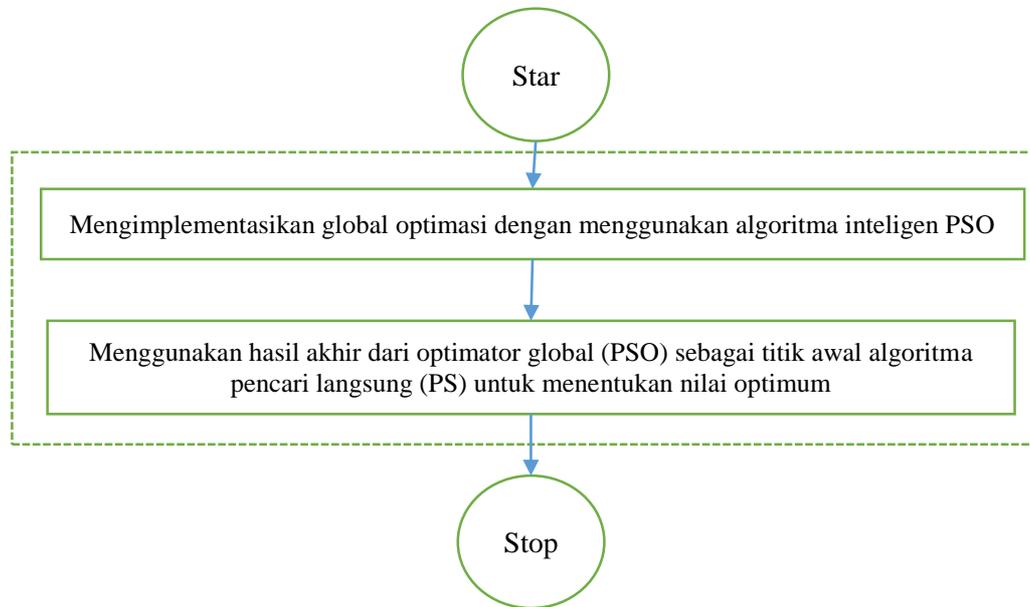
satu titik optimum lokal. Secara sederhana cara kerja algoritma PS dapat dilihat pada Gambar berikut:



Gambar 2 12Diagram Alir Algoritma PS

2.5.3 Prosedur metode hibridisasi PPSO dalam Penyetelan SC

Gambar 2.12 menunjukkan diagram alir sederhana dari rencana hibridisasi PSO dan algoritma PS menjadi algoritma *Particle Swarm Pattern Search Optimization* (PPSO).



Gambar 2.13 Gambar Diagram Alir PPSO

Untuk diketahui bahwa di dalam penelitian kuantitatif ini terdapat dua jenis variabel terkait penyetelan SC yaitu variabel bebas (variabel kontrol) dan variabel terikat. Terminal tegangan generator, tap changer transformator dan output daya reaktif SC adalah variabel kontrol yang dapat diubah sesuai dengan batasannya masing-masing. Ketiga variabel inilah yang akan menjadi *tools* PSO untuk mengoptimasi “target function”. Magnitud dan sudut tegangan dari daya aktif dan daya reaktif adalah variabel terikatnya, sehingga rugi-rugi daya aktif dan nilai-nilai yang terkait dapat dihitung dengan menggunakan rumus (3),

$$F_{loss} = \sum_{k=1}^{N_L} g_k [V_{1,k}^2 + V_{2,k}^2 - 2V_{1,k}V_{2,k}\cos(\theta_{1,k} - \theta_{2,k})] \quad (8)$$

di mana g_k adalah nilai konduktansi jaringan transmisi antara kedua titik ujung bus, $V_{1,k}$ dan $V_{2,k}$ adalah magnitud tegangan antara kedua titik ujung bus, dan $\theta_{1,k}$ dan $\theta_{2,k}$ adalah sudut tegangan masing-masing antara kedua titik ujung bus.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian yang telah dipaparkan, penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahap, yaitu:

- a. Studi literatur, mengumpulkan bahan dan teori dasar yang berkaitan dengan penelitian.
- b. Pemodelan sistem, melakukan pemodelan sistem transmisi untuk keperluan melakukan analisis aliran daya, pemodelan ini akan dilakukan di aplikasi DIGSILENT.
- c. Penyetelan SC, melakukan coding algoritma optimasi untuk menentukan penyetelan terbaik dari SC di dalam jaringan transmisi Sulbagsel.
- d. Simulasi stabilitas jaringan transmisi, untuk memastikan kinerja sistem transmisi telah bekerja sesuai dengan teori.
- e. Analisis data, melakukan perbandingan antara hasil simulasi dan data awal sebelum penerapan SC dengan skenario pengujian yang telah ditentukan. Apabila telah sesuai dengan yang ditentukan, maka dilanjutkan dengan penarikan kesimpulan.

3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

3.2.1 Waktu

Jadwal pelaksanaan penelitian yang ditampilkan pada Tabel 3.1 dimulai dari penyusunan usulan penelitian sampai pembuatan dokumentasi dan laporan penelitian yaitu pada bulan Agustus 2021 sampai bulan Juni 2022. Karena seluruh proses penelitian sudah dijabarkan secara detail maka seharusnya langkah-langkah penelitian ini bisa diselesaikan sesuai dengan target waktu yang telah direncanakan.

Tabel 3.1 Tabel Jadwal Pelaksanaan Penelitian

NO	URAIAN KEGIATAN	WAKTU PELAKSANAAN
1	Studi literatur	Juli-Agustus 2021
2	Pembuatan proposal	September 2021
2	Pemodelan Jaringan Transmisi, pembuatan listring program PPSO	November 2021
3	Penyetelan SC	Januari 2022
4	Simulasi Jaringan Transmisi	Maret 2022
5	Penulisan karya ilmiah, penulisan tesis	Juni 2022

3.2.2 Lokasi

Desain dan perancangan sampai pengujian sistem akan dilakukan di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Kampus Universitas Hasanuddin, Gowa.

3.3 Jenis Penelitian

Penelitian ini mengadopsi jenis penelitian kuantitatif eksperimen yang hasilnya dapat diaplikasikan di lapangan, sehingga dari ruang lingkup masalah dapat dilakukan metode studi pustaka, pengumpulan data, serta pengembangan sistem dengan menggunakan berbagai *tools*. Di dalam penelitian ini, jaringan transmisi Sulbagsel akan dilengkapi dengan SC, yang penyetelannya akan ditentukan dengan metode hybrid PPSO di aplikasi MATLAB dan hasilnya akan disimulasikan dan disimpulkan berdasarkan data output dari aplikasi DIgSILENT Power Factory.

3.4 Sumber Data

Ada dua jenis pengumpulan data pada penelitian ini, yaitu:

1. Data primer: data ini diperoleh dari hasil studi literatur yang dilakukan selama penelitian. Data primer ini merupakan hasil penelitian-penelitian terdahulu yang masih perlu disempurnakan peningkatan fungsi dan keandalannya. Data ini berupa rekomendasi skema konversi generator menjadi SC dan dampak dari konversi tersebut ke sistem tenaga.
2. Data sekunder: data ini diambil dari lembaga atau perusahaan yang berkaitan dengan penelitian ini, yaitu dari PT. PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Sulawesi. Berdasarkan output yang diinginkan dari penelitian ini maka data sekunder yang akan menjadi inputan berupa data kondisi eksisting sistem tenaga Sulbagsel yang rinciannya dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Tabel Kebutuhan Data Sekunder Penelitian

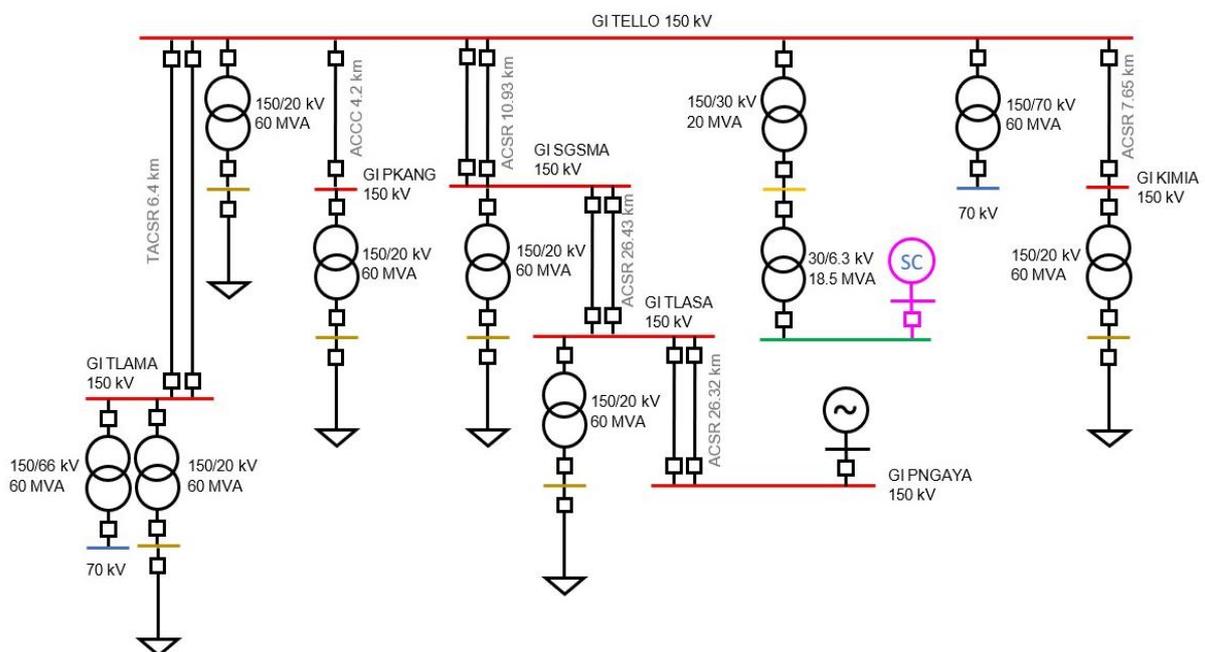
Input	Kondisi Sistem Tenaga	Konfigurasi sistem (data koneksi)
		Nilai impedansi saluran transmisi
		Impedansi Transformator
	Kondisi Operasi	Kondisi Supply (level output generator, tegangan terminal)
		Kondisi permintaan (daya aktif dan reaktif beban)
		Fasilitas daya reaktif
		Nilai Tap Trafo
Output	Aliran daya	Saluran transmisi dan peralatan seri lainnya
	Tegangan	Sudut dan fasa tegangan tiap-tiap bus
	Rugi-rugi transmisi	Bagian efektif dan bagian tidak efektif

3.5 Progres Penelitian

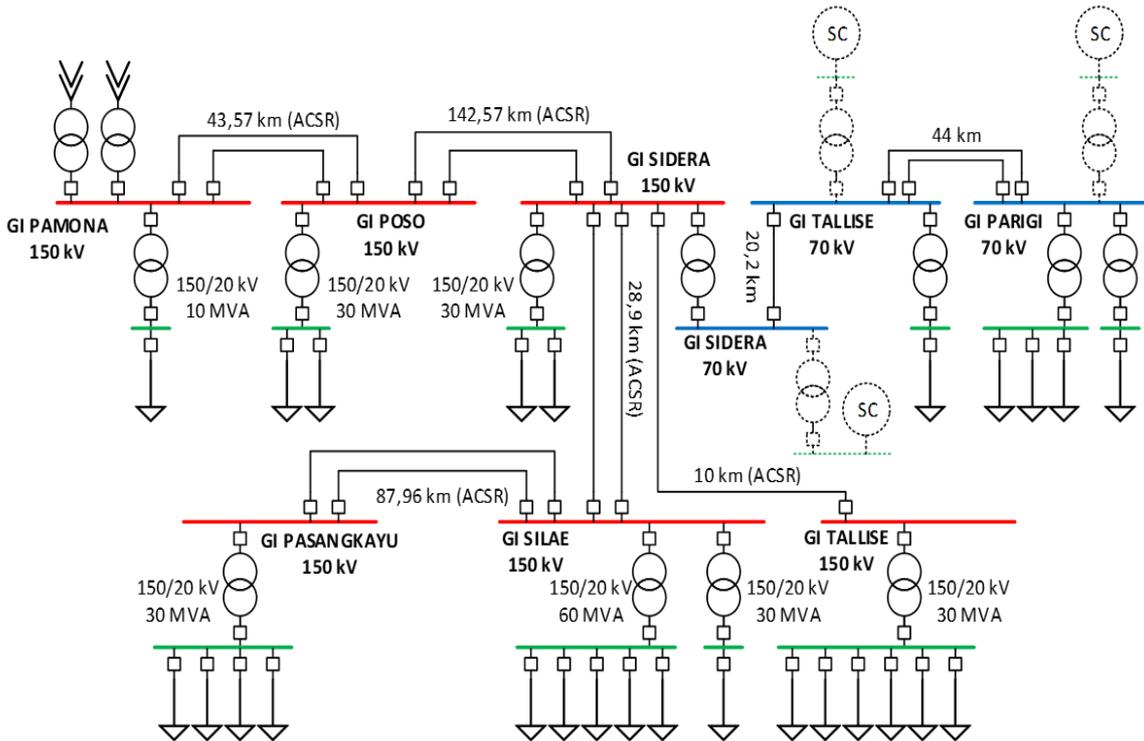
3.5.1 Pemodelan Jaringan Transmisi

Pada tahap ini, dengan memanfaatkan software DIGSILENT, dilakukan pemodelan jaringan transmisi sesuai dengan data sekunder yang sudah diperoleh dari PT. PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Sulawesi, yang juga akan digunakan sebagai sumber data untuk melakukan penyetelan SC dengan metode optimasi hybrid PSO dan PSA di aplikasi MATLAB. Untuk memudahkan penelitian, perancangan sistem jaringan transmisi dilakukan sesuai dengan pembagian sub-sistem transmisi di Sulbagsel. Adapun pembagian tersebut adalah sebagai berikut: sub-sistem Sulselbar (Gambar 3.1), sub-sistem Sulteng (Gambar 3.2), dan pada sub-sistem Sultra (Gambar 3.3).

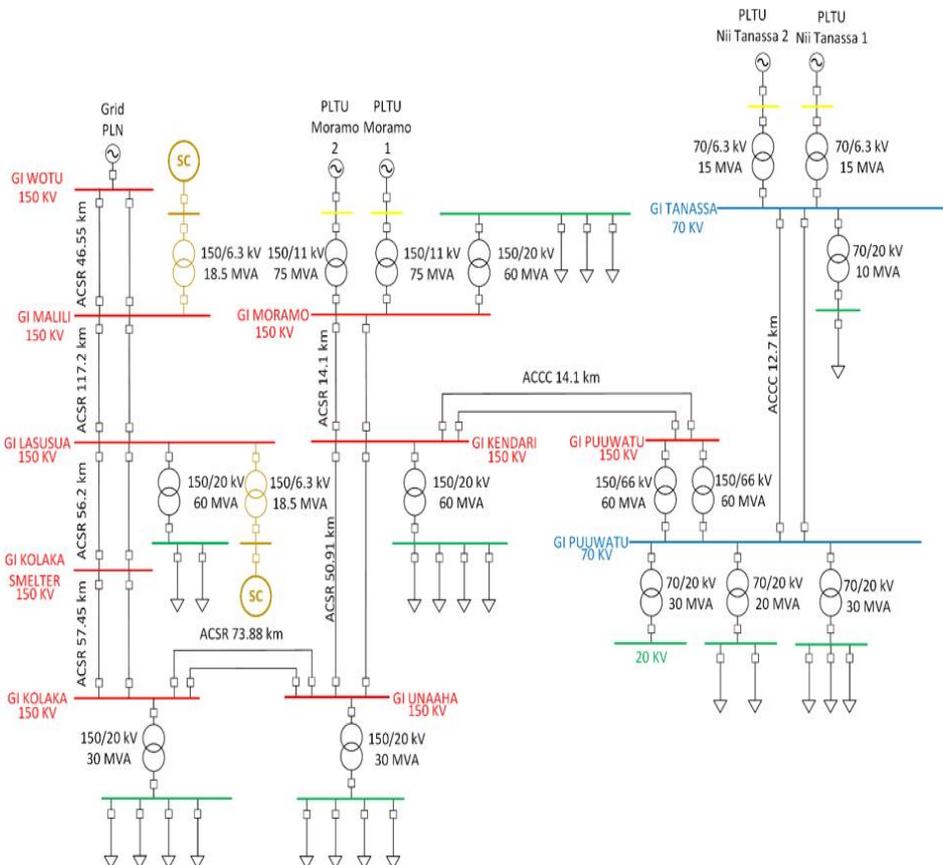
Gambar 3.1 Rancangan Penempatan SC di sub-sistem Sulselbar



Gambar 3 2 Rancangan Penempatan SC di sub-sistem Sulteng



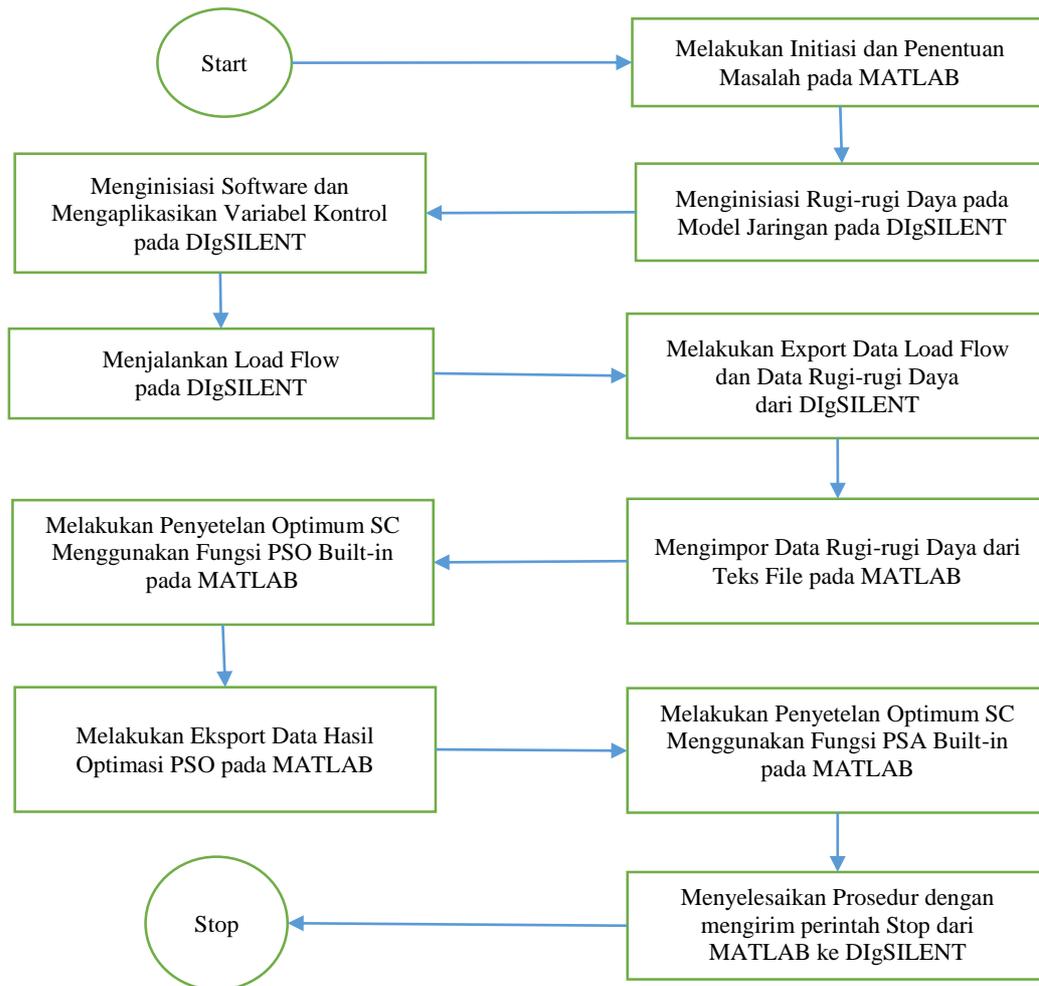
Gambar 3 3 Rancangan Penempatan SC di sub-sistem Sultra



3.5.2 Penyetelan Kondensator Sinkron

Pada tahap ini akan dilakukan penyetelan SC sesuai dengan flowchat pada gambar 3.4. Tujuan dari penyetelan ini adalah untuk mencari titik terlemah dari masing-masing sub-sistem yang akan menjadi titik penempatan SC di dalam jaringan transmisi Sulbagsel.

Gambar 3 4 Flowchart Metode Optimasi Penyetelan SC



3.5.2 Pengujian Jaringan Transmisi

Pada tahap ini dilakukan perhitungan aliran daya dan proses lainnya yang terkait dengan jaringan transmisi di aplikasi DIgSILENT. Simulasi ini berfungsi untuk melihat output dari jaringan transmisi dalam berbagai kondisi setelah SC diimplementasikan ke dalam rancangan model sistem transmisi Sulawesi Bagian Selatan. Dan karena penelitian ini diarahkan menjadi penelitian eksperimental yang aplikatif maka simulasi akan dilakukan tanpa mengubah supply daya setiap pembangkit dan sistem proteksi eksisting tetap akan dipertahankan. Adapun tiga jenis kondisi yang akan disimulasi adalah sebagai berikut:

1. Kondisi Normal, menguji kelayakan SC pada kondisi operasi normal/tanpa gangguan. Hasil pada kondisi ini dijadikan basis untuk studi kelayakan ekonomi.
2. Kondisi Kontingensi, menguji kelayakan SC pada kondisi gangguan/kontingensi, yang terdiri dari kontingensi pelepasan pembangkit dan kontingensi pelepasan jaringan transmisi.
3. Kondisi Hubung Singkat, menguji manfaat synchronous condenser saat terjadi hubung singkat, terutama dalam perbaikan power quality.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. O. Igbinovia, G. Fandi, Z. Muller, and J. Tlustý, "Reputation of the Synchronous Condenser Technology in Modern Power Grid," *2018 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2018 - Proc.*, no. 201805280000151, pp. 2108–2115, 2019.
- [2] PT. PLN (Persero), "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero) 2019-2028," pp. 1–735, 2019.
- [3] PT. PLN (Persero), "Transformasi PLN : Dispatch Optimization Transformasi PLN : Dispatch Optimization," *CoC Nas.*, no. 2021-July, pp. 1–4, 2021.
- [4] A. Glaninger-Katschnig, "Contribution of synchronous condensers for the energy transition," *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 130, no. 1, pp. 28–32, 2013.
- [5] A. S. Surya, M. Partahi Marbun, M. Marwah, K. G. H. Mangunkusumo, B. B. S. D. A. Harsono, and H. B. Tambunan, "Study of Synchronous Condenser Impact in Jawa-Madura-Bali System to Provide Ancillary Services," *ICITEE 2020 - Proc. 12th Int. Conf. Inf. Technol. Electr. Eng.*, pp. 234–238, 2020.
- [6] M. S. Nielsen, "Allocation of Synchronous Condensers for Low Inertia Systems," no. July, p. 119, 2015.
- [7] F. O. Igbinovia, G. Fandi, J. Švec, Z. Müller, and J. Tlustý, "Comparative Review of Reactive Power Compensation Technologies," 2015.
- [8] M. Nedd, C. Booth, and K. Bell, "Potential solutions to the challenges of low inertia power systems with a case study concerning synchronous condensers," *2017 52nd Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–6, 2017.
- [9] H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen, and P. H. Jensen, "Frequency stability improvement of low inertia systems using synchronous condensers," *2016 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. SmartGridComm 2016*, pp. 650–655, 2016.
- [10] L. Richard, Nahid-Al-Masood, T. K. Saha, W. Tushar, and H. Gu, "Optimal Allocation of Synchronous Condensers in Wind Dominated Power Grids," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45400–45410, 2020.
- [11] X. Shi, H. Huang, T. Liu, W. Mu, and J. Zhao, "Optimized idling grid-connection strategy for synchronous condenser," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 28, no. 5, pp. 2895–2909, 2020.
- [12] Y. Singh, P. Chopra, and R. Singh, "Optimal Placement of Synchronous Condensers for Power Quality Improvement in Transmission System by Using Etap Power Station," *IOSR J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 11, no. 04, pp. 63–73, 2016.
- [13] A. Ulbig, T. S. Borsche, and G. Andersson, "Impact of low rotational inertia on power system stability and operation," in *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2014, vol. 19, no. 3, pp. 7290–7297.
- [14] J. M. Fogarty, R. A. Nold, and K. Learning, "Application of Synchronous Condensers in the Modern Power Grid."
- [15] Y. Hirase, K. Abe, K. Sugimoto, K. Sakimoto, H. Bevrani, and T. Ise, "A novel control approach for virtual synchronous generators to suppress frequency and voltage fluctuations in microgrids," *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 699–710, 2018.
- [16] J. Jia, G. Yang, A. H. Nielsen, E. Muljadi, P. Weinreich-Jensen, and V. Gevorgian, "Synchronous Condenser Allocation for Improving System Short Circuit Ratio," *2018 5th Int. Conf. Electr. Power Energy Convers. Syst. EPECS 2018*, vol. 0097150229, pp. 1–5, 2018.
- [17] M. K. T. Khaing, "Power Factor Correction with Synchronous Condenser for Power Quality Improvement in Industrial Load," *Int. J. Sci. Eng. Appl.*, vol. 3, no. 3, pp. 39–43, 2014.
- [18] E. Marazzi, "Short circuit power planning for renewable energy systems via synchronous condensers," no. October, p. 134, 2015.
- [19] E. Marrazi, G. Yang, and P. Weinreich-Jensen, "Allocation of synchronous condensers for restoration of system short-circuit power," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 17–26, 2018.
- [20] Kementrian ESDM, "Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code)," *Menteri Energi dan Sumber Daya Miner. Republik Indones.*, no. 3, pp. 417–607, 2020.
- [21] N. M. Tabatabaei, A. J. Aghbolaghi, N. S. Boushehri, and F. H. Parast, *Reactive power optimization using MATLAB and DIGSILENT*. 2017.
- [22] Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighzadeh, and M. Sadighi, "A particle swarm optimization for siting and sizing of distributed generation in distribution network to improve voltage profile and reduce THD and losses," *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, 2008.

- [23] W. Zhang and Y. Liu, "Reactive power optimization based on PSO in a practical power system," *2004 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol. 1, no. 2, pp. 239–243, 2004.
- [24] S. Kansal, V. Kumar, and B. Tyagi, "Optimal placement of different type of DG sources in distribution networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, no. 1, pp. 752–760, 2013.
- [25] H. Bai and B. Zhao, "A survey on application of swarm intelligence computation to electric power system," *Proc. World Congr. Intell. Control Autom.*, vol. 2, no. 60421002, pp. 7587–7591, 2006.
- [26] K. Y. Lee and J. B. Park, "Application of particle swarm optimization to economic dispatch problem: Advantages and disadvantages," *2006 IEEE PES Power Syst. Conf. Expo. PSCE 2006 - Proc.*, pp. 188–192, 2006.
- [27] F. Min, Y. Zhaoyang, Y. Hai, and C. Cancan, "Analysis of the Influence of Installing Synchronous Condenser in HVDC Inverter Station to Receiving-End Grid," *2019 22nd Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2019*, pp. 0–4, 2019.
- [28] H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen, and P. H. Jensen, "Combination of synchronous condenser and synthetic inertia for frequency stability enhancement in low-inertia systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 997–1005, 2019.
- [29] A. Stiger, R. A. Rivas, and M. Halonen, "Synchronous Condensers Contribution to Inertia and Short Circuit Current in Cooperation with STATCOM," *2019 IEEE PES GTD Gd. Int. Conf. Expo. Asia, GTD Asia 2019*, pp. 955–959, 2019.
- [30] R. Ri *et al.*, "Study on Coordinated Control Strategy of Reactive Power Compensation Device in DC Converter Station with New-generation Synchronous Condensers," no. 201805280000383, pp. 2–7, 2018.
- [31] F. Xiao, Y. Zhou, J. Zhang, K. Zhang, D. Yang, and D. Shao, "Research on the Over-voltage Suppression Strategy for HVDC with New-generation Synchronous Condensers," *2019 3rd IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. Ubiquitous Energy Netw. Connect. Everything, EI2 2019*, pp. 2708–2713, 2019.
- [32] A. Aamir, L. Qiao, C. Guo, A. U. Rehman, and Z. Yang, "Impact of synchronous condenser on the dynamic behavior of LCC based UHVDC system hierarchically connected to AC system," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 5, no. 2, pp. 190–198, 2019.
- [33] T. Cui, Z. Hu, D. Chen, D. Wang, M. Xiang, and H. Guo, "Optimal Allocation of Synchronous Condensers in an Actual Weak Received Power Grid with an UHVDC System," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2020-Sept, pp. 1–5, 2020.
- [34] T. Cui, Y. Shen, Z. Hu, J. Song, H. Guo, and X. Wang, "Voltage Regulation of Synchronous Condensers and Switching Capacitors in Power Grids with a UHV DC/AC System," *Proc. - 2018 3rd Int. Conf. Smart City Syst. Eng. ICSCSE 2018*, no. 1, pp. 552–556, 2018.
- [35] T. Cui, D. Wang, Y. Zhou, J. Song, and Z. Hu, "Voltage stability of received power grids with UHVDC systems under different initial states of synchronous condensers," *Proc. - 2020 Int. Conf. Wirel. Commun. Smart Grid, ICWCSG 2020*, pp. 195–199, 2020.
- [36] H. Li, H. Wang, H. Lu, and C. Wang, "Design of LQR Excitation Controller of Synchronous Condenser in HVDC System," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1884, no. 1, 2021.
- [37] P. T. Manditereza, "Rocof Enhancement Using Synchronous Condensers in Systems Integrated with Renewable Energy Sources," *2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica, PowerAfrica 2020*, 2020.
- [38] Nahid-Al-Masood, R. Yan, T. K. Saha, and N. Modi, "Frequency response and its enhancement using synchronous condensers in presence of high wind penetration," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2015-Sept, 2015.
- [39] K. Ri *et al.*, "Research on Transient Reactive Power Characteristics of New-generation Large Synchronous Condensers and UHVDC Converter Station," no. 201805280000354, pp. 5–10, 2018.
- [40] J. Jia, G. Yang, A. H. Nielsen, and P. Rønne-Hansen, "Impact of VSC Control Strategies and Incorporation of Synchronous Condensers on Distance Protection Under Unbalanced Faults," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, pp. 1108–1118, 2019.
- [41] Y. Sun, Z. Cao, Q. Wang, and S. Wang, "Improving Grid-Connection Reliability and Safety of Synchronous Condensers with Start-Up Process Optimization," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153742–153755, 2020.
- [42] N. Al Masood, R. Yan, T. K. Saha, and S. Bartlett, "Post-retirement utilisation of synchronous generators to enhance security performances in a wind dominated power system," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 13, pp. 3314–3321, 2016.
- [43] J. Y. Jackson, "Interpretation and Use of Generator Reactive Capability Diagrams," *IEEE Trans. Ind. Gen. Appl.*, vol. IGA-7, no. 6, pp. 729–732, 1971.
- [44] R. C. Co., "AC Generator/Exciter/P.M. Generator," in *Instructions for Intallation, Operation and*

- Maintenance for Geared Turbine AC Generator*, 1962, pp. 1–50.
- [45] M. Pertl, T. Weckesser, M. Rezkalla, and M. Marinelli, “Transient stability improvement: a review and comparison of conventional and renewable-based techniques for preventive and emergency control,” *Electr. Eng.*, vol. 100, no. 3, pp. 1701–1718, 2018.
- [46] PT. PLN (Persero), “Evaluasi Operasi Tahunan (EOT) 2020,” *Opsis UIKL Sulawesi*, pp. 1–247, 2021.
- [47] M. O. Okwu and L. K. Tartibu, “Particle Swarm Optimization,” *Stud. Comput. Intell.*, vol. 927, pp. 5–13, 2021.
- [48] J. B. Park, K. S. Lee, J. R. Shin, and K. Y. Lee, “A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost functions,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 34–42, 2005.
- [49] X. M. Yu, X. Y. Xiong, and Y. W. Wu, “A PSO-based approach to optimal capacitor placement with harmonic distortion consideration,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 71, no. 1, pp. 27–33, 2004.