

**MODEL HEFFRON-PHILLIPS TERINTEGRASI DENGAN *STATIC VAR*
COMPENSATOR UNTUK MEREDAM OSILASI SISTEM TENAGA**

(Skripsi)

Oleh

AFDHAL ANUGRAH

2115031089



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

MODEL HEFFRON-PHILLIPS TERINTEGRASI DENGAN *STATIC VAR COMPENSATOR* UNTUK MEREDAM OSILASI SISTEM TENAGA

Oleh

AFDHAL ANUGRAH

Permasalahan stabilitas sinyal kecil (*small-signal stability*) menjadi perhatian utama dalam operasi sistem tenaga listrik modern karena dapat memicu munculnya osilasi daya frekuensi rendah yang tidak teredam. Penelitian ini menerapkan *Advanced Heffron-Phillips Model* (AHPM) yang dapat memberikan representasi dinamika sistem secara lebih akurat dengan mempertimbangkan dinamika lilitan peredam pada sumbu-d dan sumbu-q. Skema stabilisasi dilakukan melalui integrasi *Static VAR Compensator* (SVC) dan *Power System Stabilizer* (PSS), dengan menggunakan algoritma genetika sebagai teknik optimasi untuk menentukan parameter kontroler yang paling efektif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koordinasi SVC dan PSS pada model AHPM secara signifikan meningkatkan stabilitas sistem. Hal tersebut tercermin dari pergeseran eigenvalue dominan ke sisi kiri bidang-s ($\lambda = -1.185 + 0.3571i$), dengan pencapaian rasio redaman (ζ) yang sangat optimal mencapai 0.9575. Selain itu, perbaikan performa sistem ditunjukkan oleh percepatan waktu tunak (*settling time*) pada variabel sudut rotor yang mencapai 3.1290 detik. Koordinasi SVC dan PSS merupakan solusi optimal melalui integrasi peran yang saling melengkapi, di mana SVC menjaga stabilitas tegangan untuk memperkuat torsi sinkronisasi sementara PSS secara khusus menyediakan torsi redaman tambahan guna meredam osilasi sudut rotor.

Kata kunci: *Advance Heffron-Phillips Model* (AHPM), Stabilitas Sinyal Kecil, *Static VAR Compensator* (SVC), *Power System Stabilizer* (PSS), *Settling Time*

ABSTRACT

HEFFRON-PHILLIPS MODEL INTEGRATED WITH STATIC VAR COMPENSATOR FOR DAMPING POWER SYSTEM OSCILLATIONS

By

AFDHAL ANUGRAH

Small-signal stability issues have become a major concern in modern power system operations as they can trigger undamped Low-Frequency Oscillations (LFO). This research implements the Advanced Heffron-Phillips Model (AHPM), which provides a more accurate representation of system dynamics by accounting for the d-axis and q-axis damper winding dynamics. The stabilization scheme is carried out through the integration of a Static VAR Compensator (SVC) and a Power System Stabilizer (PSS), where the most responsive controller parameters are determined using the Genetic Algorithm (GA) optimization technique. Research results show that the coordination of SVC and PSS on the AHPM significantly enhances system stability. This is reflected in the shift of the dominant eigenvalue to the left-half of the s-plane ($\lambda = -1.185 + 0.3571i$), achieving a highly optimal damping ratio (ζ) of 0.9575. Furthermore, the improvement in system performance is indicated by the acceleration of the settling time for the rotor angle variable, which reaches 3.1290 seconds. The coordination of SVC and PSS is an optimal solution through a complementary integration of roles, where the SVC maintains voltage stability to strengthen the synchronizing torque, while the PSS specifically provides additional damping torque to suppress rotor angle oscillations.

Keywords: Advance Heffron-Phillips Model (AHPM), Small-Signal Stability, Static VAR Compensator (SVC), Power System Stabilizer (PSS), Settling Time

**MODEL HEFFRON-PHILLIPS TERINTEGRASI DENGAN *STATIC VAR*
COMPENSATOR UNTUK MEREDAM OSILASI SISTEM TENAGA**

Oleh

AFDHAL ANUGRAH

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul Skripsi

: MODEL HEFFRON-PHILLIPS TERINTEGRASI
DENGAN *STATIC VAR COMPENSATOR* UNTUK
MEREDAM OSILASI SISTEM TENAGA

Nama Mahasiswa

: AFDHAL ANUGRAH

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115031089

Jurusan

: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Zulmiftah Huda, M.Eng.
NIP 198806242019031015

Ubaidah, M.T.
NIP 199511222023212036

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Herlinawati, S.T., M.T.
NIP 19710314 199903 2 001

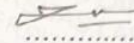
Ketua Program Studi Teknik Elektro

Sunradi, S.T., M.T.
NIP 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Zulmiftah Huda, M.Eng.**



Sekretaris : **Ubaidah, M.T.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Ir Khairudin, S.T., M.Sc.**



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 19 Januari 2026

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Februari 2026



Afdhal Anugrah
NPM 2115031089

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Prabumulih, Sumatera Selatan pada tanggal 04 September 2003, sebagai anak keempat dari empat bersaudara, dari bapak Harnadi Panca Putra dan Ibu Armawati.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Sekolah Dasar Negeri (SDN) 6 Prabumulih, pada tahun 2009 hingga tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 8 Prabumulih, pada tahun 2015 hingga tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 2 Prabumulih pada tahun 2018 hingga tahun 2021.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2021 melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah Praktikum Teknik Tegangan Tinggi tahun 2024 dan tergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dari tahun 2024. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) yang pada tahun 2022 diamanahkan sebagai anggota Divisi Kewirausahaan Departemen Sosial dan Kewirausahaan dan pada tahun 2023 diamanahkan sebagai anggota Divisi Kerohanian Departemen Pendidikan Dan Pengembangan Diri. Penulis Melakukan kerja praktik di PT PLN (Persero) UIP3BS Unit Pelayanan Transmisi (UPT) Tanjung Karang, Bandar Lampung.

**“Ku Persembahkan dan ku
dedikasikan skripsi ini untuk Kedua
Orang tuaku, Ayahanda Harnadi
Panca Putra dan Ibunda Armawati,
yang selalu memberikan dukungan,
doa dan semua hal terbaik demi
kelancaran dan kesuksesan anaknya”**

MOTTO

“History will be kind to me for I intend to write it”
(Winston Churchill)

“Dubito ergo cogito, cogito ergo sum”
(René Descartes)

**“You forget a thousand things every day, make sure this isn’t one
of them”**
(Michael De Santa)

“Fortis Fortuna Adiuvat”
(John Wick)

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT, atas limpahan nikmat dan karunia-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam senantiasa dicurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan yang mampu membuka sesuatu yang terkunci, penutup dari semua yang terdahulu, penolong kebenaran dengan jalan yang benar, dan petunjuk kepada jalan-Mu yang lurus. Tugas akhir dengan judul “Model Heffron-Phillips Terintegrasi *Dengan Static VAR Compensator* Untuk Meredam Osilasi Sistem Tenaga” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Zulmfitah Huda, M.Eng., selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan motivasi dan pandangan kehidupan, mengarahkan dan membimbing dengan tulus dan penuh kesabaran.
5. Ibu Ubaidah, M.T., selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan saran, bimbingan dan arahan dengan baik dan ramah

6. Bapak Dr. Eng. Ir Khairudin, S.T., M.Sc., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, masukan, kritik dan arahan.
7. Bapak Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus bagi penulis selama perkuliahan.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
9. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
10. Kak Dika, Kak Billy, Kak Payet, terimakasih karena selalu memberikan dukungan dan doa kepada penulis.
11. Fardan, Hussein, Jerry, Bagus, Farda, Jojo, Dafa, Radja, Rico yang telah menjadi keluarga penulis selama di Bandar Lampung.
12. Dinda, Faqih, dan Erika terimakasih selalu menjadi support system dan telah memberikan dorongan, bantuan, dan selalu menemani penulis dalam mengerjakan skripsi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
13. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi: Pak Sugiarto atas kerjasamanya selama menjadi asisten laboratorium; Kak Akbar, Kak Alberth, Rijal, Mahendra, Rizfeb, Yozi, Serly, Rika dan Fikri sebagai asisten laboratorium, dan tidak lupa adik-adik 2022, Priska, Bilqis, Razzan, Farhan, Bramantio, Elvin, Putu, dan Abdul.
14. Keluarga besar Angkatan EXCALTO 2021, yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai sosial, dan bantuan dalam berbagai hal.

15. Keluarga besar Himatro Unila, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai organisasi bagi penulis.
16. Semua pihak yang terlibat dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi ini penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.

Penulis Menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan skripsi ini yang akan datang. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan Masyarakat pada umumnya.

Bandar Lampung, 10 Februari 2026

Afdhal Anugrah

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Rumusan Masalah	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Hipotesis.....	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.2.1 Stabilitas Sudut Rotor	8
2.3 Model Heffron-Phillips	12
2.3.1 Model Heffron-Phillips Klasik (OHPM)	12
2.3.2 Model Heffron-Phillips Lanjutan (AHPM).....	15
2.4 <i>Static VAR Compensator</i> (SVC).....	18
2.4.1 Prinsip Kerja dan Fungsi SVC	18
2.4.2 Struktur SVC dan jenis SVC.....	19
2.4.3 Strategi Kontrol SVC	21
2.4.4 Pemodelan Matematis SVC	21
2.5 <i>Power System Stabilizer</i> (PSS).....	23

2.5.1 Prinsip Kerja PSS	23
2.5.2 Struktur dan Jenis PSS	23
2.5.3 Pemodelan Matematis PSS	24
2.6 Algoritma Genetika	25
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 Waktu dan Tempat.....	27
3.2 Alat dan Bahan	28
3.3 Tahapan Penelitian	28
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	30
3.5 Pemodelan Sistem Yang Diuji.....	31
3.5.1 Pemodelan Heffron-Phillips Lanjutan (AHPM)	31
3.5.2 Matriks State-Space Heffron-Phillips Lanjutan	32
3.5.3 Pemodelan Heffron-Phillips Lanjutan Dengan SVC	34
3.5.4 Matriks State-Space Heffron-Phillips Lanjutan dengan SVC	37
3.5.5 Pemodelan Heffron-Phillips Lanjutan Dengan SVC dan PSS	40
3.5.6 Matriks State-space Heffron-Phillips Lanjutan dengan SVC dan PSS	40
3.5.7 Parameter Model Heffron-Phillips Lanjutan.....	42
3.6 Formulasi Fungsi Objektif	43
IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN	44
4.1 Perhitungan Parameter Sistem dan Optimasi Kontroler	44
4.1.1 Perhitungan Konstanta Model Heffron-Phillips.....	44
4.1.2 Hasil Optimasi Parameter Kontroler Menggunakan Algoritma Genetika	45
4.2 Perbandingan Model Heffron-Phillips Lama dengan Model Heffron-Phillips Lanjutan.....	45
4.2.1 Analisis Perbandingan Respon Waktu Sistem.....	46
4.2.2 Analisis perbandingan Eigenvalue dan Damping Ratio.....	47
4.3 Analisis Respon Waktu Sistem dengan Berbagai Kondisi Kontrol.....	49
4.3.1 Respon Sudut Rotor ($\Delta\delta$)	49
4.3.2 Respon Kecepatan Rotor ($\Delta\omega$).....	51
4.3.3 Respon Daya Akselerasi ($\Delta T\alpha$).....	53
4.3.4 Respon Tegangan Terminal (ΔV_t)	55
4.3.5 Respon Tegangan Medan (ΔE_{fd}).....	57

4.3.6 Respon Tegangan Internal Sumbu-q ($\Delta E'q$).....	59
4.4 Eigenvalue dan Damping Ratio dari sistem.....	61
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran.....	64
DAFTAR PUSTAKA.....	65

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Karakteristik Respon Gangguan Kecil	10
Gambar 2.2 Blok Diagram Model Heffron-Phillips Klasik (OHPM)	14
Gambar 2.3 Blok Diagram Heffron-Phillips Lanjutan (AHPM)	18
Gambar 2.4 Diagram Satu Garis SVC dan Blok Diagram Kontrolnya	20
Gambar 2.5 Blok Diagram SVC	22
Gambar 2.6 Desain Model PSS Konvensional	24
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 3.2 Model Heffron-Phillips tanpa SVC dan PSS	32
Gambar 3.3 Model Heffron-Phillips lanjutan dengan SVC	36
Gambar 3.4 Model Heffron-Phillips Lanjutan dengan SVC dan PSS	40
Gambar 4.1 Perbandingan Kecepatan Rotor ($\Delta\omega$) pada OHPM dan AHPM	46
Gambar 4.2 Respon Sudut Rotor ($\Delta\delta$)	49
Gambar 4.3 Respon Kecepatan rotor ($\Delta\omega$)	51
Gambar 4.4 Respon Daya Akselerasi ($\Delta T\alpha$)	53
Gambar 4.5 Respon Tegangan Terminal (ΔV_t)	55
Gambar 4.6 Respon Tegangan Medan (ΔE_{fd})	57
Gambar 4.7 Respon Tegangan Internal Sumbu-q ($\Delta E'_q$)	59

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Jadwal Penelitian	27
Tabel 3.5.7 Parameter Model Heffron-Phillips Lanjutan	42
Tabel 4.1.1 Nilai Konstanta Heffron-Phillips	44
Tabel 4.1.2 Hasil Optimasi Kontroler	45
Tabel 4.2.2 Eigenvalue dan Damping Ratio	47
Tabel 4.3.1 Step Info Pada Respon Sudut Rotor ($\Delta\delta$)	50
Tabel 4.3.2 Step Info Pada respons kecepatan rotor ($\Delta\omega$)	52
Tabel 4.3.3 Step Info Pada Respon Daya Akselerasi ($\Delta T\alpha$)	54
Tabel 4.3.4 Step Info Pada Respon Tegangan Terminal (ΔV_t)	56
Tabel 4.3.5 Step Info Pada Respon Medan (ΔE_{fd})	58
Tabel 4.3.6 Step Info Pada Respon Tegangan Terminal (ΔV_t)	60
Tabel 4.4 Eigenvalue dan Damping Ratio dari sistem	61

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem tenaga listrik modern adalah jaringan yang semakin kompleks, nonlinier, dan saling terhubung, terdiri dari pembangkit listrik, transformator, dan saluran transmisi [1]. Peningkatan permintaan daya dalam beberapa tahun terakhir, diiringi oleh keterbatasan perluasan pembangkitan dan transmisi akibat sumber daya yang terbatas dan batasan lingkungan, telah menyebabkan beberapa saluran transmisi berbeban berat. Akibatnya, stabilitas sistem menjadi faktor pembatas transfer daya. Operasi sistem yang mendekati batas stabilitas, ditambah dengan pertumbuhan interkoneksi, telah menciptakan jenis masalah stabilitas baru. Oleh karena itu, analisis yang akurat terhadap sistem tenaga sangat penting untuk memahami dan memprediksi perilakunya, terutama dalam penilaian keamanan sistem. [1]

Salah satu masalah utama yang muncul dalam sistem tenaga modern adalah osilasi daya frekuensi rendah (LFO), yang biasanya berada dalam rentang frekuensi 0,1 hingga 2 Hz [2]. Osilasi ini, yang disebabkan oleh berbagai gangguan dan interaksi kompleks antar komponen, dapat membatasi kemampuan transfer daya dan menyebabkan ketidakstabilan sistem yang serius, yang dapat berujung pada keruntuhan sistem secara keseluruhan. Ketidakstabilan sistem tenaga listrik, yang dapat bermanifestasi dalam berbagai bentuk seperti ketidakstabilan sudut rotor, tegangan, dan frekuensi, menjadi perhatian utama dalam sistem tenaga. Untuk mengatasi masalah osilasi dan meningkatkan stabilitas sistem, berbagai perangkat kontrol telah dikembangkan. Di antaranya, *Power System Stabilizer* (PSS) telah menjadi alat yang sangat populer. PSS berfungsi dengan menyediakan *loop* kontrol tambahan ke regulator tegangan otomatis (AVR) utama, yang secara efektif meningkatkan redaman osilasi elektromekanis generator. Namun, kinerja PSS tradisional mungkin tidak memadai ketika kondisi operasi bergeser [2].

Selain PSS, *Flexible AC Transmission System* (FACTS) *devices* juga telah diakui secara luas keunggulannya dalam meningkatkan kinerja sistem tenaga [3]. *Static Var Compensator* (SVC) adalah salah satu perangkat FACTS tipe *shunt* yang efektif. SVC memiliki kemampuan untuk mengontrol daya reaktif secara cepat, baik injeksi kapasitif maupun penyerapan induktif, sehingga dapat mempertahankan atau mengontrol tegangan bus. Penggunaan SVC terbukti dapat meningkatkan tegangan pemulihan pasca-gangguan yang dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem [3].

Untuk menganalisis dan merancang kontroler peredam osilasi, *Heffron-Phillips Model* (HP) telah menjadi model linearisasi yang fundamental untuk studi stabilitas sinyal kecil [2]. Model HP lama (OHPM) didasarkan pada model mesin sinkron orde ketiga dengan enam konstanta K. Namun, OHPM memiliki keterbatasan karena mengabaikan dinamika lilitan peredam pada sumbu-d dan sumbu-q [1]. Oleh karena itu, *Advanced Heffron-Phillips Model* (AHPM), yang merupakan model mesin sinkron orde lebih tinggi (Model 1.1) dengan lima variabel status dan sepuluh konstanta K, telah dikembangkan untuk memberikan representasi sistem yang lebih detail dan akurat.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini akan berfokus pada pengembangan dan penerapan model Heffron-Phillips untuk meredam osilasi sistem tenaga dengan memanfaatkan *Static Var Compensator* (SVC), dengan tujuan untuk meningkatkan stabilitas sistem secara signifikan.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan dan mengimplementasikan Model Heffron-Phillips Lanjutan (*Advanced Heffron-Phillips Model* - AHPM) yang terintegrasi dengan *Static Var Compensator* (SVC) dan *Power System Stabilizer* (PSS) untuk sistem tenaga listrik.
2. Menganalisis dan mengevaluasi bagaimana PSS dan SVC yang terintegrasi ke dalam model AHPM dapat secara efektif meredam osilasi daya frekuensi rendah pada sistem tenaga listrik.

3. Menganalisis dan mengevaluasi kinerja sistem tenaga listrik setelah implementasi Model Heffron-Phillips yang terintegrasi dengan SVC, berdasarkan parameter stabilitas seperti rasio redaman, waktu *settling*, dan lokasi *eigenvalue* pada bidang-s.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memodelkan dan mengimplementasikan Model Heffron-Phillips Lanjutan (*Advanced Heffron-Phillips Model* - AHPM) yang terintegrasi dengan *Static Var Compensator* (SVC) dan *Power System Stabilizer* (PSS) untuk sistem tenaga listrik?
2. Bagaimana PSS dan SVC yang terintegrasi ke dalam model AHPM dapat secara efektif meredam osilasi daya frekuensi rendah pada sistem tenaga listrik?
3. Bagaimana menganalisis dan mengevaluasi kinerja sistem tenaga listrik setelah implementasi Model Heffron-Phillips yang terintegrasi dengan SVC, berdasarkan parameter stabilitas seperti rasio redaman, waktu *settling*, dan lokasi *eigenvalue* pada bidang-s?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Sistem tenaga listrik yang digunakan sebagai studi kasus adalah sistem satu mesin terhubung bus tak hingga (*Single Machine Infinite Bus* - SMIB).
2. Perangkat FACTS (*Flexible AC Transmission System*) yang akan diimplementasikan dan dianalisis adalah *Static Var Compensator* (SVC).
3. Model generator yang digunakan adalah *Advanced Heffron-Phillips Model* (AHPM) dengan 10 konstanta K, yang mempertimbangkan dinamika sumbu-d dan sumbu-q mesin sinkron.

4. Metode optimasi untuk penentuan parameter kontrol SVC dan PSS akan menggunakan algoritma optimasi yang ditentukan yaitu menggunakan algoritma genetika.
5. Analisis akan dilakukan menggunakan perangkat lunak simulasi MATLAB/Simulink.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai *Advanced Heffron-Phillips Model* (AHPM) yang terintegrasi dengan *Static Var Compensator* (SVC) dalam analisis stabilitas sistem tenaga listrik. Secara khusus, penelitian ini akan memperkaya literatur tentang bagaimana AHPM yang ditingkatkan dapat digunakan secara efektif untuk meredam osilasi daya frekuensi rendah (LFO) pada sistem tenaga listrik. Dengan menyajikan analisis tentang bagaimana parameter stabilitas sistem, seperti rasio redaman, waktu *settling*, dan lokasi *eigenvalue*, berubah setelah implementasi SVC pada model AHPM, penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi para mahasiswa lain dalam merancang dan mengimplementasikan SVC untuk meningkatkan keandalan dan keamanan sistem tenaga listrik di masa depan.

1.6 Hipotesis

Dalam penelitian ini, Model Heffron-Phillips Lanjutan (*Advanced Heffron-Phillips Model* - AHPM) dapat dibangun dan diimplementasikan secara akurat untuk merepresentasikan dinamika sistem tenaga listrik, dan integrasinya dengan *Static Var Compensator* (SVC) akan memungkinkan pemodelan kontrol peredam osilasi yang efektif. Selanjutnya, implementasi SVC yang terintegrasi ke dalam model AHPM diprediksi akan secara signifikan meningkatkan peredaman osilasi daya frekuensi rendah (LFO) pada sistem tenaga listrik, yang akan ditunjukkan melalui penurunan amplitudo osilasi dan waktu *settling* yang lebih cepat setelah terjadinya gangguan. Peningkatan stabilitas ini juga diharapkan akan tercermin dari

pergeseran lokasi *eigenvalue* dominan ke arah bidang-s kiri dan peningkatan rasio redaman sistem, dibandingkan dengan sistem tanpa SVC.

1.7 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, hipotesis dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini memaparkan beberapa teori pendukung yang dijadikan sebagai referensi dalam penelitian yang bersumber dari buku manual, jurnal ilmiah dan artikel internet.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan waktu dan tempat, alat dan bahan, pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan hasil data komputasi dan pembahasan dari penelitian tugas akhir ini.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dikaji dalam penelitian tugas akhir dan berisi saran penulis untuk meningkatkan wawasan bagi pembaca.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian di bidang stabilitas sistem tenaga telah mengalami perkembangan signifikan, terutama dalam hal pemodelan dan optimasi kontrol. Agrawal et al. [1] menyajikan kemajuan penting dengan memperkenalkan *Advanced Heffron-Phillips Model* (AHPM), yang merupakan peningkatan dari Model Heffron-Phillips tradisional. AHPM, mencakup dinamika sumbu-d dan sumbu-q, memungkinkan analisis stabilitas sistem tenaga yang lebih komprehensif. Penelitian ini juga menerapkan *Snake Optimization Algorithm* (SOA) untuk mengoptimalkan parameter *Power System Stabilizers* (PSS) dan *Thyristor Controlled Series Capacitors* (TCSC). Hasilnya menunjukkan bahwa AHPM yang dikombinasikan dengan SOA secara signifikan meningkatkan kinerja peredaman osilasi daya, melebihi model konvensional. Makalah ini memberikan dasar matematika yang kuat untuk AHPM dan mendemonstrasikan efektivitasnya melalui simulasi. Temuan ini relevan untuk mengatasi tantangan stabilitas yang terkait dengan integrasi energi terbarukan dan memiliki potensi untuk diperluas ke sistem multi-mesin. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pemodelan dan optimasi stabilitas sistem tenaga.

Patel dkk. [2] meneliti stabilitas sistem tenaga, khususnya peran sistem eksitasi dan penstabil sistem tenaga (PSS) dalam sistem satu mesin terhubung bus tak hingga (SMIB). Penelitian ini menekankan bahwa sistem tenaga bersifat dinamis dan mengalami gangguan yang dapat menyebabkan ketidakstabilan, termasuk ketidakstabilan sinyal kecil. Para penulis menyoroti pentingnya generator sinkron dan sistem eksitasi dalam menjaga stabilitas sistem. Mereka juga mencatat bahwa meskipun regulator tegangan otomatis (AVR) dapat meningkatkan torsi sinkron,

PSS diperlukan untuk meningkatkan stabilitas osilasi karena AVR dapat berdampak negatif pada torsi redaman. Studi ini menggunakan model Heffron-Phillips untuk menganalisis stabilitas sinyal kecil dalam sistem SMIB, yang berfokus pada kemampuan sistem untuk mempertahankan sinkronisme di bawah gangguan kecil. Penelitian ini mencakup pemodelan matematis sistem SMIB, solusi persamaan Heffron-Phillips, analisis MATLAB, dan perbandingan kinerja sistem dengan AVR dan PSS, serta penggunaan logika fuzzy untuk meningkatkan stabilitas.

Dalam bidang sistem tenaga listrik, stabilitas menjadi perhatian utama karena peningkatan permintaan daya dan keterbatasan dalam perluasan infrastruktur. Sahare dan Bonde [3] meneliti penggunaan *Flexible AC Transmission Systems (FACTS) controllers*, khususnya *Static VAR Compensators (SVC)*, bersama dengan *power system stabilizers (PSS)* untuk meningkatkan stabilitas transien dalam sistem tenaga multi-mesin. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa FACTS controllers efektif dalam mengendalikan kondisi jaringan dan meningkatkan berbagai jenis stabilitas. Sahare dan Bonde [3] secara khusus menganalisis kemampuan SVC dalam meningkatkan stabilitas transien dan meredam osilasi daya. Mereka membandingkan kinerja sistem tenaga multi-mesin dengan PSS saja dan dengan kombinasi PSS dan SVC, serta meneliti efek penempatan SVC pada sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa koordinasi PSS dan SVC menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam redaman osilasi dan stabilitas transien dibandingkan dengan penggunaan PSS saja.

2.2 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah kemampuan sistem untuk kembali ke kondisi operasi baru yang dapat diterima (*acceptable operating condition*) dan seimbang setelah mengalami gangguan [2], [3]. Meskipun ketidakstabilan sistem tenaga dapat terwujud dalam berbagai gejala, secara tradisional, masalah stabilitas berfokus pada upaya mempertahankan operasi sinkron [4]. Karena sistem tenaga bergantung pada mesin sinkron untuk pembangkitan daya listrik, tolak ukur mendasar yang menentukan keberhasilan atau kelayakan operasi sistem adalah bahwa semua mesin sinkron harus tetap berada dalam sinkronisme atau 'tetap dalam langkah'. Aspek

vital dari stabilitas ini dipengaruhi oleh dinamika sudut rotor generator dan hubungan daya-sudut mesin, yang menentukan kemampuan sistem untuk pulih dari gangguan.

2.2.1 Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor adalah kemampuan mesin-mesin sinkron yang saling terhubung dari suatu sistem tenaga untuk tetap berada dalam sinkronisme [4]. Studi mengenai stabilitas ini berpusat pada studi tentang osilasi elektromekanis yang melekat dalam sistem tenaga. Faktor mendasar dalam masalah ini adalah bagaimana output daya (torsi listrik) dari mesin-mesin sinkron berubah sebagai respons terhadap ayunan (osilasi) sudut rotor.

Dalam konteks sistem tenaga listrik, respons torsi elektrik dari mesin sinkron pasca terjadinya perturbasi atau gangguan dapat dipisahkan menjadi dua komponen utama, yaitu torsi sinkronisasi dan torsi redaman:

$$\Delta T_e = T_S \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2.1)$$

Dimana:

$T_S \Delta \delta$ adalah komponen perubahan torsi yang memiliki fase yang sama dengan variasi sudut rotor ($\Delta \delta$) dan didefinisikan sebagai torsi sinkronisasi. T_S adalah koefisien torsi sinkronisasi.

$T_D \Delta \omega$ adalah komponen torsi yang memiliki fase yang sama dengan penyimpangan kecepatan rotor ($\Delta \omega$) dan didefinisikan sebagai torsi redaman. T_D adalah koefisien torsi redaman.

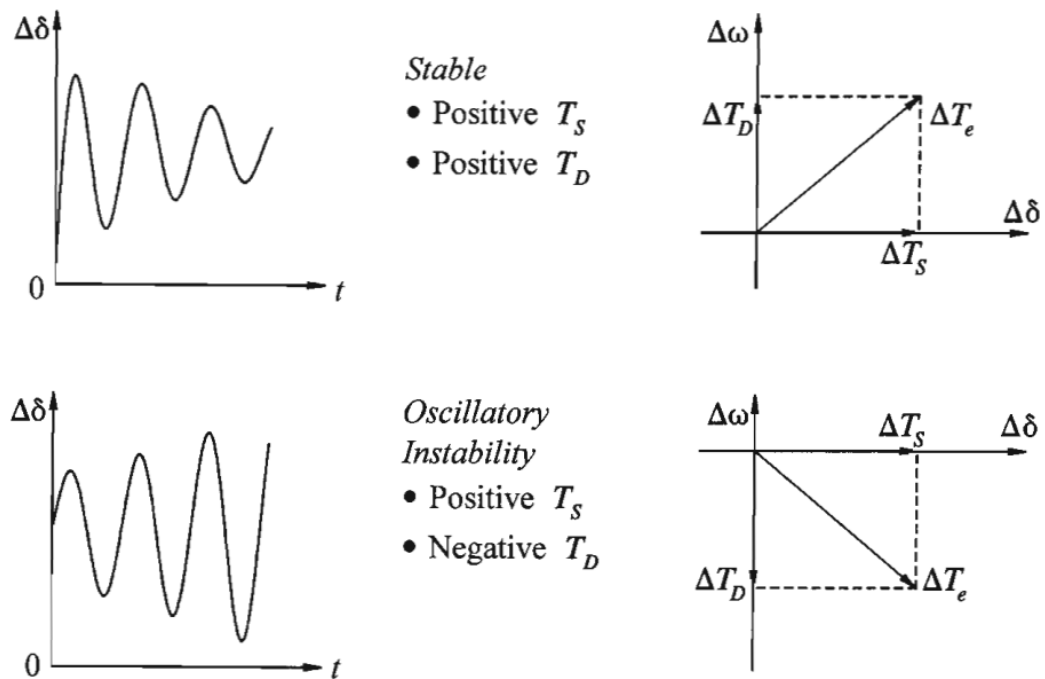
Stabilitas sistem bergantung pada keberadaan kedua komponen torsi (sinkronisasi dan redaman) pada setiap mesin sinkron [4]. Jika torsi sinkronisasi kurang memadai, mesin akan kehilangan sudutnya. Akibatnya, sudut rotor akan terus bertambah atau berkurang tanpa berosilasi yang disebut *aperiodic drift* yang berujung pada hilangnya sinkronisme. Sebaliknya, kurangnya torsi redaman yang memadai mengakibatkan ayunan (osilasi) yang terjadi setelah gangguan tidak akan mereda. Amplitudo osilasi sudut rotor justru akan membesar (*oscillatory instability*), yang

juga menyebabkan hilangnya sinkronisme. Fenomena stabilitas sudut rotor biasanya dikelompokkan ke dalam dua klasifikasi utama:

2.2.1.1 *Small-Signal (or Small-Disturbance) Stability*

Stabilitas sinyal kecil adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisme di bawah gangguan kecil [4]. Gangguan-gangguan semacam itu terjadi secara terus-menerus pada sistem akibat variasi kecil dalam beban dan pembangkitan. Asumsi dasar dalam analisis ini adalah bahwa magnitudo gangguan sangatlah kecil, hal ini memungkinkan persamaan diferensial sistem untuk dilinearisasi di sekitar titik operasi, sehingga teknik analisis linear yang lebih sederhana dapat diterapkan secara valid.

Pada dasarnya, ketidakstabilan sinyal kecil yang dapat timbul dapat dikelompokkan menjadi dua jenis [4]. Pertama, penyimpangan sudut rotor secara kontinu karena torsi sinkronisasi (T_S) tidak mencukupi, dan kedua, penguatan amplitudo ayunan rotor karena torsi redaman (T_D) yang tidak memadai. Karakteristik respons sistem saat menghadapi gangguan kecil ditentukan oleh beberapa parameter, di antaranya adalah titik operasi awal sistem, keandalan atau kekuatan jaringan transmisi, serta konfigurasi kontrol eksitasi pada generator. Pada generator yang terhubung secara radial ke sistem utama, ketiadaan perangkat *Automatic Voltage Regulator* (AVR) menyebabkan ketidakstabilan yang bersumber dari ketidakcukupan torsi sinkronisasi. Fenomena ini muncul dalam bentuk mode non-osilasi. Namun, ketika sistem menggunakan regulator tegangan yang bekerja secara kontinu, fokus permasalahan stabilitas gangguan kecil bergeser menjadi upaya untuk menjamin redaman yang memadai terhadap osilasi yang muncul pada sistem, ketidakstabilan biasanya terjadi melalui osilasi dengan amplitudo yang semakin membesar [4].



Gambar 2.1 Karakteristik Respon Gangguan Kecil

Pada sistem tenaga listrik modern, permasalahan stabilitas sinyal kecil umumnya berakar pada ketidakcukupan redaman terhadap osilasi sistem [4]. Adapun jenis-jenis osilasi yang menjadi perhatian utama dalam analisis stabilitas meliputi:

1. *Local Modes* (Mode lokal) atau *Machine-System Modes*, (mode mesin-sistem), merujuk pada fenomena ayunan unit pembangkit terhadap sistem tenaga secara keseluruhan. Penggunaan istilah 'lokal' didasarkan pada karakteristik osilasinya yang hanya terbatas pada satu lokasi pembangkitan atau mencakup area yang sempit dalam sistem tenaga tersebut.
2. *Inter-Area Modes* (Mode antar-area) merujuk pada fenomena osilasi yang melibatkan ayunan sekelompok besar mesin pembangkit di suatu area terhadap kelompok mesin di area lainnya. Kondisi ini umumnya dipicu oleh adanya interkoneksi saluran transmisi yang lemah (*weak tie lines*) di antara dua atau lebih kelompok pembangkit yang masing-masing memiliki ikatan internal yang kuat.

3. *Control Modes* (Mode kontrol) berhubungan erat dengan unit pembangkitan beserta perangkat kendali pendukungnya. Ketidakstabilan pada mode ini sering kali dipicu oleh pengaturan (*tuning*) yang buruk pada sistem eksitasi, *governor*, konverter HVDC, maupun *Static VAR Compensator* (SVC).
4. *Torsional Modes* (Mode Torsional) berhubungan dengan dinamika komponen rotasi pada sistem poros antara turbin dan generator. Fenomena ketidakstabilan pada mode ini dapat dipicu oleh adanya interaksi antara sistem mekanis tersebut dengan kontrol eksitasi, *governor*, kendali HVDC, maupun penggunaan kompensasi kapasitor seri pada saluran transmisi.

2.2.1.2 Transient Stability

Stabilitas transien merujuk pada kapasitas sistem tenaga listrik dalam menjaga sinkronisme mesin-mesinnya pasca terjadinya gangguan transien yang bersifat ekstrem, seperti hubung singkat [4]. Fenomena ini ditandai dengan pergeseran sudut rotor yang signifikan, di mana analisisnya harus mempertimbangkan hubungan non-linear antara daya dan sudut. Tingkat stabilitas ini sangat ditentukan oleh titik operasi awal serta intensitas gangguan yang terjadi. Umumnya, konfigurasi sistem akan mengalami perubahan sehingga titik keseimbangan baru setelah gangguan akan berbeda dengan kondisi semula.

Sistem tenaga listrik memiliki potensi terpapar berbagai jenis gangguan dengan intensitas dan frekuensi kejadian yang beragam. Namun, sistem tersebut dirancang dan dioperasikan sedemikian rupa agar tetap stabil terhadap serangkaian kontinjensi yang dipilih. Kontinjensi tersebut terutama gangguan hubungan singkat baik tipe satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, maupun tiga fasa. Meskipun skenario utama sering kali ditempatkan pada saluran transmisi, analisis juga dapat mencakup kegagalan pada bus maupun transformator. Mekanisme pembersihan gangguan dilakukan melalui isolasi elemen yang bermasalah oleh pemutus daya, di mana dalam kondisi tertentu, skema *high-speed reclosure* juga dipertimbangkan dalam evaluasi stabilitas [4].

2.3 Model Heffron-Phillips

Model Heffron-Phillips adalah representasi linear dari sistem tenaga listrik yang digunakan untuk menganalisis stabilitas sinyal kecil, khususnya untuk meredam *Low-Frequency Oscillations* (LFO) yang mencakup mode antar-area (0,1–0,7 Hz) dan mode lokal (0,7–1,5 Hz) [2]. Model ini berperan penting karena karena memfasilitasi analisis perilaku sistem melalui linearisasi deret Taylor di sekitar titik operasi tertentu dengan asumsi gangguan kecil.

2.3.1 Model Heffron-Phillips Klasik (OHPM)

Model Heffron-Phillips klasik, sering disebut *Old Heffron-Phillips Model* (OHPM), didasarkan pada model mesin sinkron urutan ketiga [2]. Model ini mempertimbangkan dinamika generator sinkron dengan fokus pada medan eksitasi, namun mengabaikan dinamika lilitan peredam pada sumbu-d dan sumbu-q. OHPM digambarkan oleh enam konstanta K, yaitu K1 hingga K6, yang mencerminkan dinamika sistem. Konstanta-konstanta ini diturunkan dari persamaan sistem tenaga listrik di sekitar titik operasi awal [2], [4].

Persamaan-persamaan untuk konstanta K dalam OHPM adalah sebagai berikut:

$$K1 = \frac{E_b E_q \cos \delta_0}{(x_e + x_q)} + \frac{(x_q + x'_d)}{(x_e + x'_d)} E_b i_{q0} \cos \delta_0 \quad (2.2)$$

$$K2 = \frac{(x_e + x_q)}{(x_e + x'_d)} i_{q0} = \frac{E_b \sin \delta_0}{(x_e + x'_d)} \quad (2.3)$$

$$K3 = \frac{(x_e + x'_d)}{(x_d + x_e)} \quad (2.4)$$

$$K4 = \frac{(x_d - x'_d)}{(x'_d + x_e)} E_b \sin \delta_0 \quad (2.5)$$

$$K5 = \frac{-x_q V_{d0} E_b \cos \delta_0}{(x_e + x_q) V_{t0}} - \frac{x'_d V_{q0} E_b \sin \delta_0}{(x_e + x'_d) V_{t0}} \quad (2.6)$$

$$K6 = \frac{x_e}{(x_e + x'_d)} \cdot \left(\frac{V_{q0}}{V_{t0}} \right) \quad (2.7)$$

Sebagaimana diuraikan dalam [1], model matematis sistem dikembangkan dengan beberapa asumsi penyederhanaan, antara lain mengabaikan tahanan jangkar (R_a) dan menganggap jaringan transmisi sebagai jaringan tanpa rugi-rugi (*lossless network*), merepresentasikan sistem eksitasi dengan konstanta waktu tunggal, serta mengabaikan dinamika belitan peredam (*dampers winding*) pada sumbu d dan q.

Berdasarkan asumsi pengabaian dinamika *dampers winding* tersebut, sistem generator direduksi menjadi model orde ketiga yang dikenal sebagai *Old Heffron-Phillips Model* (OHPM). Perilaku dinamis dari model ini dijelaskan melalui interaksi antara variabel mekanik dan elektromagnetik yang dinyatakan dalam persamaan diferensial berikut:

$$\begin{aligned}\frac{d\delta}{dt} &= \omega_0(\omega - 1) \\ \frac{d(\Delta\delta)}{dt} &= \omega_0\Delta\omega \\ s\Delta\delta(s) &= \omega_0\Delta\omega(s) \\ \Delta\delta(s) &= \frac{2\pi f}{s}\Delta\omega(s)\end{aligned}\tag{2.8}$$

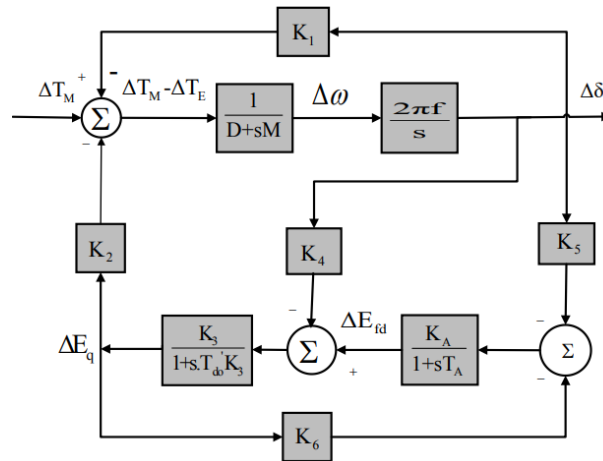
$$\begin{aligned}\frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{2H}(T_m - T_e - D\omega) \\ 2H\frac{d\omega}{dt} &= T_m - T_e - D\omega \\ 2H\frac{d(\Delta\omega)}{dt} &= \Delta T_m - \Delta T_e - D\Delta\omega \\ \Delta T_e &= K_1\Delta\delta + K_2\Delta E'_q \\ 2H\frac{d(\Delta\omega)}{dt} &= \Delta T_m - (K_1\Delta\delta + K_2\Delta E'_q) - D\Delta\omega \\ 2Hs\Delta\omega &= \Delta T_m - (K_1\Delta\delta + K_2\Delta E'_q) - D\Delta\omega \\ \Delta\omega(2Hs + D) &= \Delta T_m - K_1\Delta\delta + K_2\Delta E'_q \\ \Delta\omega &= \frac{1}{2Hs + D}[\Delta T_m - K_1\Delta\delta + K_2\Delta E'_q]\end{aligned}\tag{2.9}$$

$$\begin{aligned}T'_{do}\frac{d(E'_q)}{dt} &= E_{fd} - E_q \\ T'_{do}\frac{d(\Delta E'_q)}{dt} &= \Delta E_{fd} - \Delta E_q \\ \Delta E_q &= \frac{1}{K_3}\Delta E'_q - K_4\Delta\delta\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T'_{do} \frac{d(\Delta E'_q)}{dt} &= \Delta E_{fd} - \frac{1}{K_3} \Delta E'_q - K_4 \Delta \delta \\
sT'_{do} \Delta E'_q &= \Delta E_{fd} - \frac{1}{K_3} \Delta E'_q - K_4 \Delta \delta \\
sT'_{do} \Delta E'_q + \frac{1}{K_3} \Delta E'_q &= \Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta \\
\Delta E'_q (sT'_{do} + \frac{1}{K_3}) &= \Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta \\
\Delta E'_q (\frac{sK_3 T'_{do} + 1}{K_3}) &= \Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta \\
\Delta E'_q &= \frac{K_3}{sK_3 T'_{do} + 1} (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta)
\end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d(\Delta E_{fd})}{dt} &= \frac{1}{T_A} [K_A (V_{ref} - V_t) - \Delta E_{fd}] \\
\Delta V_t &= K_5 \Delta \delta - K_6 \Delta E'_q \\
\Delta E_{fd} &= \frac{K_A}{1+sT_A} (-\Delta V_t) \\
\Delta E_{fd} &= \frac{K_A}{1+sT_A} [-(K_5 \Delta \delta - K_6 \Delta E'_q)]
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Blok diagram yang merepresentasikan OHPM ditunjukkan pada gambar 2.1



Gambar 2.2 Blok Diagram Model Heffron-Phillips Klasik (OHPM)

Sumber: Agrawal (2024)

Keterbatasan utama OHPM adalah penyederhanaannya yang mengabaikan dinamika lilitan peredam pada sumbu-d dan sumbu-q mesin sinkron [1]. Ini membuatnya kurang akurat untuk menganalisis beberapa fenomena osilasi modern.

2.3.2 Model Heffron-Phillips Lanjutan (AHPM)

Untuk mengatasi keterbatasan model klasik, penelitian ini menggunakan model mesin sinkron orde keempat (Model 1.1) sebagaimana didefinisikan dalam [1]. Dinamika sistem diperluas dengan memperhitungkan efek belitan peredam pada sumbu-q dan sumbu-d. Dinamika sistem non-linear mesin sinkron model 1.1 tersebut dinyatakan melalui empat persamaan diferensial berikut:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.12)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = T_M E'_q I_q - E'_d I_d - (X'_q - X'_d) I_d I_q - T_{FW} \quad (2.13)$$

$$T'_{do} \frac{dE'_q}{dt} = -E'_q - (X_d - X'_d) I_d + E_{fd} \quad (2.14)$$

$$T'_{qo} \frac{dE'_d}{dt} = -E'_d + (X_q - X'_q) I_q \quad (2.15)$$

Konstanta-konstanta K dalam AHPM (K1 hingga K10) merepresentasikan turunan parsial dari torsi elektromagnetik dan tegangan internal terhadap sudut rotor, tegangan transien, dan tegangan medan [1]. Persamaan-persamaan untuk konstanta K dalam AHPM adalah sebagai berikut:

$$K1 = -[E'_{d0} + ((x'_d - x'_q)i_{q0})] \frac{E_{d0} E_b \sin \delta_0}{x_e + x'_d} + [(x'_d - x'_q)i_{d0} + E'_{q0}] \frac{E_b \cos \delta_0}{x_e + x'_d} \quad (2.7)$$

$$K2 = -[E'_{d0} + ((x'_d - x'_q)i_{q0})] \frac{1}{x_e + x'_d} + E'_{q0} \frac{1}{x_e + x'_q} + i_{q0} \quad (2.16)$$

$$K3 = [i_{d0} + ((x'_d - x'_q)i_{d0})] \frac{1}{x_e + x'_q} \quad (2.17)$$

$$K4 = \frac{x_e + x'_d}{(x_e + x'_d) + (x_d + x'_d)} \quad (2.18)$$

$$K5 = (x_d - x'_d) \frac{E_b \sin \delta_0}{x_e + x'_d} \quad (2.19)$$

$$K6 = \frac{x_e + x'_q}{(x_e + x'_q) + (x_q + x'_q)} \quad (2.20)$$

$$K7 = -(x_q - x'_q) \frac{E_b \cos \delta_0}{x_e + x'_q} \quad (2.21)$$

$$K8 = \frac{V_{d0}}{V_{t0}} \left[-E_b \cos \delta_0 + \frac{x_e E_b \cos \delta_0}{x_e + x'_d} \right] \quad (2.22)$$

$$K9 = \frac{V_{q0} x_e}{V_{t0}} \frac{1}{x_e + x'_d} \quad (2.23)$$

$$K10 = \frac{V_{d0} x_e}{V_{t0}} \frac{1}{x_e + x'_q} \quad (2.24)$$

Berdasarkan proses linearisasi terhadap persamaan non-linear tersebut, model mesin sinkron dikembangkan menjadi model stabilitas sinyal kecil yang dikenal sebagai *Advanced Heffron-Phillips Model* (AHPM). Perilaku dinamis dari model ini dijelaskan melalui interaksi variabel keadaan yang memuat sepuluh konstanta K dan dinyatakan dalam persamaan diferensial berikut:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= \omega - \omega_s \\ \frac{d(\Delta\delta)}{dt} &= \omega_0 \Delta\omega \\ s\Delta\delta &= \omega_0 \Delta\omega_m \\ \Delta\delta &= \frac{2\pi f}{s} \Delta\omega \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{2H} (T_m - T_e - D\omega) \\ 2H \frac{d\omega}{dt} &= T_m - T_e - D\omega \\ 2H \frac{d(\Delta\omega)}{dt} &= \Delta T_m - \Delta T_e - D\Delta\omega \\ \Delta T_e &= K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E'_q + K_3 \Delta E'_d \\ 2H \frac{d(\Delta\omega)}{dt} &= \Delta T_m - (K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E'_q + K_3 \Delta E'_d) - D\Delta\omega \\ 2Hs\Delta\omega &= \Delta T_m - (K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E'_q + K_3 \Delta E'_d) - D\Delta\omega \\ \Delta\omega(2Hs + D) &= \Delta T_m - K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E'_q + K_3 \Delta E'_d \\ \Delta\omega &= \frac{1}{2Hs + D} [\Delta T_m - (K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E'_q + K_3 \Delta E'_d)] \end{aligned} \quad (2.26)$$

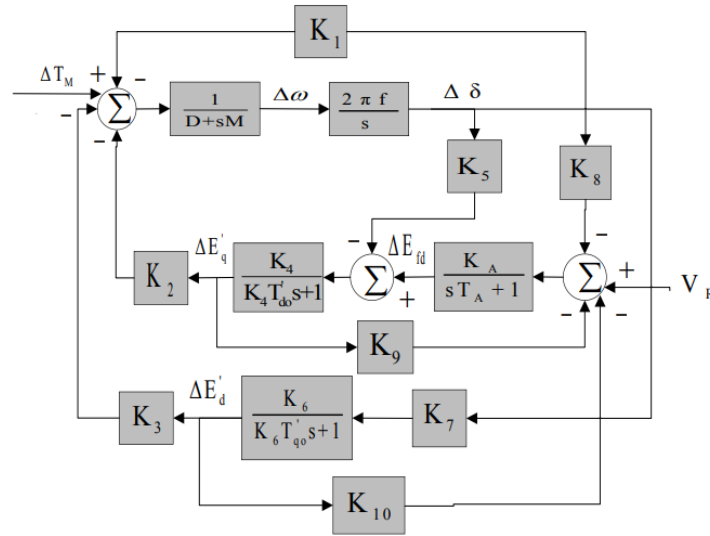
$$\begin{aligned} T'_{do} \frac{d(E'_q)}{dt} &= E_{fd} - E_q \\ T'_{do} \frac{d(\Delta E'_q)}{dt} &= \Delta E_{fd} - \Delta E_q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta E_q &= \frac{1}{K_4} \Delta E'_q - K_5 \Delta \delta \\
T'_{do} \frac{d(\Delta E'_q)}{dt} &= \Delta E_{fd} - \frac{1}{K_4} \Delta E'_q - K_5 \Delta \delta \\
sT'_{do} \Delta E'_q &= \Delta E_{fd} - \frac{1}{K_4} \Delta E'_q - K_5 \Delta \delta \\
sT'_{do} \Delta E'_q + \frac{1}{K_4} \Delta E'_q &= \Delta E_{fd} - K_5 \Delta \delta \\
\Delta E'_q (sT'_{do} + \frac{1}{K_4}) &= \Delta E_{fd} - K_5 \Delta \delta \\
\Delta E'_q \left(\frac{sK_4 T'_{do} + 1}{K_4} \right) &= \Delta E_{fd} - K_5 \Delta \delta \\
\Delta E'_q &= \frac{K_4}{sK_4 T'_{do} + 1} (\Delta E_{fd} - K_5 \Delta \delta) \tag{2.27}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T'_{do} \frac{d(\Delta E'_d)}{dt} &= K_7 \Delta \delta - \frac{1}{K_6} E'_d \\
sT'_{do} \Delta E'_d &= K_7 \Delta \delta - \frac{1}{K_6} E'_d \\
sT'_{do} \Delta E'_d + \frac{1}{K_6} E'_d &= K_7 \Delta \delta \\
\Delta E'_d (sT'_{do} + \frac{1}{K_6}) &= K_7 \Delta \delta \\
\Delta E'_d \left(\frac{sK_6 T'_{do} + 1}{K_6} \right) &= K_7 \Delta \delta \\
\Delta E'_d &= \frac{K_6}{sK_6 T'_{do} + 1} (K_7 \Delta \delta) \tag{2.28}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d(\Delta E_{fd})}{dt} &= \frac{1}{T_A} [K_A (V_{ref} - V_t) - \Delta E_{fd}] \\
\Delta V_t &= K_8 \Delta \delta - K_9 \Delta E'_q + K_{10} \Delta E'_d \\
\Delta E_{fd} &= \frac{1}{T_A} (-K_A (V_{ref} - V_t) - \Delta E_{fd}) \\
\Delta E_{fd} &= \frac{1}{T_A} (-K_A (K_8 \Delta \delta - K_9 \Delta E'_q + K_{10} \Delta E'_d) - \Delta E_{fd}) \\
\Delta E_{fd} &= \frac{K_A}{1 + sT_A} [-(K_8 \Delta \delta - K_9 \Delta E'_q + K_{10} \Delta E'_d)] \tag{2.29}
\end{aligned}$$

Blok diagram yang merepresentasikan AHPM ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.3 Blok Diagram Heffron-Phillips Lanjutan (AHPM)

Sumber: Agrawal (2024)

Penggunaan AHPM memungkinkan analisis stabilitas yang lebih detail dan akurat, termasuk dinamika sumbu-d yang sebelumnya diabaikan, menjadikannya model yang lebih sesuai untuk sistem tenaga modern, terutama dalam konteks integrasi energi terbarukan [1].

2.4 Static VAR Compensator (SVC)

Static VAR Compensator (SVC) adalah perangkat *Flexible AC Transmission System* (FACTS) tipe *shunt* yang terhubung ke sistem tenaga listrik [3]. SVC beroperasi sebagai sumber atau penyerap daya reaktif statis yang keluarannya dapat diatur untuk mengontrol parameter sistem tenaga tertentu, seperti tegangan [3], [4]. Istilah "statis" digunakan untuk menunjukkan bahwa SVC, tidak seperti *synchronous condenser*, tidak memiliki komponen utama yang bergerak atau berputar [4].

2.4.1 Prinsip Kerja dan Fungsi SVC

Prinsip dasar kerja SVC adalah mengontrol jumlah daya reaktif yang diinjeksikan ke atau diserap dari sistem tenaga [3]. SVC menghasilkan daya reaktif (beroperasi

kapasitif) ketika tegangan sistem rendah, dan menyerap daya reaktif (beroperasi induktif) ketika tegangan sistem tinggi [4]. Dengan demikian, SVC dapat mengatur tegangan pada terminalnya. Output SVC dapat diatur secara terus-menerus dan cepat, yang memungkinkan peningkatan berbagai aspek kinerja sistem transmisi.

Aplikasi SVC dalam sistem transmisi meliputi:

1. Peningkatan peredaman osilasi sistem
2. Peningkatan stabilitas transien
3. Pencegahan *voltage collapse*
4. Pengendalian *overvoltage* sementara (frekuensi daya)

SVC juga digunakan pada tingkat sistem subtransmisi dan distribusi untuk menyeimbangkan fasa sistem yang bebannya tidak seimbang, serta untuk meminimalkan fluktuasi tegangan pasokan yang disebabkan oleh beban dampak berulang seperti beban *dragline* pada tambang, *rolling mills*, dan *arc furnaces* [4].

2.4.2 Struktur SVC dan jenis SVC

SVC merupakan agregasi dari generator atau penyerap var statis dan perangkat kontrol yang sesuai. Berbagai jenis elemen kontrol daya reaktif dasar yang membentuk bagian dari sistem var statis meliputi:

1. *Saturated reactor* (SR).
2. *Thyristor-controlled reactor* (TCR).
3. *Thyristor-switched capacitor* (TSC).
4. *Thyristor-switched reactor* (TSR).
5. *Thyristor-controlled transformer* (TCT).
6. *Self- or line-commutated converter* (SCC/LCC).

Konfigurasi SVC yang paling umum adalah kombinasi dari *Thyristor-Controlled Reactor* (TCR) dan bank kapasitor (*Fixed Capacitor* - FC atau *Thyristor-Switched Capacitor* - TSC) [4].

2.4.3 Strategi Kontrol SVC

SVC dapat dioperasikan dalam dua mode berbeda:

1. Mode Regulasi Tegangan: Tegangan diatur dalam batas-batas yang ditentukan. Ini adalah mode operasi normal di mana SVC mempertahankan tegangan bus pada nilai referensi yang diinginkan.
2. Mode Kontrol Var: Susceptansi SVC dijaga konstan.

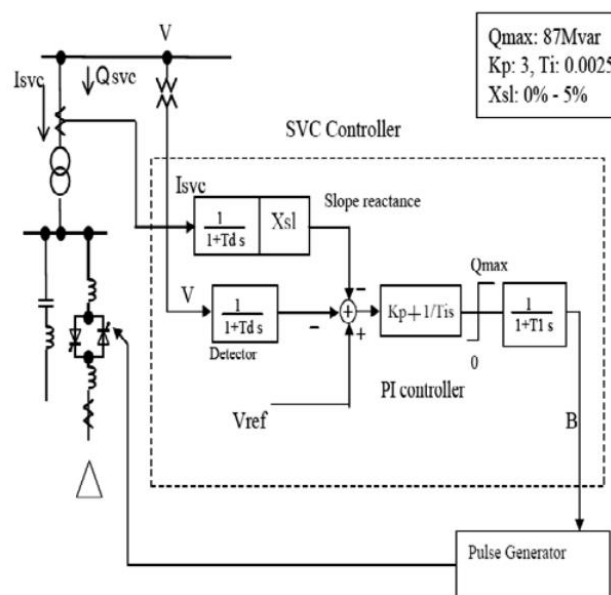
Prinsip kontrol utama dari SVC adalah mengubah susceptansi ekivalennya untuk mengatur tegangan bus yang terhubung [4]. SVC yang beroperasi dalam mode regulasi tegangan akan secara otomatis menyesuaikan output daya reaktifnya untuk menjaga tegangan bus mendekati nilai referensi, terlepas dari perubahan beban atau kondisi sistem.

2.4.4 Pemodelan Matematis SVC

struktur kontrol SVC dapat direpresentasikan lebih rinci melalui blok diagram. Blok diagram SVC yang detail, seperti yang dijelaskan oleh Biswas dan Das, mencakup berbagai komponen kontrol yang bekerja secara terkoordinasi untuk mencapai tujuan regulasi tegangan [5].

Blok diagram SVC yang terperinci ini umumnya terdiri dari beberapa bagian utama, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4:

1. Pengukuran (*Measurement*): Sinyal tegangan bus (V) dan arus SVC ($ISVC$) diukur. Sensor (*Detector*) dengan konstanta waktu tertentu ($1/(1+Tds)$) digunakan untuk mendapatkan sinyal tegangan dan arus terukur.
2. Pengaturan Slope Reaktansi (*Slope Reactance Setting*): Ini merupakan komponen yang menghasilkan sinyal *feedback* berdasarkan arus SVC yang dikalikan dengan reaktansi *slope* (Xsl). Sinyal ini menunjukkan seberapa besar tegangan bus akan bervariasi per unit perubahan arus SVC.
3. Sinyal Kesalahan Tegangan (*Voltage Error Signal*): Sinyal kesalahan ($Verror$) dihitung sebagai selisih antara tegangan referensi yang diinginkan ($Vref$), tegangan bus terukur (V), dan sinyal *feedback* dari *slope* reaktansi ($ISVCXsl$). Persamaan untuk $Verror$ adalah: $Verror = Vref - V - (ISVCXsl)$



Sumber: Biswas (2011)

Pemodelan detail ini memungkinkan simulasi yang akurat tentang bagaimana SVC merespons perubahan kondisi sistem untuk menjaga stabilitas tegangan dan meredam osilasi.

2.5 Power System Stabilizer (PSS)

Osilasi elektromekanis pada sistem tenaga listrik telah menjadi perhatian sejak tahun 1950-an, ketika sistem tenaga mulai berkembang dan semakin terbebani. Untuk mengatasi masalah ini, *Power System Stabilizer* (PSS) dikembangkan sebagai alat yang paling populer untuk peningkatan stabilitas sistem tenaga [6]. PSS menyediakan *loop* kontrol tambahan ke regulator tegangan otomatis utama (*Automatic Voltage Regulator* - AVR).

2.5.1 Prinsip Kerja PSS

Fungsi dasar PSS adalah untuk memberikan redaman positif pada torsi listrik generator, yang sefasa dengan deviasi kecepatan rotor [4]. PSS bekerja dengan memodulasi eksitasi generator untuk menghasilkan komponen torsi listrik yang sefasa dengan deviasi kecepatan rotor [4]. Sinyal tambahan ini disisipkan ke titik penjumlahan referensi tegangan sistem eksitasi [2]. Pengontrol PSS berfungsi untuk mengkompensasi karakteristik frekuensi *plant* [6].

AVR yang memiliki *gain* tinggi dan respon cepat dapat meningkatkan stabilitas transien sinyal besar, namun dapat mengurangi redaman mode osilasi elektromekanis sistem. PSS digunakan untuk menghilangkan kehilangan redaman sistem ini [6].

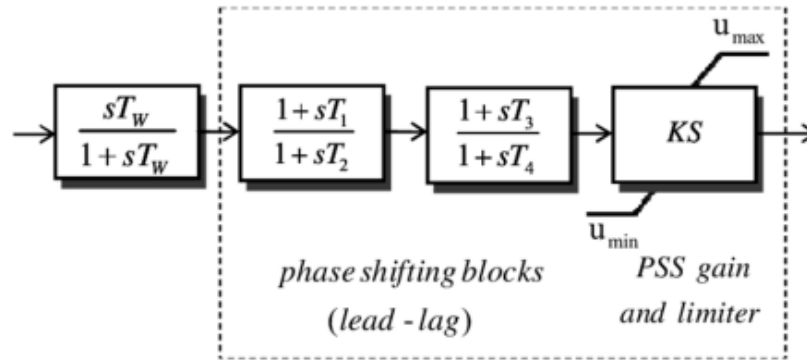
2.5.2 Struktur dan Jenis PSS

Struktur PSS biasanya mengikuti salah satu standar IEEE [6]. PSS umumnya merupakan tipe *single-input* dengan parameter konstan (*time-invariant*), namun PSS dengan dua *input* juga digunakan. PSS konvensional (tradisional) umumnya terdiri dari tiga blok utama:

1. Blok *Gain*: Menentukan jumlah redaman yang dimasukkan oleh PSS [6].

2. Blok *Washout* Sinyal: Berfungsi sebagai filter *high-pass*. Blok ini mencegah PSS mengganggu regulasi tegangan pada kondisi *steady-state* [4].
3. Blok Kompensasi Fasa: Memberikan karakteristik *phase-lead* yang sesuai untuk mengkompensasi *phase lag* antara *input exciter* dan torsi listrik generator (torsi *air-gap*). Kompensasi fasa ini seringkali dicapai menggunakan dua blok *first-order lead-lag* [6].

Blok diagram desain PSS konvensional ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Desain Model PSS Konvensional

Sumber: Nguyen (2024)

Rentang frekuensi PSS umumnya adalah 0.1 hingga 2 Hz, dan jaringan *phase-lead* harus memberikan kompensasi di seluruh rentang frekuensi ini.

2.5.3 Pemodelan Matematis PSS

PSS memberikan *loop* kontrol tambahan ke AVR untuk meredam osilasi. Struktur PSS konvensional yang sering digunakan adalah tipe *lead-lag* [6].

- Fungsi Transfer PSS Konvensional: Blok diagram PSS konvensional terdiri dari blok *gain*, blok *washout*, dan blok kompensasi fasa (*lead-lag*). Fungsi transfer PSS dapat direpresentasikan sebagai:

$$G_{PSS}(S) = K_{PSS} \left(\frac{sT_w}{1+sT_w} \right) \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \quad (2.30)$$

- Sinyal *Output* PSS (V_{pss}): Sinyal *output* PSS (V_{pss}) yang disisipkan ke sistem eksitasi (AVR) berfungsi untuk memberikan redaman tambahan. Sinyal *input* ke PSS umumnya berasal dari deviasi kecepatan rotor ($\Delta\omega$) atau deviasi daya.
- Pengaruh PSS pada Torsi Damping: PSS dirancang untuk meningkatkan torsi redaman (KD) sistem secara signifikan, yang merupakan kunci untuk meredam osilasi. Torsi redaman yang efektif sangat penting untuk mencapai stabilitas sistem [6].

2.6 Algoritma Genetika

Secara mendasar, optimasi didefinisikan sebagai prosedur penyesuaian terhadap variabel input atau karakteristik dari suatu perangkat, proses matematis, maupun eksperimen guna mencapai hasil keluaran yang paling optimal, baik berupa nilai minimum ataupun maksimum [7]. Dalam kerangka kerja ini, komponen input terdiri dari serangkaian variabel, sedangkan mekanisme evaluasinya dikenal sebagai fungsi tujuan (*objective function*), fungsi biaya (*cost function*), atau fungsi kecocokan (*fitness function*). Adapun output dari proses ini merepresentasikan nilai biaya (*cost*) atau kecocokan (*fitness*) yang dihasilkan.

Algoritma Genetika merupakan metode optimasi stokastik yang mengadopsi mekanisme seleksi alam dan genetika biologis. Dalam prosesnya, sekumpulan individu dalam populasi dikembangkan melalui serangkaian aturan seleksi secara iteratif guna mencapai solusi optimal, yang ditandai dengan maksimalnya nilai fitness atau minimalnya fungsi biaya (*cost function*) [7]. Algoritma genetika memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode optimasi konvensional, antara lain:

1. Mampu mengoptimasi variabel baik yang bersifat kontinu (bilangan riil) maupun diskrit.
2. Tidak memerlukan informasi turunan (*derivative*) atau gradien dari fungsi biaya, sehingga cocok untuk fungsi yang kompleks atau tidak mulus.

3. Melakukan pencarian secara simultan dari sampel populasi yang luas pada permukaan fungsi biaya (*cost surface*), bukan dari satu titik saja.
4. Mampu menangani masalah dengan jumlah variabel yang besar.
5. Dapat menangani permukaan biaya yang sangat kompleks dan memiliki kemampuan untuk keluar dari jebakan minimum lokal (*local minimum*) guna mencari optimum global.
6. Menyediakan daftar variabel optimum alternatif, bukan hanya satu solusi tunggal.
7. Dapat bekerja efektif menggunakan data yang dibangkitkan secara numerik, data hasil eksperimen, maupun fungsi analitis murni.

Meskipun Algoritma Genetika (GA) mampu memberikan hasil superior pada kondisi di mana pendekatan konvensional kurang efektif, metode ini tidak serta-merta menjadi solusi universal untuk seluruh jenis permasalahan. Sebagaimana dipaparkan dalam [7], metode optimasi tradisional, khususnya yang berbasis kalkulus atau gradien, justru menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi saat diterapkan pada fungsi analitis sederhana yang bersifat konveks dengan jumlah variabel terbatas.

Pada kasus-kasus sederhana tersebut, metode konvensional dapat mencapai konvergensi solusi dengan lebih cepat, bahkan saat GA masih dalam tahapan inisialisasi populasi awal. Oleh karena itu, implementasi GA lebih disarankan secara spesifik untuk menangani permasalahan kompleks dengan ruang pencarian yang luas yang sulit diselesaikan melalui pendekatan analitis standar [7].

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian tugas akhir ini dimulai sejak Februari 2025 dan selesai pada Agustus 2025, Bertempat di laboratorium Sistem Tenaga Listrik (STL), Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Adapun jadwal penelitian seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan						
		Jul	Agu	Sep	Okt	Nov	Des	Jan
1	Studi Literatur dan Studi Bimbingan							
2	Pengajuan Proposal Penelitian							
3	Pengumpulan data							
4	Pemodelan Program							
5	Simulasi Program							
6	Analisis Hasil							
7	Pengajuan Hasil Penelitan							
8	Ujian Komprehensif							

3.2 Alat dan Bahan

Penelitian tugas akhir ini menggunakan satu unit laptop dengan spesifikasi: *Processor AMD Ryzen 3 5300U with Radeon Graphics @2.6 GHz (4 CPUs)*, Memori sebesar 17800 MB RAM, dengan *Operating System Windows 10 64-bit*; perangkat lunak, *MATLAB R2021a* untuk memodelkan sistem tenaga listrik, mengimplementasikan Model Heffron-Phillips Lanjutan (AHPM), serta menganalisis kinerja *Static Var Compensator (SVC)* melalui perhitungan numerik, analisis eigenvalue, dan visualisasi hasil. Data parameter sistem tenaga listrik yang diperlukan, diperoleh dari buku "*Power System Stability and Control*" oleh Prabha Kundur.

3.3 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Tahap ini merupakan proses pencarian data dan referensi yang akan dijadikan acuan untuk menunjang proses pelaksanaan penelitian. Studi literatur akan diperoleh data sekunder, buku, skripsi, laporan terdahulu, artikel, dan jurnal-jurnal nasional maupun internasional yang berkaitan dengan topik skripsi.

2. Studi Bimbingan

Studi bimbingan dilakukan dengan diskusi bersama dosen pembimbing. diskusi dilakukan secara berkala, diskusi dilakukan untuk menambah wawasan dan untuk menyelesaikan persoalan-persoalan yang dihadapi selama proses pengerjaan penelitian, diskusi dilakukan secara berkala.

3. Pengumpulan data dan Pengolahan data

Penulis mengumpulkan data-data yang dibutuhkan untuk penelitian yang kemudian akan digunakan untuk analisis menggunakan perangkat lunak. Data yang dibutuhkan yaitu berupa parameter generator sinkron, saluran transmisi. Data tersebut didapatkan dari buku "*Power System Stability and Control*" oleh Prabha Kundur.

4. Pemodelan dan Simulasi

Tahap ini mencakup pemodelan matematis sistem SMIB, dan pemodelan AHPM, SVC dan PSS. Semua model ini kemudian diimplementasikan dalam MATLAB/Simulink, diikuti dengan optimasi parameter kontrol SVC dan PSS untuk meredam osilasi. Simulasi gangguan kecil diterapkan untuk mengamati respons sistem pada berbagai skenario kontrol.

5. Analisis dan pembahasan

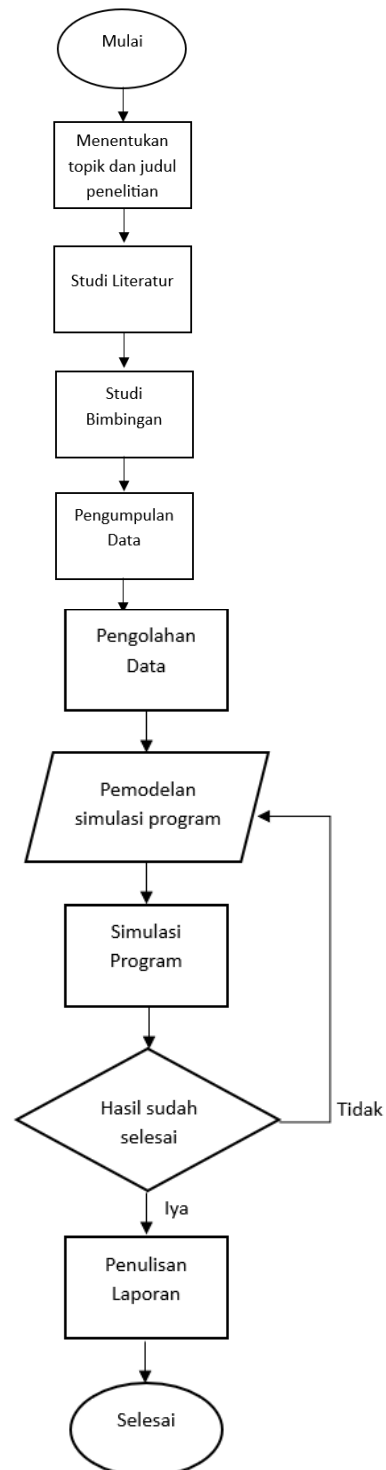
Pada tahap ini, hasil simulasi akan dianalisis melalui analisis *eigenvalue* dan analisis domain waktu (kurva respon osilasi, waktu *settling*, rasio redaman) untuk mengevaluasi kinerja sistem. Pembahasan akan dilakukan untuk menginterpretasikan efektivitas SVC dan PSS dalam meredam osilasi.

6. Pembuatan laporan

Pada tahap ini, penyusunan laporan dilakukan untuk mendokumentasikan temuan penelitian dan sebagai bentuk pertanggungjawaban atas pekerjaan yang telah diselesaikan. Laporan ini dibagi menjadi dua fase: laporan awal untuk seminar proposal dan laporan akhir untuk seminar hasil.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir dari penelitian ini ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.5 Pemodelan Sistem Yang Diuji

3.5.1 Pemodelan Heffron-Phillips Lanjutan (AHPM)

Model ini akan diimplementasikan berdasarkan Model Mesin Sinkron 1.1 yang mempertimbangkan dinamika sumbu-d dan sumbu-q, menghasilkan lima variabel status dan sepuluh konstanta K (K1-K10). Konstanta K akan dihitung dari persamaan linearisasi sistem pada titik operasi awal. Representasi *state-space* sistem akan dibentuk. Kondisi operasi awal sistem dihitung melalui analisis aliran daya (*load flow*) dasar.

Seperti yang telah disebutkan pada bab sebelumnya untuk persamaan-persamaan untuk konstanta K dalam AHPM adalah sebagai berikut:

$$K1 = -[E'_{d0} + ((x'_d - x'_q)i_{q0})] \frac{E_{d0}E_b \sin \delta_0}{x_e + x'_d} + [(x'_d - x'_q)i_{d0} + E'_{q0}] \frac{E_b \cos \delta_0}{x_e + x'_d} \quad (3.1)$$

$$K2 = -[E'_{d0} + ((x'_d - x'_q)i_{q0})] \frac{1}{x_e + x'_d} + E'_{q0} \frac{1}{x_e + x'_q} + i_{q0} \quad (3.2)$$

$$K3 = [i_{d0} + ((x'_d - x'_q)i_{d0})] \frac{1}{x_e + x'_q} \quad (3.3)$$

$$K4 = \frac{x_e + x'_d}{(x_e + x'_d) + (x_d + x'_d)} \quad (3.4)$$

$$K5 = (x_d - x'_d) \frac{E_b \sin \delta_0}{x_e + x'_d} \quad (3.5)$$

$$K6 = \frac{x_e + x'_q}{(x_e + x'_q) + (x_q + x'_q)} \quad (3.6)$$

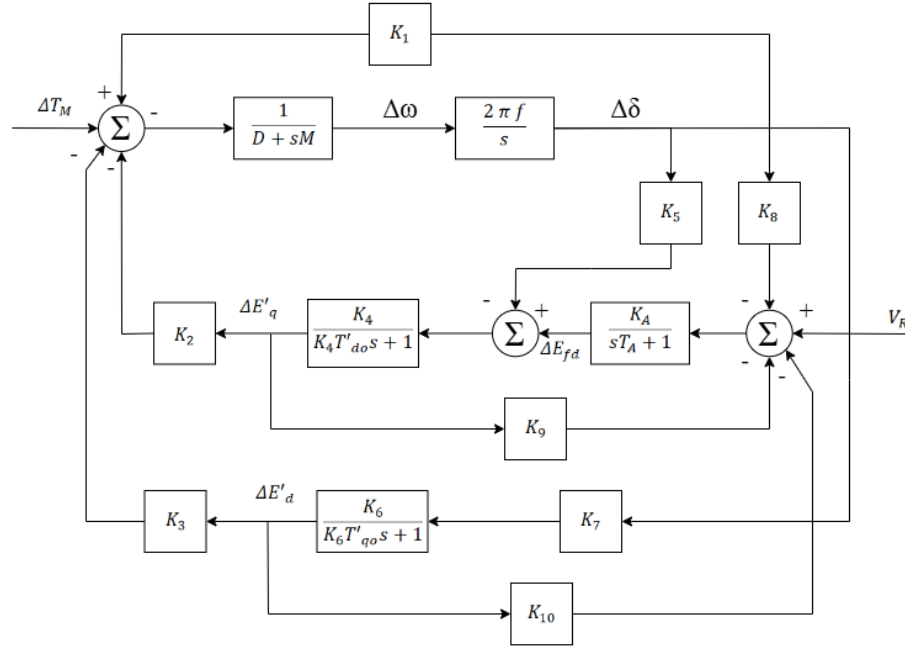
$$K7 = -(x_q - x'_q) \frac{E_b \cos \delta_0}{x_e + x'_q} \quad (3.7)$$

$$K8 = \frac{V_{d0}}{V_{t0}} \left[-E_b \cos \delta_0 + \frac{x_e E_b \cos \delta_0}{x_e + x'_d} \right] \quad (3.8)$$

$$K9 = \frac{V_{q0} x_e}{V_{t0}} \frac{1}{x_e + x'_d} \quad (3.9)$$

$$K10 = \frac{V_{d0} x_e}{V_{t0}} \frac{1}{x_e + x'_q} \quad (3.10)$$

Pemodelan heffron-phillips lanjutan tanpa menggunakan SVC dan PSS adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2 Model Heffron-Phillips tanpa SVC dan PSS

3.5.2 Matriks State-Space Heffron-Phillips Lanjutan

Model yang digambarkan pada Gambar 3.2 dapat diturunkan menjadi serangkaian *Transfer Function* (Fungsi Alih), yang kemudian diformulasikan ke dalam bentuk matriks *state-space*. Matriks ini dibutuhkan dalam menentukan *eigenvalue* sistem untuk analisis stabilitas, dengan persamaan-persamaan penyusunnya sebagai berikut:

$$\frac{2\pi f}{s} = \frac{\Delta\delta}{\Delta\omega}$$

$$s\Delta\delta = 2\pi f\Delta\omega$$

$$\Delta\dot{\delta} = 2\pi f\Delta\omega \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{D+sM} &= \frac{\Delta\omega}{\Delta T_m} - (K_1\Delta\delta + K_2\Delta E'_q + K_3\Delta E'_d) \\
(D+sM)\Delta\omega &= \Delta T_m - (K_1\Delta\delta + K_2\Delta E'_q + K_3\Delta E'_d) \\
sM\Delta\omega &= \Delta T_m - D\Delta\omega - K_1\Delta\delta + K_2\Delta E'_q + K_3\Delta E'_d \\
s\Delta\omega &= -\frac{K_1}{M}\Delta\delta - \frac{D}{M}\Delta\omega - \frac{K_2}{M}\Delta E'_q - \frac{K_3}{M}\Delta E'_d + \frac{1}{M}\Delta T_m \\
\Delta\dot{\omega} &= -\frac{K_1}{M}\Delta\delta - \frac{D}{M}\Delta\omega - \frac{K_2}{M}\Delta E'_q - \frac{K_3}{M}\Delta E'_d + \frac{1}{M}\Delta T_m \tag{3.12}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{K_4}{K_4T'_{do}s+1} &= \frac{\Delta E'_q}{\Delta E_{fd}} - K_5\Delta\delta \\
(K_4T'_{do}s+1)\Delta E'_q &= K_4(\Delta E_{fd} - K_5\Delta\delta) \\
K_4T'_{do}s\Delta E'_q &= -\Delta E'_q + K_4\Delta E_{fd} - K_4K_5\Delta\delta \\
s\Delta E'_q &= -\frac{K_5}{T'_{do}}\Delta\delta - \frac{1}{K_4T'_{do}}\Delta E'_q + \frac{1}{T'_{do}}\Delta E_{fd} \\
\Delta\dot{E}'_q &= -\frac{K_5}{T'_{do}}\Delta\delta - \frac{1}{K_4T'_{do}}\Delta E'_q + \frac{1}{T'_{do}}\Delta E_{fd} \tag{3.13}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{K_6}{K_6T'_{qo}s+1} &= \frac{\Delta E'_d}{K_7\Delta\delta} \\
(K_6T'_{qo}s+1)\Delta E'_d &= K_6(K_7\Delta\delta) \\
K_6T'_{qo}s\Delta E'_d &= -\Delta E'_d + K_6K_7\Delta\delta \\
s\Delta E'_d &= \frac{K_7}{T'_{qo}}\Delta\delta - \frac{1}{K_6T'_{qo}}\Delta E'_d \\
\Delta\dot{E}'_d &= \frac{K_7}{T'_{qo}}\Delta\delta - \frac{1}{K_6T'_{qo}}\Delta E'_d \tag{3.14}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{K_A}{sT_A+1} &= \frac{\Delta E_{fd}}{V_R} - (K_8\Delta\delta - K_9\Delta E'_q - K_{10}\Delta E'_d) \\
(sT_A+1)\Delta E_{fd} &= K_AV_R - K_AK_8\Delta\delta - K_AK_9\Delta E'_q - K_AK_{10}\Delta E'_d \\
sT_A\Delta E_{fd} &= -\Delta E_{fd} + K_AV_R - K_AK_8\Delta\delta - K_AK_9\Delta E'_q - K_AK_{10}\Delta E'_d \\
s\Delta E_{fd} &= -\frac{K_AK_8}{T_A}\Delta\delta - \frac{K_AK_9}{T_A}\Delta E'_q - \frac{K_AK_{10}}{T_A}\Delta E'_d - \frac{1}{T_A}\Delta E_{fd} + \frac{K_A}{T_A}V_R
\end{aligned}$$

$$\Delta \dot{E}'_{fd} = -\frac{K_A K_8}{T_A} \Delta \delta - \frac{K_A K_9}{T_A} \Delta E'_q - \frac{K_A K_{10}}{T_A} \Delta E'_d - \frac{1}{T_A} \Delta E_{fd} + \frac{K_A}{T_A} V_R \quad (3.15)$$

Matriks *state-space* untuk Model Heffron-Phillips Lanjutan (AHPM), yang diturunkan dari persamaan-persamaan yang telah dilinearisasi dan konstanta K, adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}'_d \\ \Delta \dot{E}'_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_B & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & -\frac{K_3}{M} & 0 \\ -\frac{K_5}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{1}{T'_{d0}K_4} & 0 & \frac{1}{T'_{d0}} \\ \frac{K_7}{T'_{q0}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T'_{q0}K_6} & 0 \\ -\frac{K_A K_8}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_9}{T_A} & -\frac{K_A K_{10}}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega_m \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \\ \Delta E'_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_M \\ V_R \end{bmatrix}$$

3.5.3 Pemodelan Heffron-Phillips Lanjutan Dengan SVC

Pada tahap ini, pemodelan AHPM yang telah dibahas sebelumnya akan diperluas dengan memasukkan *Static Var Compensator* (SVC), diikuti dengan analisis terhadap pengaruhnya pada stabilitas sistem. Persamaan yang dipakai untuk mengintegrasikan SVC kedalam model Heffron-Phillips lanjutan adalah sebagai berikut:

Kontrol SVC

$$C = \frac{2\alpha_{0,rad} - \sin(2\alpha_{0,rad})}{\pi} - 1 \quad (3.16)$$

$$C' = \frac{2 - 2\cos(\alpha_{0,rad})}{\pi} \quad (3.17)$$

$$V_{svcd0} = \frac{E_b \sin(\delta_0)}{C} \left(1 - \frac{XL}{2C(X_q + X_e)} \right) \quad (3.18)$$

$$V_{svcq0} = \frac{E_b \cos(\delta_0) + \frac{XL}{X'_d + X_e} (E'_{q0} - \frac{E_b \cos(\delta_0)}{C})}{2C} \quad (3.19)$$

$$V_{svc0} = \sqrt{V_{svcd0}^2 + V_{svcq0}^2} \quad (3.20)$$

$$d1 = \frac{E_b}{C} (\cos(\delta_0) - \sin(\delta_0)) \frac{XL}{2C(X_q + X_e)} \quad (3.21)$$

$$q1 = \frac{E_b \sin(\delta_0)}{2C} \left(-1 + \frac{XL}{C(X'_d + X_e)} \right) \quad (3.22)$$

$$c1 = \frac{1}{V_{svc0}} (V_{svcd0} \cdot d1 + V_{svcq0} \cdot q1) \quad (3.23)$$

$$q2 = \frac{XL}{2C(X'_d + X_e)} \quad (3.24)$$

$$c2 = \frac{1}{V_{svc0}} (V_{svcd0} \cdot 0 + V_{svcq0} \cdot q2) \quad (3.25)$$

$$d3 = \frac{C' \cdot XL \cdot E_b \sin(\delta_0) \left(X_q + \frac{XL}{2} \right)^2}{(2X_p(C(X'_d + X_e)))^2} \quad (3.26)$$

$$q3 = \frac{C' \cdot XL^2 \cdot E'_{q0} \left(X'_d + \frac{XL}{2} \right)}{4X_p(C(X'_d + X_e))^2} + \frac{C' \cdot XL \cdot E_b \cos(\delta_0) \left(X'_d + \frac{XL}{2} \right)^2}{2X_p(C(X'_d + X_e))^2} \quad (3.27)$$

$$c3 = \frac{1}{V_{svc0}} (V_{svcd0} \cdot d3 + V_{svcq0} \cdot q3) \quad (3.28)$$

Konstanta SVC

$$a = 2 \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^2 \left(X_q + X_e - \frac{1}{B_{svc}} \right) \left(X_q E_b \sin(\delta_0) \right)^2 \quad (3.29)$$

$$b = \left(X_q^2 + 2(X_q X_e - X_q \cdot \frac{1}{B_{svc}}) + X_e^2 - 2X_e \cdot \frac{1}{B_{svc}} + \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^2 \right)^2 \quad (3.30)$$

$$e = X_d'^2 + 2 \left(X'_d X_e - X'_d \cdot \frac{1}{B_{svc}} \right) + X_e^2 - 2X_e \cdot \frac{1}{B_{svc}} + \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^2 \quad (3.31)$$

$$c = \left[2E_{q0}^2 X_e \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^2 - 2E_{q0}^2 \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^3 - 2E_{q0}'^2 E_b X'_d \cos(\delta_0) \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^2 \right] \cdot X_d'^2 + \\ 2 \left(X'_d X_e - X'_d \cdot \frac{1}{B_{svc}} \right) + X_e^2 - 2X_e \cdot \frac{1}{B_{svc}} + \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^2 \quad (3.32)$$

$$d = 2 \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^2 \left(X'_d + X_e - \frac{1}{B_{svc}} \right) E_{q0}^2 + X_e^2 - 2E_{q0}^2 X_e \left(\frac{1}{B_{svc}} \right) + \left(E_{q0} \cdot \frac{1}{B_{svc}} \right)^2 + \\ (E_b X'_d \cos(\delta_0))^2 + 2E'_{q0} E_b X'_d \cos(\delta_0) \left(X_e - \frac{1}{B_{svc}} \right) \quad (3.33)$$

$$f = \sqrt{\frac{(X_q E_b(\delta_0))^2}{b} + \frac{d-c}{e}} \quad (3.34)$$

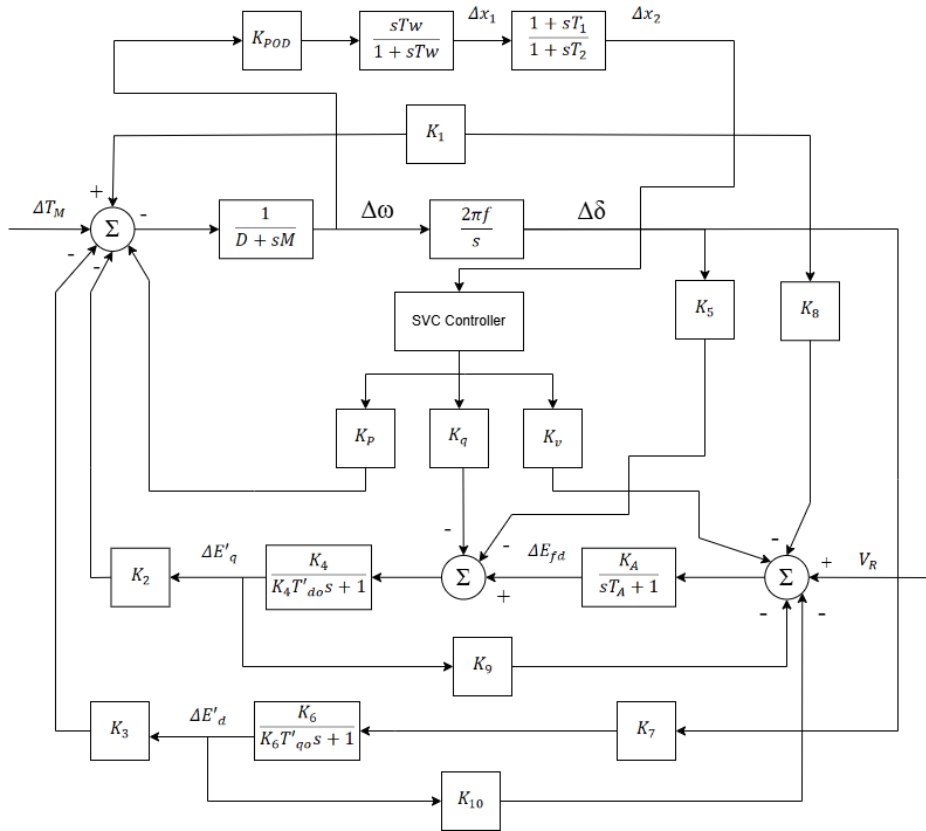
$$k_{p_a} = -2E'_{q0}E_b \sin(\delta_0) \cdot 2 \left(X'_d + X_e - \frac{1}{B_{svc}} \right) \left(X_q + X_e - \frac{1}{B_{svc}} \right) - \frac{2 \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^2 (X'_d + X_e - 2 \frac{1}{B_{svc}}) (E'_{q0}E_b \sin(\delta_0) (X_q + X_e - \frac{1}{B_{svc}}) - E_b^2 (X_q - X'_d))}{\left(2(X'_d + X_e - \frac{1}{B_{svc}})(X_q + X_e - \frac{1}{B_{svc}}) \right)^2} \quad (3.35)$$

$$k_{p_b} = \frac{C'X_L \left(\frac{X_L}{2} + X'_d \right) \left(\frac{E_b E'_{q0} \sin(\delta_0)}{C(X'_d + X_e)} + \frac{E_b^2 (X'_d + X_q) \sin(2\delta_0)}{2C^2 (X'_d + X_e)(X_q + X_e)} \right)}{2X_p C(X'_d + X_e)} + \frac{C'E_b^2 (X'_d + X_q) \sin(2\delta_0) X_L \left(\frac{X_L}{2} + X_q \right)}{2X_p C(X'_d + X_e)(X_q + X_e) \cdot 2C(X_q + X_e)} \quad (3.36)$$

$$k_q = \frac{E'_{q0} \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^2 (X'_d + X_e - \frac{1}{B_{svc}}) + \left(\frac{1}{B_{svc}} \right)^2 ((X_d + X_e - \frac{1}{B_{svc}}) E'_{q0} - (X_d - X'_d) \cos(2\delta_0))}{\left(X'_d + X_e - \frac{1}{B_{svc}} \right)^2} \quad (3.37)$$

$$k_v = \frac{\frac{a}{b} \frac{c-d}{e}}{2f} \quad (3.38)$$

Untuk model Heffron-phillips lanjutan yang terintegrasi dengan SVC adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3 Model Heffron-Phillips lanjutan dengan SVC

3.5.4 Matriks State-Space Heffron-Phillips Lanjutan dengan SVC

Model yang digambarkan pada Gambar 3.3 diturunkan menjadi serangkaian persamaan fungsi alih, yang kemudian diformulasikan ke dalam bentuk matriks *state-space*. Untuk persamaannya adalah sebagai berikut:

$$C_{1POD} = \frac{K_{POD}T_1}{T_2}$$

$$C_{2POD} = -\frac{K_{POD}T_1}{T_2T_W}$$

$$C_{3POD} = -\frac{1-T_1}{T_2}$$

$$U_{SVC} = (C_1\Delta\delta) + ((A_1 + C_{1POD})\Delta\omega) + (B_1\Delta E'_q) + (C_{2POD}\Delta x_1) + (C_{3POD}\Delta x_2) \quad (3.39)$$

$$\Delta\omega = \frac{1}{D+sM}(\Delta T_M - \Delta T_e)$$

$$(D + sM)\Delta\omega = \Delta T_M - \Delta T_e$$

$$sM\Delta\omega = -D\Delta\omega - \Delta T_e + \Delta T_M$$

$$s\Delta\omega = -\frac{D}{M}\Delta\omega - \frac{1}{M}\Delta T_e + \frac{1}{M}\Delta T_M$$

$$\Delta\dot{\omega} = -\frac{D}{M}\Delta\omega - \frac{1}{M}\Delta T_e + \frac{1}{M}\Delta T_M$$

$$\Delta\dot{\omega} = -\frac{1}{M}(K_p U_{SVC}) + \frac{1}{M}\Delta T_M - \frac{D}{M}\Delta\omega$$

$$\Delta\dot{\omega} = -\frac{K_p}{M}U_{SVC} + \frac{1}{M}\Delta T_M - \frac{D}{M}\Delta\omega$$

$$\Delta\dot{\omega} = -\frac{K_p}{M}((C_1\Delta\delta) + ((A_1 + C_{1POD})\Delta\omega) + (B_1\Delta E'_q) + (C_{2POD}\Delta x_1) + (C_{3POD}\Delta x_2)) + \frac{1}{M}\Delta T_M - \frac{D}{M}\Delta\omega$$

$$\Delta\dot{\omega} = -\frac{K_p}{M}C_1\Delta\delta - \frac{D}{M} - \frac{K_p}{M}A_1 - \frac{K_p}{M}C_{1POD}\Delta\omega - \frac{K_p}{M}B_1\Delta E'_q - \frac{K_p}{M}C_{2POD}\Delta x_1 - \frac{K_p}{M}C_{3POD}\Delta x_2 + \frac{1}{M}\Delta T_M - \frac{D}{M}\Delta\omega \quad (3.40)$$

$$\frac{K_4}{K_4T'do s+1} = \frac{\Delta E'_q}{\Delta E_{fd}}(K_q U_{SVC})$$

$$\begin{aligned}
(K_4 T'_{do} s + 1) \Delta E'_q &= K_4 (\Delta E_{fd} K_q U_{SVC}) \\
K_4 T'_{do} s \Delta E'_q &= -\Delta E'_q + K_4 \Delta E_{fd} - K_4 K_q U_{SVC} \\
s \Delta E'_q &= -\frac{1}{K_4 T'_{do}} \Delta E'_q + \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_q}{T'_{do}} U_{SVC} \\
\Delta \dot{E}'_q &= -\frac{1}{K_4 T'_{do}} \Delta E'_q + \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_q}{T'_{do}} U_{SVC} \\
\Delta \dot{E}'_q &= -\frac{1}{K_4 T'_{do}} \Delta E'_q + \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_q}{T'_{do}} (C1 \Delta \delta) + ((A1 + C_{1POD}) \Delta \omega) + \\
& (B1 \Delta E'_q) + (C_{2POD} \Delta x_1) + (C_{3POD} \Delta x_2) \\
\Delta \dot{E}'_q &= -\frac{1}{K_4 T'_{do}} \Delta E'_q + \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_q}{T'_{do}} C1 \Delta \delta - \frac{K_q}{T'_{do}} A1 - \frac{K_q}{T'_{do}} C_{1POD} - \\
& \frac{K_q}{T'_{do}} B1 \Delta E'_q - \frac{K_q}{T'_{do}} C_{2POD} \Delta x_1 - \frac{K_q}{T'_{do}} C_{3POD} \Delta x_2 \tag{3.41}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{K_A}{sT_A + 1} &= \frac{\Delta E_{fd}}{V_R} (U_{PSS} K_v U_{SVC}) \\
(sT_A + 1) \Delta E_{fd} &= K_A (V_R U_{PSS} K_v U_{SVC}) \\
sT_A \Delta E_{fd} &= -\Delta E_{fd} + K_A V_R + K_A U_{PSS} + K_A K_v U_{SVC} \\
s \Delta E_{fd} &= -\frac{1}{T_A} \Delta E_{fd} - \frac{K_A K_v}{T_A} U_{SVC} + \frac{K_A}{T_A} U_{PSS} + \frac{K_A}{T_A} V_R \\
\Delta \dot{E}'_{fd} &= -\frac{1}{T_A} \Delta E_{fd} - \frac{K_A K_v}{T_A} C1 \Delta \delta - \frac{K_A K_v}{T_A} A1 - \frac{K_A K_v}{T_A} C_{1POD} \Delta \omega - \frac{K_A K_v}{T_A} B1 \Delta E'_q - \\
& \frac{K_A K_v}{T_A} C_{2POD} \Delta x_1 - \frac{K_A K_v}{T_A} C_{3POD} \Delta x_2 + \frac{K_A}{T_A} C_{1PSS} \Delta \omega + \frac{K_A}{T_A} C_{2PSS} \Delta x_{1PSS} + \\
& \frac{K_A}{T_A} C_{2PSS} \Delta x_{2PSS} + \frac{K_A}{T_A} V_R \tag{3.42}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{K_{POD} sTw}{1 + sTw} &= \frac{\Delta x_1}{\Delta \omega} \\
(1 + sTw) \Delta x_1 &= (K_{POD} sTw) \Delta \omega \\
sTw \Delta x_1 &= -\Delta x_1 + K_{POD} sTw \Delta \omega \\
s \Delta x_1 &= K_{POD} s \Delta \omega - \frac{\Delta x_1}{Tw} \\
\Delta \dot{x}_1 &= K_{POD} \Delta \omega - \frac{1}{Tw} \Delta x_1 \tag{3.43}
\end{aligned}$$

$$\Delta \dot{x}_2 = K_{POD} \Delta \omega - \frac{K_{POD}}{T_w} \Delta x_1 - \frac{1}{T_2} \Delta x_2 \quad (3.44)$$

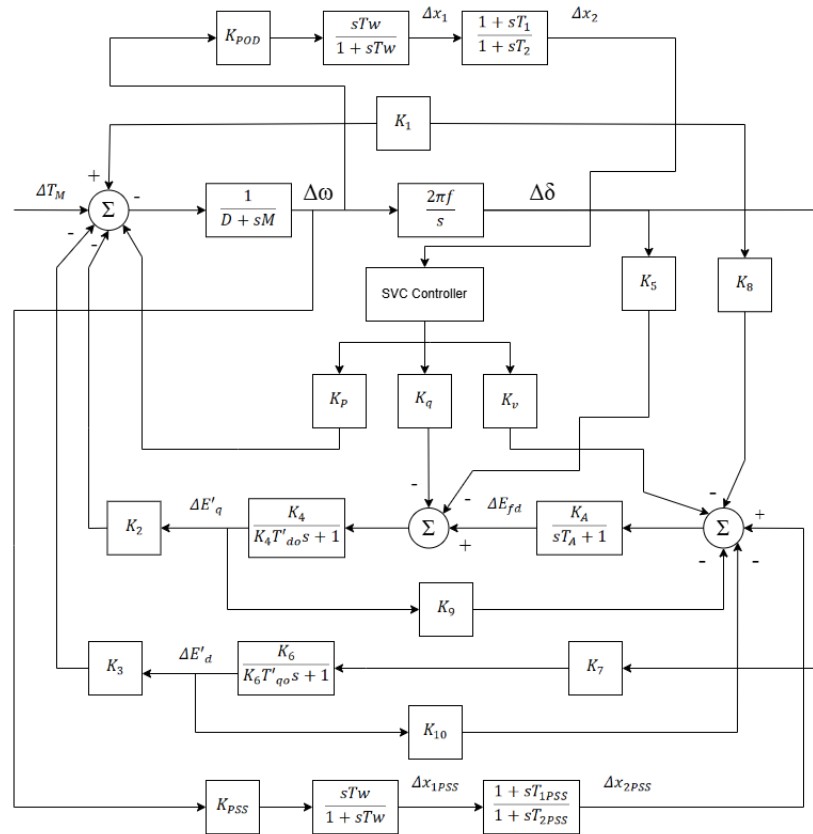
Matriks *state-space* yang dihasilkan dari persamaan fungsi alih ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega}_m \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}'_d \\ \Delta \dot{E}'_{fd} \\ \Delta \dot{x}_1 \\ \Delta \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{2H} & -\frac{D}{2H} - \frac{K_p}{2H} C_1 & -\frac{K_2}{2H} & -\frac{K_3}{2H} & 0 & -\frac{K_p}{2H} C_2 & -\frac{K_p}{M} C_3 \\ -\frac{K_5}{T'_{do}} & -\frac{K_q}{T'_{do}} C_1 & -\frac{1}{T'_{do} K_4} & 0 & \frac{1}{T'_{do}} & -\frac{K_q}{T'_{do}} C_2 & -\frac{K_q}{T'_{do}} C_3 \\ \frac{K_7}{T'_{qo}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T'_{qo} K_6} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_A K_8}{T_A} & -\frac{K_A K_V}{T_A} C_1 & -\frac{K_A K_9}{T_A} & -\frac{K_A K_{10}}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_V}{T_A} C_2 & -\frac{K_A K_V}{T_A} C_3 \\ 0 & K_{POD} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_w} & 0 \\ 0 & K_{POD} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{POD}}{T_w} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega_m \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ \frac{K_{POD}}{M} & 0 \\ \frac{K_{POD} T_1}{MT_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_M \\ V_R \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

3.5.5 Pemodelan Heffron-Phillips Lanjutan Dengan SVC dan PSS

Dalam analisis ini, Model Heffron-Phillips Lanjutan (AHPM) akan diperluas dengan memasukkan dinamika *Static Var Compensator* (SVC) dan *Power System Stabilizer* (PSS) secara bersamaan, kemudian diikuti dengan analisis kinerja sistem.

Untuk model Heffron-phillips lanjutan yang terintegrasi dengan SVC dan PSS adalah sebagai berikut:



Gambar 3.4 Model Heffron-Phillips Lanjutan dengan SVC dan PSS

3.5.6 Matriks State-space Heffron-Phillips Lanjutan dengan SVC dan PSS

Model yang digambarkan pada Gambar 3.4 diturunkan menjadi serangkaian persamaan fungsi alih, yang kemudian diformulasikan ke dalam bentuk matriks *state-space*. Untuk persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\frac{K_{PSS} sTw}{1+sTw} = \frac{\Delta x_{1PSS}}{\Delta \omega}$$

$$(1 + sTw)\Delta x_{1PSS} = (K_{PSS} sTw)\Delta \omega$$

$$sTw\Delta x_{1PSS} = -\Delta x_{1PSS} + K_{PSS} sTw\Delta \omega$$

$$s\Delta x_{1PSS} = K_{PSS} s\Delta \omega - \frac{\Delta x_{1PSS}}{Tw}$$

$$\Delta x_{1\dot{PSS}} = K_{PSS}\Delta \omega - \frac{1}{Tw}\Delta x_{1PSS} \quad (3.46)$$

$$\Delta x_{2\dot{PSS}} = K_{PSS}\Delta \omega - \frac{K_{PSS}}{Tw_{PSS}}\Delta x_1 - \frac{1}{T_{2PSS}}\Delta x_{2PSS} \quad (3.47)$$

Matriks *state-space* yang dihasilkan dari persamaan fungsi alih ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega_m \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_{1PSS} \\ \Delta x_{2PSS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{2H} - \frac{K_2}{2H} C_1 & -\frac{D}{2H} - \frac{K_p}{2H} C_{1POD} - \frac{K_p}{2H} A_1 & -\frac{K_2}{2H} - \frac{K_p}{2H} B_1 & -\frac{K_3}{2H} & 0 & -\frac{K_p}{2H} C_{2POD} & -\frac{K_p}{M} C_{3POD} & 0 & 0 \\ -\frac{K_5}{T'_{do}} - \frac{K_q}{T'_{do}} C_1 & -\frac{K_q}{T'_{do}} C_{1POD} - \frac{K_q}{T'_{do}} A_1 & -\frac{1}{T'_{do} K_4} - \frac{K_q}{T'_{do}} B_1 & 0 & \frac{1}{T'_{do}} & -\frac{K_q}{T'_{do}} C_{2POD} & -\frac{K_q}{T'_{do}} C_{3POD} & 0 & 0 \\ \frac{K_7}{T'_{q0}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T'_{q0} K_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_A K_8}{T_A} - \frac{K_A K_V}{T_A} C_1 & -\frac{K_A K_V}{T_A} C_{1POD} - \frac{K_A K_V}{T_A} A_1 - \frac{K_A}{T_A} C_{1PSS} & -\frac{K_A K_9}{T_A} - \frac{K_A K_V}{T_A} B_1 & -\frac{K_A K_{10}}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_V}{T_A} C_{2POD} & -\frac{K_A K_V}{T_A} C_{3POD} & -\frac{K_A}{T_A} C_{2PSS} & -\frac{K_A}{T_A} C_{3PSS} \\ 0 & K_{POD} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{Tw} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{POD} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{POD}}{Tw} & -\frac{1}{T_2} & 0 & 0 \\ 0 & K_{PSS} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{Tw_{PSS}} & 0 \\ 0 & K_{PSS} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{PSS}}{Tw_{PSS}} & -\frac{1}{T_{2PSS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_M \\ V_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ M & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ \frac{K_{POD}}{M} & 0 \\ \frac{K_{POD} T_1}{M} & 0 \\ \frac{MT_2}{K_{PSS}} & 0 \\ \frac{M}{K_{PSS} T_{1PSS}} & 0 \\ \frac{MT_{2PSS}}{MT_{2PSS}} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

3.5.7 Parameter Model Heffron-Phillips Lanjutan

Berdasarkan parameter sistem yang dirujuk dari buku *Power System Stability and Control* karya Prabha Kundur, serta referensi buku *Advances in Renewable Energies and Power Quality*, model AHPM diimplementasikan dengan nilai-nilai berikut:

Tabel 3.5.7 Parameter Model Heffron-Phillips Lanjutan

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Konstanta Inersia	H	5.344	Detik
2	Damping Koefisien	D	0.12	p.u
3	Reaktansi Sumbu-d	X_d	2.642	p.u
4	Reaktansi Sumbu-q	X_q	2.346	p.u
5	Reaktansi Transien Sumbu-d	X'_d	0.337	p.u
6	Reaktansi Transien Sumbu-q	X'_q	0.664	p.u
7	Konstanta Waktu Transien Sumbu-d	T'_{d0}	5.800	Detik
8	Konstanta Waktu Transien Sumbu-q	T'_{q0}	1	Detik
9	Frekuensi	f	50	Hz
10	Konstanta Gain Eksiter	KA	100	p.u
11	Konstanta Waktu Eksiter	TA	0.01	p.u
12	Tegangan <i>Infinite Bus</i>	E_b	1	p.u
13	Reaktansi Saluran	X_e	0.4	p.u
14	Tegangan Terminal Awal	V_{t0}	1	p.u
15	Daya Aktif Awal	P_{e0}	0.8	p.u

3.6 Formulasi Fungsi Objektif

Dalam penelitian ini, Algoritma Genetika digunakan untuk mencari parameter optimal pada kontroler SVC (*Power Oscillation Damping*) dan PSS. Tujuannya adalah untuk meningkatkan batas kestabilan sistem tenaga listrik dengan cara menggeser nilai eigen (*eigenvalue*) sistem.

Seperti yang diketahui, kestabilan sistem ditentukan oleh posisi nilai eigen (λ) pada bidang kompleks. Sistem dikatakan stabil jika seluruh nilai eigen berada di sebelah kiri sumbu imajiner, atau memiliki bagian riil negatif ($\sigma < 0$). Semakin besar nilai negatif pada bagian riil tersebut, maka redaman (*damping*) sistem terhadap osilasi akan semakin kuat.

Oleh karena itu, fungsi tujuan (J) pada optimasi ini disusun untuk meminimalkan nilai bagian riil terbesar ($\sigma_{\max}$) dari seluruh mode osilasi yang ada. Dengan kata lain, algoritma akan mencari Solusi paling optimal agar nilai eigen yang paling kanan (paling tidak stabil) digeser sejauh mungkin ke arah kiri.

Secara matematis, fungsi tujuan tersebut dituliskan sebagai berikut:

$$J = \min (\sigma_{\max})$$

$$J = \min (\max_i \{Re(\lambda_i)\}) \quad (3.49)$$

Dimana:

λ_i = Nilai eigen ke- i dari sistem

$Re(\lambda_i)$ = Bagian riil dari nilai eigen (σ)

$\sigma_{\max}$ = Nilai bagian riil paling maksimum

Agar hasil optimasi yang didapatkan tetap masuk akal dan bisa diterapkan pada peralatan fisik, pencarian nilai parameter dibatasi oleh batasan (*constraints*). Batasan nilai minimum dan maksimum untuk setiap parameter kontroler adalah sebagai berikut:

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max}$$

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$$

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan dalam penelitian ini, mengenai evaluasi respon dinamis sistem dan *eigenvalue* pada Model Heffron-Phillips Lanjutan (AHPM) serta efektivitas *Static Var Compensator* (SVC) dan *Power System Stabilizer* (PSS) dalam meningkatkan stabilitas sudut rotor sinyal kecil maka dapat disimpulkan bahwa,

1. Pemasangan SVC pada AHPM belum mampu memberikan torsi redaman yang memadai, ditandai dengan penurunan rasio redaman menjadi 0.3181. Namun, analisis respon waktu membuktikan bahwa SVC tetap efektif meningkatkan kinerja sistem, terbukti dari *settling time* yang jauh lebih singkat (3.9615 detik) dibandingkan kondisi tanpa kontroler (7.4404 detik).
2. Koordinasi SVC dan PSS pada model AHPM menghasilkan kinerja peredaman osilasi paling optimal, ditandai dengan pencapaian waktu tunak (*settling time*) tercepat pada sudut rotor ($\Delta\delta$) 3,1290 detik, kecepatan rotor ($\Delta\omega$) 3,2572 detik, dan tegangan terminal (ΔV_t) 3,5780 detik.
3. Integrasi SVC dan PSS pada model AHPM terbukti efektif meningkatkan stabilitas sistem secara optimal, ditunjukkan oleh posisi *eigenvalue* dominan ($\lambda = -1.185 + 0.357i$) di sisi kiri bidang-s dengan rasio redaman (ζ) mencapai 0.9575.
4. Koordinasi SVC dan PSS merupakan solusi optimal melalui integrasi peran yang berkesinambungan, di mana SVC menjaga stabilitas tegangan untuk memperkuat torsi sinkronisasi, sementara PSS secara khusus menyediakan torsi redaman tambahan guna meredam osilasi sudut rotor.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan penulis untuk penelitian berikutnya adalah sebagai berikut:

1. Mengoptimasi ulang parameter kontrol SVC dan PSS menggunakan algoritma metaheuristik modern lainnya (seperti PSO atau algoritma lebah). Tujuannya adalah untuk mencari rasio redaman yang lebih tinggi atau waktu settling yang lebih cepat, sehingga meningkatkan kinerja peredaman sistem secara maksimal.
2. Mengembangkan implementasi model AHPM terkoordinasi ini pada sistem multi-mesin. Pengembangan ini bertujuan untuk menganalisis dan meredam mode osilasi antar-area (inter-area modes) yang merupakan tantangan stabilitas yang lebih kompleks dalam jaringan listrik skala besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Agrawal, F. A. Khan, dan S. Mahapatra, "Next Generation Heffron-Phillips Model for Damping Power System Oscillations based on a Novel Meta-Heuristic Snake Optimization Algorithm," *Science & Technology Asia*, vol. 29, no. 1, doi: 10.14456/scitechasia.2024.12.
- [2] P. Patel, J. Patel, dan H. Sidhpuria, "Study of Excitation System and Power System Stabilizer for Single Machine Infinite Bus System," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, hlm. 277-280, Jun 2021.
- [3] S. B. Sahare dan U. G. Bonde, "Transient Stability Enhancement in Multi-Machine Power System by using Power System Stabilizer (Pss) and Static Var Compensator (Svc)," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, hlm. 94-103, Feb 2020.
- [4] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, 1 ed. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [5] M. M. Biswas dan K. K. Das, "Voltage Level Improving by Using Static VAR Compensator (SVC)," *Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal Publisher: Global Journals Inc*, vol. 11, no. 5, hlm. 13–18, Jul 2011.
- [6] H. Q. Nguyen, D. N. Nguyen, dan L. Q. Vinh, "Design of power system stabilizers based on the model of single machine infinite bus power system," *Journal of Science and Technology - HaUI*, vol. 60, no. 5, hlm. 44–49, Mei 2024, doi: 10.57001/huih5804.2024.155.
- [7] R. L. Haupt dan S. E. Haupt, *PRACTICAL GENETIC ALGORITHMS SECOND EDITION*, Second. John Wiley & Sons, Inc., 2004.

- [8] M. R. Djalal, I. Robandi, dan M. A. Prakasa, "Stability Enhancement of Sulselrabar Electricity System Using Mayfly Algorithm Based on Static VAR Compensator and Multi-Band Power System Stabilizer PSS2B," *IEEE Access*, vol. 11, hlm. 57319–57340, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3283598.
- [9] M. N. Absar, M. F. Islam, dan A. Ahmed, "Power quality improvement of a proposed grid-connected hybrid system by load flow analysis using static var compensator," *Heliyon*, vol. 9, no. 7, Jul 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17915.
- [10] A. Javadian, M. Zadehbagheri, M. J. Kiani, S. Nejatian, dan T. Sutikno, "Modeling of static var compensator-high voltage direct current to provide power and improve voltage profile," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 12, no. 3, hlm. 1659–1672, Sep 2021, doi: 10.11591/ijpeds.v12.i3.pp1659-1672.
- [11] B. Wang, X. Yao, Y. Jiang, C. Sun, dan M. Shabaz, "Design of a Real-Time Monitoring System for Smoke and Dust in Thermal Power Plants Based on Improved Genetic Algorithm," *J. Healthc. Eng.*, 2021, doi: 10.1155/2021/7212567.
- [12] P. Ayu Andira, E. Suswaini, M. Radzi Rathomi, M. Raja Ali Haji, dan J. Politeknik Senggarang, "Optimasi Penempatan Kapasitor Bank Menggunakan Algoritma Genetika Untuk Mengurangi Rugi Daya Pada Sistem Distribusi Daya Listrik (Studi Kasus : PT. PLN Rayon Bintang Center)," vol. 09, no. 02, hlm. 82–88, 2020.
- [13] A. Wibisono, E. Adriono, H. Amurwojakti, A. I. Wibisono Universitas Katolik Soegijapranata Jl Pawiyatan Luhur, dan B. Dhuwur, "ELKOM (Jurnal Elektronika dan Komputer) Optimalisasi Instalasi Posisi Modul Photovoltaic pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya berbasis Metode Optimasi Algoritma Genetika," vol. 18, no. 1, 2025.

- [14] A. Fattollahi, M. Dehghani, dan M. R. Yousefi, "Analysis and Simulation Dynamic Behavior of Power System Equipped with PSS and Excitation System Stabilizer," *Signal Processing and Renewable Energy*, Mar 2022.
- [15] K. Choden, Sonam, S. Tenzin, Karchung, dan Y. Seldon, "Enhancement Of Voltage Stability In The Power System Using Genetic Algorithm," *Journal of Applied Engineering, Technology and Management*, vol. 2, no. 1, hlm. 65–77, Jun 2022, doi: 10.54417/jaetm.v2i1.59.
- [16] Zulfahri dan E. Zondra, "Optimasi Penempatan Optimal Peralatan Svc Dengan Metode Algoritma Genetika," *Jurnal Teknik*, hlm. 114-120, Apr 2020.
- [17] B. Zaker dan G. B. Gharehpetian, "Using On-Line Measurements To Identify Parameters of Improved Heffron-Phillips Model Including Excitation System And Governor," dalam *Advances In Renewable Energies And Power Quality*, M. P. Donsión dan G. Vitale, Ed., Cambridge Scholars Publis, hlm. 403–420, 2020.
- [18] M. Buang dan O. Ronhab Patandung, "Small Signal Stability Sistem Tenaga Listrik," *Tahun 2024| 24 Journal Of Natural Science And Technology Adpertisi*, vol. 4, no. 2, hlm. 24–28, 2024.
- [19] N. Jankovic, J. Roldan-Perez, M. Prodanovic, J. A. Suul, S. D'Arco, dan L. R. Rodriguez, "Power oscillation damping method suitable for network reconfigurations based on converter interfaced generation and combined use of active and reactive powers," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 149, Jul 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109010.
- [20] C. Supriyadi Ali Nandar, "Power Oscillation Damping Control using Robust Coordinated Smart Devices," *TELKOMNIKA*, vol. 9, no. 1, hlm. 65–72, 2011.
- [21] Q. E. Muftikhali, A. Yansen, F. Danar Yudhistira, A. Kusumawati, dan S. Hidayat, "Optimasi Algoritma Genetika Dalam Menentukan Rute Optimal Topologi Cincin Pada Wide Area Network," *Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer*, hlm. 43-48, Feb 2018.

- [22] I. Hattabi *dkk.*, “Enhanced power system stabilizer tuning using marine predator algorithm with comparative analysis and real time validation,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, Des 2024, doi: 10.1038/s41598-024-80154-2.
- [23] Bhan V, Hashmani A, Memon A, “An Optimized Proportional Integral Derivative (PID) based Power System Stabilizer (PSS) for Damping of Active Power Oscillations,” *Sukkur IBA Journal of Emerging Technologies*, vol. 5, no. 2, hlm. 42-48, Dec 2022.