

Studi Literatur Terkini Model Generator Heffron-Phillips

Ari Puji Prasetyo^{a*}

^a Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe

* Email: prasetiyo@sttrcepu.ac.id

Diterima : 29-06-2025

- Direview : 30-06-2025

- Diterbitkan : 02-07-2025

Intisari

Kajian literatur ini membahas penggunaan dan pengembangan model Heffron–Phillips dalam delapan artikel ilmiah terkini yang berfokus pada kestabilan dinamis sistem tenaga listrik. Model Heffron–Phillips secara luas diterapkan dalam konfigurasi SMIB untuk representasi linier dinamika generator sinkron, serta digunakan sebagai dasar dalam desain dan optimasi berbagai jenis pengendali, seperti PSS, pengendali redaman tambahan, dan AVR. Beberapa studi melakukan modifikasi model ini untuk mengakomodasi perangkat modern seperti IPFC, sistem *grid-following inverter*, dan algoritma berbasis pembelajaran mesin. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa model ini tetap relevan dalam mendukung analisis sinyal kecil, perancangan pengendali adaptif, serta validasi performa algoritma optimasi. Namun, keterbatasannya dalam menangani osilasi frekuensi ultra-rendah dan dinamika sistem berbasis energi terbarukan menuntut pengembangan model yang lebih kompleks atau respons frekuensi nonlinier. Dengan demikian, model Heffron–Phillips tetap menjadi fondasi penting dalam pemodelan sistem tenaga, tetapi perlu disesuaikan agar kompatibel dengan arsitektur jaringan modern yang semakin kompleks dan dinamis.

Kata Kunci: Heffron–Phillips; Phillips–Heffron; Generator sinkron; Mesin sinkron; Stabilitas dinamis

Abstract

This literature review examines the application and development of the Heffron–Phillips model across eight recent scholarly articles focused on the dynamic stability of electric power systems. The Heffron–Phillips model is widely utilized in SMIB configurations to linearly represent the dynamics of synchronous generators and serves as a foundation for designing and optimizing various controllers, such as PSS, supplementary damping controllers, and AVR. Several studies extend or modify this model to incorporate modern components, including IPFC, grid-following inverters, and machine learning-based algorithms. The review finds that the model remains highly relevant for small-signal analysis, adaptive controller design, and algorithm performance validation. However, its limitations in addressing ultra-low frequency oscillations and the nonlinear dynamics of renewable-based systems highlight the need for more advanced or frequency-domain models. Overall, the Heffron–Phillips model continues to serve as a critical foundation in power system modeling, though it must be adapted to remain effective in the increasingly complex and dynamic architecture of modern power networks.

Keywords: Heffron–Phillips; Phillips–Heffron; Synchronous generator; Synchronous machine; Dynamic stability

1. Pendahuluan

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan salah satu aspek paling penting dalam menjaga keandalan pasokan energi, terutama dalam menghadapi gangguan kecil yang dapat menyebabkan osilasi frekuensi rendah atau *low-frequency oscillations* (LFO). Fenomena ini terjadi karena interaksi dinamis antara mesin sinkron, sistem eksitasi, dan jaringan, yang apabila tidak ditangani dapat berujung pada pelemahan redaman osilasi, atau bahkan *blackouts* (Kundur, 1994). Oleh karena itu, analisis stabilitas dinamis dan perancangan sistem kendali seperti *power system stabilizer* (PSS) menjadi fokus utama dalam penelitian sistem tenaga listrik.

Salah satu model matematis yang paling banyak digunakan untuk melakukan analisis dinamika kecil sinyal adalah model Heffron–Phillips (HP). Model ini diperkenalkan oleh Heffron dan Phillips pada tahun 1952 sebagai representasi linier orde kecil dari sistem pembangkitan, yang melibatkan dinamika mesin sinkron dan sistem pengatur tegangan otomatis (AVR). Model HP terdiri dari enam konstanta (K_1 hingga K_6) yang merepresentasikan pengaruh perubahan sudut rotor dan tegangan terhadap momen elektromagnetik dan tegangan terminal (Heffron and Phillips, 1952). Karena kesederhanaan

dan kemampuannya dalam menangkap dinamika utama dari sistem, model ini telah digunakan secara luas dalam studi kecil sinyal dan desain PSS (Vittal *et al.*, 2020).

Berbagai pendekatan telah diusulkan untuk mengidentifikasi parameter model HP secara akurat, terutama dari data operasional nyata. Salah satu pendekatan populer adalah penggunaan metode *Genetic Algorithm* (GA) untuk melakukan pencocokan parameter dari data hasil pengukuran berbasis *Phasor Measurement Unit* (PMU). Zaker *et al.* Menunjukkan bahwa GA mampu mengidentifikasi parameter model HP dan AVR secara simultan, dengan hasil validasi yang sangat baik terhadap sistem SMIB (Zaker, Gharehpetian and Moaddabi, 2014).

Seiring dengan perkembangan teknologi pembangkit berbasis *Voltage-Source Converter* (VSC), adaptasi model HP juga menjadi suatu fokus penting. Tan *et al.* mengusulkan model HP yang dimodifikasi untuk pembangkit VSC dengan kontrol arus, dengan memperhitungkan pengaruh dari *Phase-Locked Loop* (PLL). Hasilnya menunjukkan bahwa dinamika small-signal dari unit VSC dapat direpresentasikan secara setara dengan generator sinkron, memungkinkan penggunaan prinsip dan desain PSS konvensional (Tan, Geng and Yang, 2018).

Lebih lanjut, Agrawal *et al.* mengembangkan suatu model lanjutan yang disebut dengan *Advanced Heffron–Phillips Model* (AHPM) (Agrawal, Khan and Mahapatra, 2024). Model ini menambahkan variabel keadaan dan konstanta penguat (hingga 10 parameter) untuk mencerminkan dinamika sistem yang lebih kompleks, serta menggunakan algoritma *Snake Optimization* untuk *tuning* parameter. Evaluasi kinerja AHPM pada sistem SMIB menunjukkan peningkatan signifikan dalam peredaman osilasi, termasuk waktu tunak di bawah 2 detik dan rasio redaman mencapai 99,3%.

Literatur-literatur tersebut menegaskan bahwa model generator Heffron–Phillips tidak hanya penting secara historis, tetapi juga tetap relevan dan adaptif terhadap kebutuhan sistem tenaga modern. Oleh karena itu, dalam artikel ini akan dilakukan tinjauan terhadap penelitian-penelitian terkini yang mengembangkan, mengadaptasi, atau mengimplementasikan model HP, guna mengidentifikasi metode identifikasi terbaru, validasi eksperimental, ataupun arah riset masa depan.

2. Kerangka Teori

Model Heffron–Phillips merupakan model linier orde-4 dari sebuah mesin sinkron terhubung ke bus tak berhingga (*infinite bus*), yang menyertakan dinamika generator sinkron (orde-3) dan suatu AVR (orde-1) (Zaker, Gharehpetian and Moaddabi, 2014). Model ini merepresentasikan interaksi antara mesin sinkron, sistem eksitasi, dan tegangan terminal melalui enam konstanta dinamis (Kundur, 1994). Model ini diperkenalkan untuk mempelajari pengaruh sistem eksitasi terhadap operasi dari mesin sinkron yang berada dalam kondisi kurang ter-eksitasi (*underexcited*) (Heffron and Phillips, 1952).

2.1. Persamaan Ayun

Swing equation atau persamaan ayun dari dari model HP, yang menyatakan pergerakan rotor, diberikan oleh

$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta T_m - \Delta T_e - D\Delta\omega \quad (1)$$

dengan H merupakan konstanta inersia mesin (s), $\Delta\omega$ adalah deviasi kecepatan sudut rotor, ΔT_m menyatakan deviasi torsi mekanik (pu), ΔT_e mewakili deviasi torsi elektrik (pu), dan D memberikan nilai koefisien peredaman (pu). Persamaan (1) menggambarkan keseimbangan torsi dalam mesin sinkron akibat dari gangguan kecil, dan menjadi dasar model dinamis rotor (Kundur, 1994; Sauer, Pai and Chow, 2017).

2.2. Dinamika Tegangan Internal

Tegangan internal dari mesin sinkron memiliki dinamika yang mengikuti persamaan

$$\frac{d\Delta E'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_{do}} \Delta E'_q + \frac{1}{T'_{do}} \Delta E_{fd} \quad (2)$$

dengan E'_q menyatakan tegangan internal sumbu- q (pu), E_{fd} adalah tegangan eksitasi medan (*field voltage*) (pu), dan T'_{do} merupakan konstanta waktu eksitasi transien (s). Persamaan (2) menunjukkan dinamika respons sistem eksitasi terhadap perubahan kecil dalam tegangan internal (Kundur, 1994; Vittal *et al.*, 2020).

2.3. Model Regulator Tegangan

Regulator tegangan otomatis yang digunakan pada model HP diberikan oleh persamaan

$$\frac{d\Delta E_{fd}}{dt} = -\frac{1}{T_A} \Delta E_{fd} + \frac{K_A}{T_A} (\Delta V_r - \Delta V_t) \quad (3)$$

dengan T_A merupakan konstanta waktu AVR (s), K_A adalah *gain* dari AVR, ΔV_r menyatakan perubahan nilai tegangan referensi (pu), dan ΔV_t adalah perubahan tegangan terminal (pu). Model AVR ini mempertahankan tegangan terminal pada level referensi dengan mengatur eksitasi (Kundur, 1994; Sauer, Pai and Chow, 2017).

2.4. Representasi State-Space

Model HP dapat dinyatakan ke dalam bentuk *state-space* linier yang melibatkan enam konstanta dinamis K_1 sampai K_6 yang dihitung dari parameter sistem. Identifikasi parameter ini dapat dilakukan misalnya menggunakan data pengukuran *online* dan *Subspace-based State Space System Identification* (4SID) (Karrari and Malik, 2004) atau metode GA dengan data *online* (Zaker, Gharehpetian and Moaddabi, 2014).

Variabel keadaan yang dipergunakan adalah deviasi sudut rotor $\Delta\delta$ (rad), deviasi kecepatan sudut rotor $\Delta\omega$ (pu), deviasi tegangan internal sumbu- q $\Delta E'_q$ (pu), dan deviasi tegangan medan ΔE_{fd} (pu). Variabel masukan dalam hal ini adalah perubahan torsi mekanik ΔT_m (pu) dan perubahan tegangan referensi ΔV_r (pu). Dengan persamaan matriks-vektor, model HP ini selanjutnya dapat dituliskan sebagai (Kundur, 1994; Wood, Wollenberg and Sheblé, 2013):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{Cx} \quad (4)$$

dengan

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta V_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta V_t \end{bmatrix}$$

serta

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{2H} & -\frac{D}{2H} & -\frac{K_2}{2H} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} \\ 0 & 0 & -\frac{K_A K_5}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ K_3 & K_4 & K_5 & K_6 \end{bmatrix}$$

Nilai K_1 sampai K_6 dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$K_1 = \frac{X_d - X'_d}{X'_d} \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{V_t(X_d - X'_d)}{X'_d} \quad (6)$$

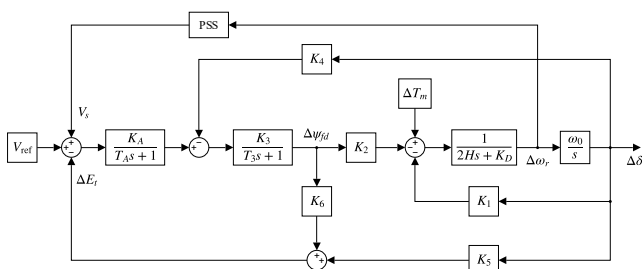
$$K_3 = \frac{V_t E'_q}{X'_d} \cos \delta_0 \quad (7)$$

$$K_4 = \frac{V_t}{X_d'} \sin \delta_0 \quad (8)$$

$$K_5 = -\frac{E'_q}{X'_d} \sin \delta_0 \quad (9)$$

$$K_6 = \frac{I}{X_d'} \cos \delta_0 \quad (10)$$

yang mana X_d merupakan reaktansi sinkron (pu), X_d' adalah reaktansi transien (pu), dan δ_0 menyatakan sudut rotor pada titik operasi (rad). Diagram blok dari model Heffron–Phillips yang dilengkapi PSS diberikan pada Gambar 1 (Kamarposhti *et al.*, 2022).



Gambar 1. Diagram blok model HP dengan PSS.

3. Metodologi

Pencarian publikasi dilakukan dengan menggunakan basis data Scopus. Kata kunci yang digunakan untuk melakukan *query* adalah “Heffron Phillips” tanpa tanda hubung “-” karena terkadang terdapat artikel yang menuliskan model HP sebagai Phillips–Heffron. Kata kunci ini dicari pada bagian judul, abstrak, dan kata kunci dari artikel. Kriteria “terkini” untuk publikasi adalah diterbitkan pada tahun 2025.

Mempergunakan konfigurasi tersebut, proses pencarian memberikan 8 artikel dengan komposisi 7 artikel jurnal dan 1 artikel *proceeding* (Tabel 1). Semua artikel relevan untuk diulas karena membahas atau menerapkan model HP.

Tabel 1. Daftar publikasi hasil pemcarian.

No.	Publikasi	Penulis	Judul
1	Jurnal	Micev <i>et al.</i>	A Novel Approach for Estimation of Synchronous Machine Automatic Voltage Regulation System Parameters
2	Jurnal	Khadanga <i>et al.</i>	A Novel Modified Gorilla Troops Optimizer Algorithm for Interline Power Flow Controller-Based Damping Controller Design
3	Jurnal	Muthukumari <i>et al.</i>	Integer and fractional-order model matching controller design algorithm with generalized reference model formulation for nonlinear time delay servo and regulatory

			problems: A real-time validation
4	Jurnal	Wang <i>et al.</i>	Multimodal Unified Control Method Using the Lie Derivative and Lyapunov Theory for Enhancing the Dynamic Stability of Power Systems with 100% Renewable Energy
5	<i>Proceeding</i>	Chakraborty <i>et al.</i>	Oppositional artificial rabbit optimization for the optimal tuning of single input power system stabilizer
6	Jurnal	Aleikish <i>et al.</i>	Synergistic Meta-Heuristic Adaptive Real-Time Power System Stabilizer (SMART-PSS)
7	Jurnal	Li <i>et al.</i>	The Impact of Terminal-Voltage Control on the Equilibrium Points and Small-Signal Stability of GFL-VSC Systems
8	Jurnal	Wang <i>et al.</i>	Ultra-Low Frequency Oscillation Damping Control Method for Hydro-Photovoltaic Integrated Systems

Pembahasan meliputi latar belakang, permasalahan yang akan diselesaikan, solusi yang ditawarkan, metode/algorithm yang dipergunakan, peran model HP dalam penelitian, konfigurasi dan langkah-langkah pengujian, hasil yang diperoleh, serta kontribusi yang diberikan. Urutan pembahasan adalah berdasarkan abjad judul artikel.

4. Hasil dan Pembahasan

Micev *et al.* menyajikan pendekatan inovatif untuk estimasi parameter sistem pengatur tegangan otomatis (AVR) pada mesin sinkron yang beroperasi dalam sistem tenaga (Micev *et al.*, 2025). Estimasi parameter menjadi penting karena akurasi model sangat memengaruhi kualitas simulasi, desain pengendali, dan analisis stabilitas sistem tenaga. Metode tradisional untuk estimasi parameter, seperti pengujian lepas-beban atau pemutusan sambungan generator dari jaringan, memiliki kekurangan seperti potensi gangguan operasi dan kerugian ekonomi. Penelitian ini memanfaatkan model Heffron–Phillips orde tiga untuk menyederhanakan kompleksitas sistem tanpa mengorbankan ketepatan deskripsi dinamis generator sinkron dan AVR. Metode ini menggunakan algoritma hibrida *Simulated Annealing–Cooperation Search Algorithm* (SA-CSA) untuk mengoptimalkan parameter berdasarkan respons tegangan generator terhadap perubahan langkah (*step change*) yang kecil pada nilai referensi tegangan. Uji coba dilakukan melalui simulasi pada sistem eksitasi generator 40 MVA dari PLTA Perucica dan verifikasi eksperimental pada mesin sinkron 120 MVA dari PLTA Piva. Estimasi parameter dari metode ini dibandingkan dengan data katalog pabrikan, dan hasilnya menunjukkan kesesuaian yang tinggi. Pendekatan ini memiliki keunggulan signifikan dibandingkan metode lain karena tidak memerlukan pemutusan sambungan generator dari jaringan, serta cukup dengan menginjeksikan gangguan kecil pada sinyal referensi tanpa membahayakan stabilitas sistem secara keseluruhan. Secara

keseluruhan, pendekatan ini menjawab kebutuhan akan suatu metode estimasi parameter yang praktis, akurat, dan aman bagi sistem tenaga yang sedang beroperasi. Penggunaan SA-CSA memungkinkan pencarian solusi optimal yang efisien dan tidak terjebak pada minimum lokal. Kombinasi antara kesederhanaan prosedur uji, keakuratan hasil, dan fleksibilitas implementasi menjadikan pendekatan ini sangat relevan dalam praktik sistem tenaga modern. Kontribusinya penting untuk mendukung pengembangan model yang andal, serta dapat diterapkan dalam desain kontrol dan evaluasi kinerja dinamis generator sinkron secara lebih efektif.

Khadanga *et al.* mengembangkan algoritma *Modified Gorilla Troops Optimizer* (mGTO) sebagai alternatif meta-heuristik yang efisien untuk menyetel pengendali redaman berbasis *Interline Power Flow Controller* (IPFC) (Khadanga *et al.*, 2025). Dengan latar belakang peningkatan kebutuhan akan pengendali stabilitas sistem tenaga akibat integrasi sumber energi terbarukan dan struktur jaringan yang kompleks, penelitian ini menggunakan pendekatan IPFC dalam sistem tipe SMIB. IPFC sendiri merupakan suatu perangkat *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS) yang memiliki fleksibilitas tinggi dalam pengaturan aliran daya serta kompensasi tegangan. Studi ini memodifikasi model generator Phillips–Heffron untuk mengakomodasi keberadaan IPFC, serta merancang pengendali tambahan berbasis struktur lead-lag yang parameternya ditala menggunakan mGTO. Penelitian ini menilai efektivitas algoritma dengan membandingkannya terhadap versi asli GTO dan beberapa algoritma evolusioner lainnya. Hasilnya menunjukkan bahwa mGTO menawarkan performa yang lebih baik dalam hal stabilitas, waktu komputasi, dan kualitas solusi. Selain itu, algoritma ini mampu menghindari jebakan pada solusi lokal dan menghasilkan penyetelan optimal yang lebih cepat dan akurat. Penerapan mGTO pada permasalahan stabilitas osilasi frekuensi rendah menunjukkan kemampuannya dalam menghasilkan kinerja sistem yang stabil dan respons dinamis yang lebih halus. Algoritma ini menjadi solusi yang menjanjikan untuk pengendalian stabilitas sistem daya berbasis IPFC, yang dikenal kompleks dan sangat sensitif terhadap parameter pengendali. Secara praktis, mGTO juga dapat diadaptasi untuk konfigurasi sistem multi-mesin dan kondisi operasi jaringan yang lebih realistis, menjadikannya relevan untuk implementasi skala industri.

Muthukumari *et al.* memperkenalkan algoritma desain pengendali berdasarkan pemadanan model orde integer dan fractional yang mampu menangani sistem nonlinier dengan tundaan waktu (Muthukumari, Kanagalakshmi and Sunil Kumar, 2025). Desain pengendali dilakukan dalam domain frekuensi menggunakan metode pemadanan *Approximate Generalized Time Moments* (AGTM) dan *Approximate Generalized Markov Parameters* (AGMP). Pendekatan dua tahap ini memungkinkan perancangan pengendali orde tinggi yang kemudian didekati dengan pengendali orde lebih rendah berdasarkan titik ekspansi dalam bidang- s . Masalah utama dalam teknik pemadanan model adalah pemilihan model referensi yang tepat, terutama ketika sistem mengalami keterlambatan waktu atau nonlinieritas saturasi. Untuk itu,

penelitian ini mengusulkan formulasi model referensi umum berbasis pengendali *Linear Quadratic Regulator with Integral* (LQRI), yang dirancang untuk memenuhi spesifikasi performa baik dalam pelacakan titik tetap (*servo*) maupun penolakan gangguan (*regulatory*). Validasi dilakukan pada sistem nyata berupa pengaturan level air dalam tangki kerucut serta simulasi sistem tenaga dengan osilasi frekuensi rendah, menggunakan *platform* perangkat keras Texas Instruments TMDSDOCK28379D *experimenter kit*. Hasil percobaan dan simulasi menunjukkan bahwa metode ini berhasil mencapai performa yang diharapkan dalam berbagai kondisi operasi dan jenis sistem. Kemampuan dalam mengakomodasi waktu tunda dan perilaku nonlinier sistem menjadikan pendekatan ini cocok untuk pengendalian sistem industri, termasuk dalam aplikasi energi, proses kimia, dan robotika. Kontribusi dari penelitian terletak pada generalisasi desain model referensi serta kemampuan merealisasikan pengendali praktis dalam sistem nyata.

Wang *et al.* memfokuskan penelitiannya pada pengembangan strategi kontrol terpadu multimodal atau *Multimodal Unified Control* (MUC) untuk meningkatkan stabilitas dinamis sistem tenaga berbasis 100% energi terbarukan (G. Wang *et al.*, 2025). Permasalahan utama yang diangkat adalah instabilitas dinamis multimodal (MDI) yang muncul akibat karakteristik inersia rendah dan respons cepat dari sumber daya energi *inverter-based* seperti PV dan turbin angin. Dengan memanfaatkan model Heffron–Phillips yang dimodifikasi dan teori derivatif Lie, studi ini menyusun model subsistem eksternal orde tiga untuk *Grid-Forming Renewable Energy System* (GFM-RES). Pengembangan arsitektur kontrol dilakukan menggunakan pendekatan Lyapunov untuk menjamin stabilitas sistem dalam domain waktu. Sistem kontrol dirancang untuk bekerja tanpa membutuhkan perubahan struktur perangkat keras atau penambahan perangkat kompensasi, sehingga sangat efisien dari sisi biaya implementasi. Uji coba dilakukan pada sistem IEEE 11-bus yang dimodifikasi sepenuhnya menggunakan energi terbarukan, dengan hasil yang menunjukkan bahwa MUC secara signifikan memperbaiki stabilitas multimodal dan meredam osilasi yang diinduksi oleh gangguan kecil. Secara keseluruhan, MUC memperkenalkan paradigma baru dalam pengendalian sistem tenaga modern dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi. Metode ini relevan untuk sistem masa depan yang berorientasi pada desentralisasi dan integrasi energi bersih, sekaligus menanggulangi tantangan besar terkait redaman dan sinkronisasi sistem daya inverter-based. Penelitian ini memberikan kontribusi teoritis dan praktis bagi pengembangan sistem tenaga bebas karbon yang stabil dan andal.

Chakraborty *et al.* menerapkan algoritma metaheuristik yang berbasis *Oppositional Artificial Rabbit Optimization* (OARO) untuk menala PSS tipe input tunggal secara optimal (Chakraborty *et al.*, 2025). Latar belakang penelitian ini adalah tantangan dalam meredam osilasi frekuensi rendah pada sistem tenaga, khususnya pada sistem SMIB, yang cenderung mengalami ketidakstabilan sudut rotor akibat interaksi dinamis antara generator dan jaringan. Meskipun PSS telah lama digunakan, pendekatan konvensional dengan

parameter tetap sulit mengakomodasi variasi beban dan topologi jaringan, sehingga muncul kebutuhan akan suatu algoritma optimasi yang lebih canggih dan adaptif. Metode OARO dikembangkan berdasarkan konsep pembelajaran oposisi dan inspirasi perilaku kelinci dalam lingkungan pencarian solusi. Dalam studi ini, model Heffron–Phillips digunakan untuk menggambarkan dinamika sistem, sementara OARO menala parameter PSS untuk memaksimalkan redaman pada mode osilasi dominan. Eksperimen dilakukan pada berbagai skenario beban untuk menunjukkan ketahanan algoritma terhadap perubahan kondisi operasi. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa OARO memberikan hasil yang lebih konsisten dan stabil dibandingkan algoritma standar lainnya, seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) atau *Differential Evolution*, baik dari sisi kecepatan konvergensi maupun kualitas solusi akhir. Studi ini menyumbang pemahaman baru dalam penggunaan teknik optimasi cerdas untuk masalah penalaan PSS di sistem tenaga yang kompleks dan berubah-ubah. Keunggulan metode OARO dalam menangani lingkungan nonlinier, multivariabel, dan dengan banyak puncak lokal menjadikannya alat yang menjanjikan dalam praktik pengendalian daya. Selain itu, pendekatan ini relatif mudah diintegrasikan ke dalam sistem yang telah ada tanpa memerlukan modifikasi struktural yang signifikan pada infrastruktur atau sistem kontrol yang ada.

Aleikish *et al.* mengusulkan *Synergistic Meta-Heuristic Adaptive Real-Time Power System Stabilizer* (SMART-PSS), sebuah kerangka kerja stabilisator sistem tenaga berbasis model hybrid yang mampu beradaptasi secara waktu nyata terhadap variasi dari kondisi operasi (Aleikish, Kristiansen Noland and Oyvang, 2025). Pengembangan SMART-PSS didasarkan pada kenyataan bahwa PSS dengan parameter tetap menjadi tidak efektif dalam menghadapi fluktuasi daya dan frekuensi akibat penetrasi tinggi sumber energi inverter-based seperti PV dan angin. Penelitian ini menggabungkan pemodelan *gray-box* dengan metaheuristik dan *machine learning* untuk menghasilkan pengendali yang fleksibel dan adaptif. Proses desain dilakukan dalam dua tahap: pertama, metaheuristik digunakan untuk menyintesis fungsi transfer kompensasi PSS terhadap berbagai kondisi operasi; kedua, hasil tersebut dipelajari menggunakan pembelajaran mesin untuk mengekstrapolasi penyetelan parameter secara online saat sistem mengalami perubahan. Pengujian dilakukan pada sistem multi-mesin dengan simulasi berbagai gangguan dan skenario beban, menunjukkan bahwa SMART-PSS mampu mengurangi deviasi sudut rotor hingga 96% dibandingkan pengendali konvensional. Sistem ini juga memperlihatkan kestabilan tinggi bahkan ketika sistem mengalami osilasi kuat akibat gangguan besar. SMART-PSS menawarkan solusi revolusioner untuk stabilisasi sistem tenaga dalam era energi terbarukan. Dengan pendekatan adaptif dan berbasis data, sistem ini mampu menyamai kompleksitas jaringan modern tanpa kehilangan respons waktu nyata. Penelitian ini membuka peluang besar untuk penerapan algoritma cerdas dan teknologi prediktif dalam pengendalian sistem energi yang dinamis dan desentralisasi.

Li *et al.* meneliti dampak dari kecepatan respons pengendali tegangan terminal atau *terminal voltage control* (TVC) terhadap eksistensi titik-titik kesetimbangan (*equilibrium points*/EPs) dan stabilitas sinyal kecil pada suatu sistem *grid-following voltage source converter* (GFL-VSC) (Li *et al.*, 2025). Studi ini menjawab kekosongan dalam literatur yang sebagian besar hanya menganalisis interaksi antara *loop* daya aktif dan mengabaikan pengaruh kontrol reaktif. Dengan meningkatnya integrasi GFL-VSC dalam sistem tenaga, terutama dari pembangkit PV dan angin, pemahaman terhadap dinamika EP menjadi penting untuk menjamin keandalan dan kecepatan respons sistem. Penelitian ini membandingkan tiga skenario respons TVC: cepat, lambat, dan mempertimbangkan dinamika penuh. Hasilnya menunjukkan bahwa pada respons cepat, titik kesetimbangan tetap tetapi sistem dapat menjadi tidak stabil pada jaringan lemah. Sementara pada respons lambat, terjadi bifurkasi transkritik yang mengakibatkan perubahan stabilitas antara EP yang ada. Analisis ini dilakukan dengan menyusun tiga model Heffron–Phillips ekuivalen yang mencerminkan dinamika sinkronisasi dan redaman, serta didukung oleh simulasi MATLAB/Simulink dan eksperimen *hardware-in-the-loop*. Temuan penelitian ini sangat relevan untuk desain kontrol sistem konverter daya yang terintegrasi dalam jaringan cerdas. Dengan menyoroti interaksi antara karakteristik kontrol tegangan dan dinamika sistem, studi ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan pengendali yang lebih andal dan adaptif dalam menghadapi perubahan struktur dan beban jaringan. Hasilnya juga memperkuat pentingnya mempertimbangkan waktu respons sebagai parameter kunci dalam kestabilan sinyal kecil sistem tenaga berbasis konverter.

Wang *et al.* melakukan penelitian pada redaman osilasi frekuensi ultra-rendah (ULFO) yang sering terjadi pada sistem tenaga dengan proporsi pembangkit hidro yang tinggi (S. Wang *et al.*, 2025). ULFO dengan frekuensi di bawah 0.1 Hz dapat mengganggu stabilitas sistem secara signifikan, dan sering kali tidak tertangani oleh PSS konvensional. Artikel ini menunjukkan bahwa model generator Phillips–Heffron tradisional tidak cukup representatif untuk menganalisis ULFO, sehingga dikembangkan model respons frekuensi yang lebih akurat khusus untuk sistem tenaga terintegrasi hidro-PV. Model ini kemudian digunakan untuk merancang pengendali redaman tambahan berbasis PV, yang tidak hanya bekerja pada sistem tunggal, tetapi juga diperluas untuk sistem multi-hidro dan multi-PV. Parameter pengendali dirancang secara kolaboratif agar dapat mendistribusikan fungsi peredaman secara efektif antar pembangkit PV. Validasi hasil dilakukan melalui simulasi waktu domain dan uji eksperimental berbasis pengolah sinyal digital, yang menunjukkan kemampuan sistem dalam menstabilkan sistem tenaga terhadap ULFO tanpa mengorbankan kemampuan regulasi frekuensi utama dari pembangkit hidro. Penelitian ini sangat penting dalam konteks transisi energi, di mana peran PV sebagai sumber energi yang dapat dikendalikan semakin diperhitungkan. Dengan membuktikan bahwa PV dapat memberikan kontribusi aktif terhadap redaman ULFO, studi ini membuka jalur bagi strategi kontrol terdistribusi berbasis sumber energi

terbarukan. Pendekatan yang digunakan juga fleksibel dan dapat diintegrasikan ke dalam sistem kontrol yang sudah ada, menjadikannya solusi praktis dan aplikatif untuk meningkatkan ketahanan sistem tenaga di masa depan.

Model HP memberikan fleksibilitas dalam representasi dinamika sistem generator. Model ini dalam bentuk orde tiga dapat menyederhanakan dinamika sistem AVR, sehingga memungkinkan proses estimasi parameter yang efisien. Model HP dapat dimodifikasi untuk mengakomodasi elemen sistem modern seperti integrasi kontrol berbasis FACTS, pengendali adaptif berbasis pembelajaran mesin, sistem GFL-VSC, atau sistem 100% energi terbarukan. Ini menunjukkan bahwa model ini tetap relevan dan fleksibel dalam menghadapi kompleksitas dari sistem tenaga modern. Model ini juga dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja algoritma optimasi dan perancangan pengendali orde-pecahan. Validasi yang dilakukan menunjukkan bahwa model HP cukup akurat untuk meramalkan respons sistem terhadap gangguan kecil serta merancang pengendali yang efektif. Meski banyak keunggulan, model HP memiliki keterbatasan tidak mampu menangani karakteristik ULFO yang muncul pada sistem pembangkit hidro dengan waktu tanggap lambat.

5. Simpulan

Model generator Heffron–Phillips tetap menjadi kerangka fundamental dan serbaguna dalam analisis sistem tenaga, berkat kesederhanaannya, keterhubungan langsung dengan parameter fisik, serta kemampuannya untuk digabungkan dengan berbagai teknik kontrol dan algoritma optimasi. Dalam delapan artikel ini, model tersebut digunakan dalam berbagai bentuk, baik dalam bentuk standar, modifikasi untuk perangkat modern (seperti IPFC dan GFL-VSC), maupun sebagai dasar untuk algoritma cerdas. Namun, keterbatasannya dalam menangani fenomena osilasi ekstrem serta sistem nonlinier kompleks menunjukkan perlunya suatu pendekatan pelengkap atau pengembangan model lebih lanjut. Dengan demikian, model Heffron–Phillips tetap relevan digunakan di era modern tetapi perlu disesuaikan untuk menangani sistem tenaga dengan penetrasi tinggi dari energi terbarukan dan dinamika inverter yang cepat.

Daftar Pustaka

- Agrawal, N., Khan, F.A. and Mahapatra, S. (2024) 'Next Generation Heffron-Phillips Model for Damping Power System Oscillations based on a Novel Meta-Heuristic Snake Optimization Algorithm', *Science and Technology Asia*, 29(1), pp. 160–181.
- Aleikish, K., Kristiansen Noland, J. and Oyvang, T. (2025) 'Synergistic Meta-Heuristic Adaptive Real-Time Power System Stabilizer (SMART-PSS)', *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 12(September 2024), pp. 36–45. Available at: <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2025.3532768>.
- Chakraborty, A. et al. (2025) 'Oppositional artificial rabbit optimization for the optimal tuning of single input power system stabilizer', in *Proceedings of 2025 3rd International Conference on Intelligent Systems, Advanced Computing, and Communication, ISACC 2025*. IEEE, pp. 329–335. Available at: <https://doi.org/10.1109/ISACC65211.2025.10969398>.
- Heffron, W.G. and Phillips, R.A. (1952) 'Effect of a Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited Operation of Large Turbine Generators', *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Part III: Power Apparatus and Systems, 71(1), pp. 692–697. Available at: <https://doi.org/10.1109/AIEEPAS.1952.4498530>.
- Kamarposhti, M.A. et al. (2022) 'Optimal Coordination of TCSC and PSS2B Controllers in Electric Power Systems Using MOPSO Multiobjective Algorithm', *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1155/2022/5233620>.
- Karrari, M. and Malik, O.P. (2004) 'Identification of Heffron-Phillips model parameters for synchronous generators using online measurements', *IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 151(3), pp. 313–320. Available at: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20040275>.
- Khadanga, R.K. et al. (2025) 'A Novel Modified Gorilla Troops Optimizer Algorithm for Interline Power Flow Controller-Based Damping Controller Design', *Energy Exploration and Exploitation*, 43(3), pp. 971–989. Available at: <https://doi.org/10.1177/01445987241307985>.
- Kundur, P.S. (1994) *Power System Stability and Control*. New York: McGraw Hill.
- Li, S. et al. (2025) 'The Impact of Terminal-Voltage Control on the Equilibrium Points and Small-Signal Stability of GFL-VSC Systems', *Energies*, 18(12), pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.3390/en18123023>.
- Micev, M. et al. (2025) 'A Novel Approach for Estimation of Synchronous Machine Automatic Voltage Regulation System Parameters', *IEEE Transactions on Industry Applications*, 61(1), pp. 907–917. Available at: <https://doi.org/10.1109/TIA.2024.3458947>.
- Muthukumari, S., Kanagalakshmi, S. and Sunil Kumar, T.K. (2025) 'Integer and fractional-order model matching controller design algorithm with generalized reference model formulation for nonlinear time delay servo and regulatory problems: A real-time validation', *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 47(10), pp. 2111–2124. Available at: <https://doi.org/10.1177/01423312241273756>.
- Sauer, P.W., Pai, M.A. and Chow, J.H. (2017) *Power System Dynamics and Stability: With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox*. 2nd edn, *Power System Dynamics and Stability: With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox 2e*. 2nd edn. Hoboken, NJ: Wiley. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119355755>.
- Tan, S., Geng, H. and Yang, G. (2018) 'Phillips-Heffron model for current-controlled power electronic generation unit', *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6(3), pp. 582–594. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0312-1>.
- Vittal, V. et al. (2020) *Power System Control and Stability*. 3rd edn. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press. Available at: <https://doi.org/10.1109/MPER.1995.365077>.
- Wang, G. et al. (2025) 'Multimodal Unified Control Method Using the Lie Derivative and Lyapunov Theory for Enhancing the Dynamic Stability of Power Systems with 100% Renewable Energy', *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 22, pp. 3182–3195. Available at: <https://doi.org/10.1109/TASE.2024.3390754>.
- Wang, S. et al. (2025) 'Ultra-Low Frequency Oscillation Damping Control Method for Hydro-Photovoltaic Integrated Systems', *IEEE Transactions on Power Electronics*, 40(1), pp. 2397–2418. Available at: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3458910>.
- Wood, A.J., Wollenberg, B.F. and Sheblé, G.B. (2013) *Power Generation, Operation, and Control*. 3rd edn. Hoboken, NJ: Wiley.
- Zaker, B., Gharehpetian, G.B. and Moaddabi, N. (2014) 'Parameter identification of heffron-phillips model considering avr using online measurements data', in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)*. Cordoba, pp. 739–744. Available at: <https://doi.org/10.24084/repqj12.470>.