Jurnal Elkolind Volume 12, Nomor 3, September 2025
DOI: http://dx.doi.org/10.33795/elkolind.v12i3/8782



# Pendekatan Extended Kalman Filter untuk Estimasi Keadaan Dinamis pada Generator Sinkron dengan Model Kompleks

**Nabila Aulia Ramadhani[1], Arif Gunawan[2], Syahrizal[3], Hendri Novia Syamsir[4], Muzni Sahar[5]**
**e-mail: nabila.ramadhani@pcr.ac.id, agun@pcr.ac.id, ijal@pcr.ac.id, hendri@pcr.ac.id, muzni@pcr.ac.id**
[1-5]Jurusan Teknologi Industri, Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Caltex Riau,
Jalan Umban Sari No.1, Rumbai, Pekanbaru, Indonesia

**Informasi Artikel**

***Riwayat Artikel***

Diterima 13 Agustus 2025
Direvisi 30 September 2025
Diterbitkan 30 September 2025

**Kata kunci:**

*Dynamic State Estimation*
*Extended Kalman Filter*
Generator Sinkron

**ABSTRAK**

Informasi keadaan generator sinkron memegang peranan penting dalam pemantauan, pengendalian, dan deteksi gangguan sistem tenaga, namun keterbatasan pengukuran langsung sering menjadi kendala. Penelitian ini mengusulkan metode estimasi keadaan dinamis berbasis model sub-transien generator sinkron dengan algoritma Extended Kalman Filter. Pendekatan ini memungkinkan estimasi keadaan yang akurat hanya melalui pengukuran terminal, sehingga relevan untuk aplikasi pemantauan real-time. Proses algoritma terdiri dari tahap prediksi dan koreksi yang secara iteratif memperbarui nilai estimasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini mampu memberikan estimasi dengan tingkat kesalahan kuadrat rata-rata yang rendah pada berbagai kondisi operasi dan gangguan. Skenario gangguan tidak stabil menghasilkan nilai terkecil sebesar $4{,}41\times10^{-9}$, yang menunjukkan kemampuan EKF mempertahankan akurasi meskipun sistem mengalami osilasi signifikan. Sebaliknya, kombinasi derau proses dan pengukuran menghasilkan nilai terbesar sebesar $1{,}19\times10^{-1}$, menandakan kondisi paling menantang bagi estimator. Meskipun demikian, nilai tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi praktis, sehingga algoritma tetap mampu mengikuti dinamika sistem dengan baik Temuan ini menegaskan bahwa metode yang diusulkan efektif dalam memperkirakan keadaan generator sinkron sub-transien serta berpotensi meningkatkan stabilitas dan keandalan sistem tenaga listrik.

***Keywords:***

*Dynamic State Estimation*
*Extended Kalman Filter*
*Synchronous Generator*

**ABSTRACT**

*State information of synchronous generators plays a crucial role in monitoring, control, and fault detection within power systems, yet direct measurement often remains limited. This study proposes a dynamic state estimation method based on the sub-transient model of a synchronous generator combined with the Extended Kalman Filter algorithm. The approach enables accurate state estimation using only terminal measurements, making it suitable for real-time monitoring applications. The algorithm operates through prediction and correction stages that iteratively update the estimated states. Simulation results demonstrate that the proposed method achieves low mean squared error (MSE) under various operating and fault conditions. The unstable fault scenario yielded the smallest error of $4.41 \times 10^{-9}$, indicating that EKF can maintain high accuracy even when the system experiences significant oscillations. Conversely, the combined process and measurement noise scenario produced the highest error of $1.19 \times 10^{-1}$, representing the most challenging case for the estimator. Nevertheless, this value remains within an acceptable range for practical applications, showing that EKF can still reliably track system dynamics. These findings confirm that the proposed approach provides accurate and reliable state*

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195

*estimation for synchronous generator sub-transient models and has strong potential to enhance power system stability and reliability.*

***Penulis Korespondensi:***
Nabila Aulia Ramadhani
Program Studi Teknik Listrik
Politeknik Caltex Riau
Jl. Umban Sari No.1, Rumbai, Pekanbaru, Riau 28265
Email: nabila.ramadhani@pcr.ac.id
Nomor HP/WA aktif: +62 823 8678 4097

## 1. PENDAHULUAN

Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan salah satu faktor utama dalam menjamin kontinuitas pasokan energi yang andal. Generator sinkron, sebagai komponen utama dalam pembangkit tenaga listrik, memegang peranan penting dalam menjaga kestabilan operasi sistem tenaga. Stabilitas generator sinkron berhubungan langsung dengan kestabilan keseluruhan jaringan, sehingga pemantauan kondisi dinamisnya menjadi sangat krusial, baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang mampu melakukan estimasi keadaan dinamis (*dynamic state estimation*, DSE) secara akurat untuk mendukung pemantauan, pengendalian, dan proteksi sistem tenaga [1]-[3].

Berbagai metode telah dikembangkan untuk melakukan DSE, di antaranya metode berbasis *Kalman Filter* dan turunannya. *Extended Kalman Filter* (EKF) menjadi salah satu algoritma yang banyak digunakan karena mampu menangani sistem nonlinier dengan melakukan linearisasi di sekitar titik operasi [3]. Sejumlah penelitian terdahulu telah menerapkan EKF untuk estimasi keadaan generator sinkron dengan model yang relatif sederhana, serta menguji kinerjanya pada kondisi gangguan tertentu [4], [5]. Namun, sebagian besar studi masih terbatas pada model dengan kompleksitas rendah atau skenario gangguan yang sederhana.

Dalam perkembangan terbaru, penggunaan model subtransien atau model kompleks generator sinkron dinilai lebih representatif dalam menggambarkan respons elektromagnetik yang cepat, terutama saat terjadi gangguan hubung singkat atau perubahan beban yang tiba-tiba [6]. Akan tetapi, penerapan EKF pada model yang lebih kompleks ini masih menghadapi tantangan, terutama terkait akurasi estimasi pada kondisi dengan kombinasi derau proses dan pengukuran, serta pada saat sistem mengalami gangguan yang tidak stabil.

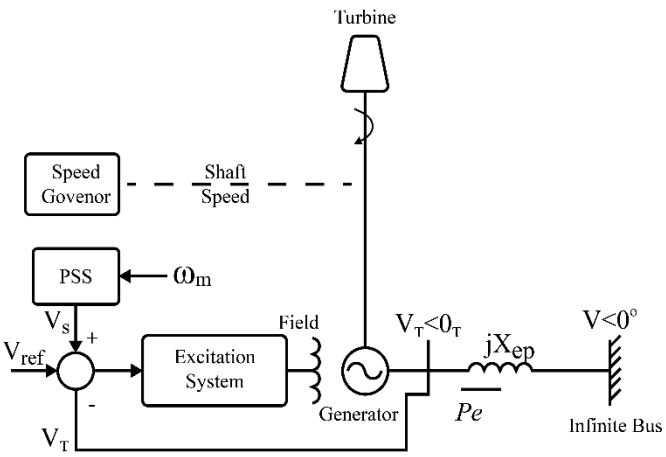
Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada penerapan EKF untuk estimasi keadaan dinamis generator sinkron dengan model subtransien/kompleks. Artikel ini menyajikan pengujian kinerja EKF pada berbagai skenario, termasuk kondisi *steady state*, gangguan hubung singkat, derau proses dan pengukuran. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan metode estimasi keadaan yang lebih andal, yang berpotensi mendukung implementasi sistem pemantauan dan pengendalian cerdas pada sistem tenaga modern. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja EKF dalam melakukan estimasi keadaan dinamis generator sinkron model kompleks, serta mengevaluasi akurasinya melalui pengukuran *Mean Square Error* (MSE) pada berbagai kondisi operasi dan gangguan.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan simulasi numerik dengan menggunakan algoritma *Extended Kalman Filter* (EKF) untuk melakukan estimasi keadaan dinamis pada generator sinkron model subtransien. Blok diagram sistem generator sinkron yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.

### 2.1 Diagram Blok

Model terdiri dari generator sinkron subtransien yang terhubung ke *infinite bus* melalui impedansi transmisi, dengan tiga pengendali utama yaitu Governor, *Automatic Voltage Regulator* (AVR), dan *Power System Stabilizer* (PSS).




Gambar 1: Blok diagram sistem secara umum

Governor berfungsi mengendalikan kecepatan putar generator dengan mengatur masukan mekanik dari penggerak utama (misalnya uap atau bahan bakar), sehingga frekuensi keluaran tetap sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga. AVR mengatur tegangan terminal generator dengan menyesuaikan arus eksitasi medan berdasarkan tiga input utama, yaitu tegangan referensi ($V_{ref}$), tegangan terminal ($V_t$), dan sinyal stabilisasi ($V_s$) dari PSS. Sementara itu, PSS berperan dalam meredam osilasi dinamis dengan menghasilkan $V_s$ dari umpan balik kecepatan rotor, yang kemudian digunakan sebagai salah satu masukan AVR.

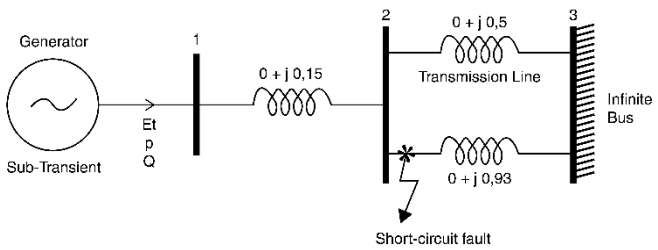
Konfigurasi *Single Machine Infinite Bus* (SMIB) digunakan dalam sistem ini, dengan generator sinkron subtransien sebagai satu-satunya sumber daya yang dihubungkan langsung ke bus. Daya aktif ($P_e$) dan reaktif yang dihasilkan generator disalurkan ke jaringan melalui jalur transmisi, sehingga setiap fluktuasi daya dapat langsung memengaruhi tegangan bus dan frekuensi sistem. Dengan koordinasi antara governor, AVR, dan PSS, sistem ini mampu menjaga kestabilan operasi generator sekaligus mendukung keandalan kinerja jaringan listrik secara keseluruhan.

## 2.2 Single Machine Infinite Bus (SMIB)

Konfigurasi *Single Machine Infinite Bus* (SMIB) digunakan sebagai kerangka analisis utama dalam pengujian *Dynamic State Estimation* (DSE) pada model generator sinkron. SMIB memberikan representasi sederhana namun efektif dari interaksi antara satu unit generator dengan sistem tenaga yang lebih besar [7],[8]. Dalam konfigurasi ini, generator sinkron tunggal dihubungkan ke sebuah *infinite bus*, yaitu bus dengan kapasitas tak terbatas yang diasumsikan memiliki tegangan dan frekuensi konstan meskipun terjadi perubahan beban maupun gangguan.

Gambar 2 menunjukkan skema SMIB yang digunakan dalam penelitian ini. Sistem terdiri dari tiga bus yang saling terhubung melalui tiga saluran transmisi. Bus 1 terhubung dengan generator sinkron yang beroperasi pada tegangan $V = 1\angle 28.3429^{\circ}$, menghasilkan daya aktif sebesar 0,9 p.u. dan daya reaktif sebesar 0,436 p.u. Bus 3 berfungsi sebagai *infinite bus*, sedangkan bus 2 menjadi titik penghubung jalur transmisi. Untuk penyederhanaan, saluran transmisi diasumsikan bersifat *lossless* dengan resistansi nol.

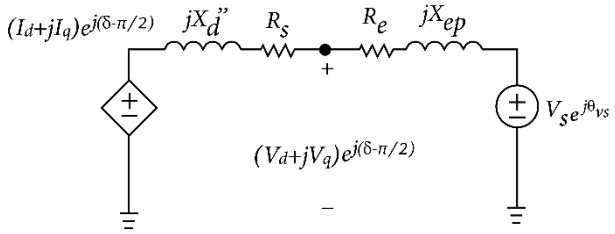
Dinamika sistem diuji dengan memberikan gangguan berupa hubung singkat pada jalur transmisi antara bus 2 dan bus 3. Jalur ini merupakan salah satu dari saluran transmisi paralel yang menghubungkan generator dengan *infinite bus*. Ketika terjadi hubung singkat, arus yang sangat besar dapat mengganggu kestabilan operasi sistem. Untuk membatasi dampak gangguan, salah satu jalur yang terhubung ke bus 3 dilepaskan guna mengisolasi bagian yang terdampak, sementara aliran daya masih berlangsung melalui jalur alternatif (bus 1–2–3). Dengan konfigurasi ini, SMIB menjadi dasar yang relevan untuk menguji respon dinamis sistem terhadap berbagai skenario gangguan dan untuk memvalidasi algoritma estimasi state yang dikembangkan.




Gambar 2: Konfigurasi SMIB

### 2.3 Pemodelan Generator Sinkron Sub-Transien

Pemodelan generator sinkron sub-transien digunakan dalam penelitian ini untuk merepresentasikan dinamika cepat akibat gangguan sistem tenaga. Model ini dianggap lebih akurat dibandingkan model sederhana karena mampu menangkap interaksi elektromekanis jangka pendek. Model sub-transien generator sinkron yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada standar IEEE [11], di mana dinamika mesin direpresentasikan melalui empat kumparan rotor ekuivalen. Untuk meningkatkan ketelitian estimasi, penelitian ini mengusulkan penyempurnaan model dengan menambahkan konstanta waktu pada sumbu-dq, sehingga karakterisasi respons dinamis generator menjadi lebih akurat. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang terbatas pada model generator sederhana, penelitian ini mengimplementasikan EKF pada model sub-transien dengan integrasi empat pengendali, sehingga lebih representatif untuk menggambarkan kondisi generator sebenarnya.




Gambar 3: Rangkaian dinamis generator sinkron

Gambar 3 merupakan representasi rangkaian dinamis generator sinkron yang terhubung ke jaringan listrik, resistansi dan reaktansi eksternal berada di luar generator, sedangkan tegangan internal di balik reaktansi sub-transien $X_d''$ tidak dapat diakses langsung. Model ini diformulasikan dalam tujuh state, yang terdiri atas lima variabel elektris $(E_d', E_{dc}', E_c', \psi_{1d}, \psi_{2q})$ dan dua variabel mekanis $(S_m, \delta)$. Selain itu, variabel penting seperti arus d-axis $(I_d)$, arus q-axis $(I_q)$, dan torsi elektromagnetis $(T_e)$ digunakan untuk menghubungkan sisi mekanis dan elektris. Persamaan lengkap dinamika state ditunjukkan pada (1).

$$\dot{E}_d' = \frac{1}{T_{q0}'}\left[-E_d' + \left(X_q - X_q'\right)\left(-I_q + \frac{(X_q' - X_q'')}{(X_q' - X_{ls})^2}\left(X_q' - X_{ls}\right) I_q - E_d' - \psi_{2q}\right)\right] \quad (1)$$

$$\dot{E}_{dc}' = \frac{1}{T_c}\left[I_q\left(X_d'' - X_q''\right) - E_{dc}'\right]$$

$$\dot{E}_q' = \frac{1}{T_{d0}'}\left[E_{fd} - E_q' + (X_d - X_d')\left(-I_d + \frac{(X_d' - X_d'')}{(X_d' - X_{ls})^2}(\psi_{1d} - I_d(X_d' - X_{ls}\right) - E_q')\right]$$

$$\dot{\psi}_{1d} = \frac{1}{T_{d0}''}\left[E_q' + I_d\left(X_d' - X_{ls}\right) - \psi_{1d})\right]$$

$$\dot{\psi}_{2q} = \frac{1}{T_{q0}''}\left[E_d' + I_q\left(X_q' - X_{ls}\right) - \psi_{2q})\right]$$

$$\dot{S}_m = \frac{1}{2H}\left[(T_m - T_e) - DS_m\right]$$

$$\dot{\delta} = \omega_B \cdot S_m$$

### 2.4 Pemodelan Governor

Dalam penelitian ini diterapkan model governor orde dua dengan dua variabel state utama. Variabel pertama adalah PGV, yang merepresentasikan posisi katup governor dan berperan dalam mengatur aliran energi mekanik dari turbin menuju generator. Variabel kedua adalah PT, yang menggambarkan respon torsi mekanis terhadap perbedaan antara torsi aktual dan nilai referensi. Dengan pendekatan ini, model governor mampu menangkap dinamika dasar dari sistem pengendalian kecepatan, sehingga berperan penting dalam menjaga kestabilan operasi generator. Persamaan state untuk model governor tersebut ditunjukkan pada (2).

$$\dot{PGV} = \frac{1}{TG}\left(T_{ref} - \left(S_m \cdot \frac{1}{R_p}\right) - PGV\right) \tag{2}$$

$$\dot{PT} = \frac{1}{TCH}(PGV - PT)$$

### 2.5 Pemodelan *Automatic Voltage Regulator* (AVR)

Sistem AVR berfungsi menjaga kestabilan tegangan terminal generator melalui pengaturan arus eksitasi medan. Penelitian ini menggunakan model IEEE-ST1A sebagai representasi standar AVR pada generator sinkron. Model ini memiliki beberapa parameter penting, yaitu penguat regulator statis (KA) yang menentukan sensitivitas respon, tegangan referensi ($V_{ref}$) sebagai target tegangan terminal, serta sinyal tambahan dari *PSS* ($V_s$) yang berperan dalam meningkatkan stabilitas dinamis. Selain itu, sinyal input filter ($V_r$) digunakan untuk meredam fluktuasi frekuensi tinggi sehingga output AVR menjadi lebih stabil. Besaran utama dari AVR adalah tegangan eksitasi ($E_{fd}$) yang diberikan ke kumparan medan, memungkinkan generator mempertahankan tegangan terminal sesuai kondisi operasi yang diinginkan. Persamaan (3) merupakan persamaan state AVR.

$$\dot{V_r} = \frac{V_t - V_r}{T_r} \tag{3}$$

### 2.6 Pemodelan *Power System Stabilizer* (PSS)

PSS berfungsi meningkatkan stabilitas dinamis generator dengan menghasilkan sinyal kendali tambahan yang mampu meredam osilasi rotor [9]. Dalam penelitian ini, digunakan PSS dengan input berupa kecepatan rotor ($S_m$), yang mencerminkan perubahan kecepatan akibat gangguan pada sistem tenaga. Sinyal input ini diproses untuk menghasilkan sinyal kompensasi ($V_s$) yang kemudian diinjeksikan ke AVR. Dengan adanya sinyal $V_s$, eksitasi medan generator dapat dimodulasi sehingga terbentuk torsi peredam (*damping torque*) yang berlawanan arah dengan osilasi rotor. Mekanisme ini membantu menstabilkan tegangan terminal, mengurangi fluktuasi sudut rotor, dan menjaga sistem tenaga tetap andal meskipun terjadi gangguan. Persamaan untuk PSS terdiri atas empat *state*.

Secara keseluruhan, model generator sinkron sub-transien dan pengendalinya terdiri atas empat belas persamaan diferensial nonlinier yang menggambarkan dinamika elektris dan mekanis sistem. Karena keterbatasan ruang dalam penulisan artikel ini, persamaan lengkap tidak dicantumkan.

### 2.7 Metode *Extended Kalman Filter* (EKF)

Setelah pemodelan generator sinkron dan sistem pengendalinya, tahap berikutnya adalah perancangan algoritma *Extended Kalman Filter* (EKF) untuk melakukan estimasi state. EKF merupakan pengembangan dari *Kalman Filter* yang dapat diaplikasikan pada sistem nonlinier dengan melakukan linearisasi lokal di sekitar titik operasi [10]. Dalam kerangka Bayesian, EKF bekerja melalui dua tahapan utama: prediksi dan koreksi, seperti yang ditunjukkan pada (4) dan (5). Pada tahap prediksi ke-$k$, algoritma memperkirakan rata-rata *state* dan kovarians dengan mempropagasikan model dinamika sistem serta mempertimbangkan derau proses. Selanjutnya, pada tahap koreksi, data pengukuran aktual digunakan untuk menyesuaikan estimasi state dan kovarians prediksi agar sesuai dengan observasi.

Proses yang bersifat iteratif dan adaptif terhadap waktu ini memungkinkan EKF menyempurnakan akurasi estimasi, menangani sifat nonlinier, serta memperhitungkan ketidakpastian dalam sistem sebenarnya. Dengan

meminimalkan kovarians antara state yang diprediksi dan kondisi sebenarnya, EKF mampu memberikan estimasi *state* secara andal dan real-time, sehingga efektif digunakan dalam pemantauan dan pengendalian dinamika sistem tenaga. Dalam beberapa penelitian, algoritma lain seperti Unscented Kalman Filter (UKF) juga telah banyak digunakan untuk sistem nonlinier dengan keunggulan dalam menghindari proses linearisasi melalui pendekatan transformasi sigma point. Namun, implementasi UKF umumnya menuntut beban komputasi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan EKF yang lebih sederhana.

1. Tahapan Prediksi

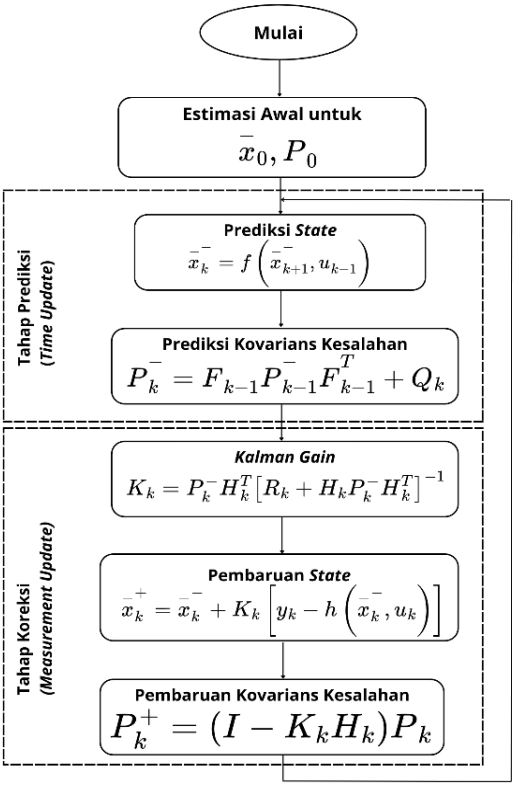
$$x_k^- = f(x_{k-1}, u_{k-1}) \quad k \geq 1 \tag{4}$$
$$P_k^- = F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + Q_k$$

$x_k^-$ dan $P_k^-$ didefinisikan sebagai rata-rata apriori dan kovarians apriori dari state pada langkah ke- $k$. Nilai-nilai ini diperoleh dari propagasi model dinamika sistem yang sudah dipengaruhi oleh derau proses.

2. Tahapan Koreksi

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k) \tag{5}$$
$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k(y_k - h_k(\hat{x}_k, u_k))$$
$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^-$$

Dalam tahap koreksi, $\hat{x}_k^+$ dan $P_k$ masing-masing merepresentasikan rata-rata posteriori serta kovarians posteriori dari state. Proses pembaruan ini melibatkan perhitungan matriks gain Kalman $K_k$ yang digunakan untuk menyeimbangkan bobot antara hasil prediksi model dan pengukuran aktual pada saat $t = k\Delta t$. Selain itu, $F_k$ dan $H_k$ merupakan matriks Jacobian, masing-masing menggambarkan linearisasi dari model sistem dan model pengukuran di sekitar titik operasi. Gambar 4 menunjukkan diagram alir EKF.




Gambar 4: Diagram alir EKF

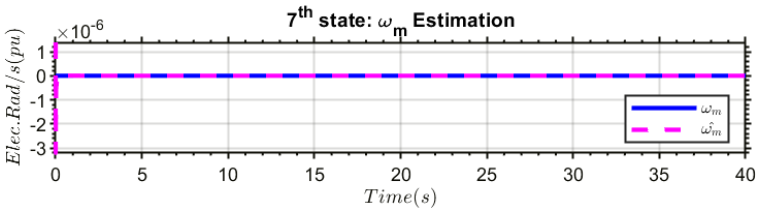
## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi DSE pada generator sinkron sub-transien dilakukan menggunakan algoritma EKF dengan 14 state yang mencakup variabel generator, governor, AVR, dan PSS. Hasil estimasi dibandingkan dengan data aktual, ditampilkan dalam bentuk grafik untuk menunjukkan akurasi pelacakan state.

Pengujian dilakukan pada empat skenario, yaitu kondisi steady state, gangguan hubung singkat, gangguan sinyal input, serta penambahan derau Gaussian pada proses dan pengukuran. Nilai Mean Square Error (MSE) digunakan sebagai indikator kuantitatif. Tabel 1 merangkum hasil MSE dari seluruh skenario pengujian.

### 3.1 Simulasi 1: Kondisi *Steady State*

Pengujian *steady state* dilakukan untuk menilai kemampuan EKF dalam mengestimasi state model generator sinkron ketika sistem berada pada kondisi operasi stabil. Nilai inisial EKF ditetapkan sama seperti pada pengujian sebelumnya dan digunakan konsisten pada simulasi selanjutnya. Kondisi steady state merupakan keadaan di mana variabel sistem tidak mengalami perubahan signifikan terhadap waktu, sehingga penting untuk menguji akurasi EKF pada situasi ini. Hasil simulasi menunjukkan bahwa EKF mampu memperkirakan state dengan baik, meskipun terdapat gangguan kecil pada awal simulasi. Estimasi tetap konvergen menuju nilai aktual tanpa menunjukkan osilasi berkepanjangan. Gambar 5 memperlihatkan bahwa algoritma EKF dapat mempertahankan akurasi estimasi pada kondisi *steady state*, sehingga layak digunakan dalam aplikasi real-time pada sistem tenaga.

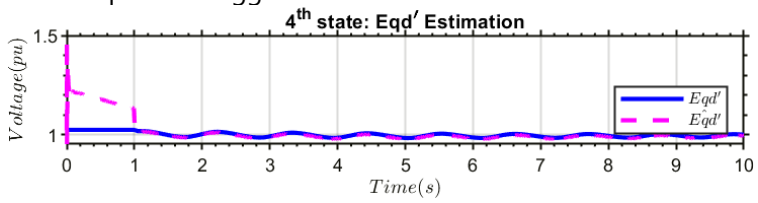



Gambar 5: Estimasi EKF pada kondisi *steady state* (state ke-7: Sm)

### 3.2 Simulasi 2: Pengaruh Derau Proses dan Pengukuran

Simulasi berikut dilakukan dengan menambahkan derau proses dan pengukuran secara bersamaan untuk mengevaluasi dampak kombinasi gangguan terhadap akurasi estimasi EKF. Kondisi ini merepresentasikan skenario yang lebih realistis, di mana terdapat ketidakpastian baik dari model sistem maupun pengukuran. Nilai derau ditetapkan dengan $R_k = 10^{-4}$ dan $Q_k = 10^{-8}$. Hasil estimasi yang ditunjukkan pada Gambar 6 memperlihatkan bahwa kombinasi derau proses dan pengukuran memberikan pengaruh paling besar dibandingkan dengan skenario lainnya. Analisis MSE (Tabel 1) menunjukkan bahwa peningkatan MSE paling signifikan terjadi pada state yang berhubungan dengan dinamika rotor dan fluks sub-transien, sementara dampak derau pengukuran relatif lebih kecil.

Secara keseluruhan, meskipun nilai MSE meningkat hampir pada semua state, hasil estimasi EKF tetap konvergen dengan data aktual. Hal ini menegaskan bahwa EKF masih mampu memberikan estimasi yang cukup akurat pada kondisi dengan tingkat ketidakpastian tinggi.

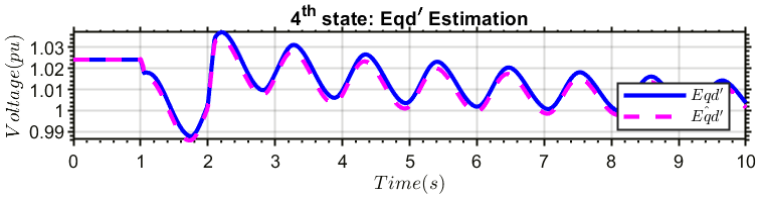



Gambar 6: Estimasi EKF dengan derau proses dan pengukuran (state ke-4: Eqd).

### 3.3 Simulasi 3: *Stable Fault*

Pada studi kasus ini, sistem diuji dengan gangguan impuls pada input tegangan referensi $V_{ref}$ melalui sinyal eksitasi $E_{fd}$ dengan parameter amplitudo 2 pu, durasi 2 detik, dan waktu naik 0,1 detik. Gangguan ini dikategorikan sebagai *stable fault* karena tidak menimbulkan ketidakstabilan yang signifikan pada sistem. Hasil simulasi menunjukkan adanya osilasi pada beberapa state dan output generator setelah gangguan diberikan pada detik ke-2.

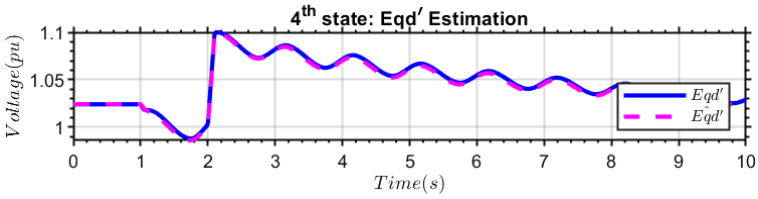
Amplitudo osilasi berangsur menurun seiring waktu, menunjukkan kemampuan sistem dalam meredam gangguan hingga kembali ke kondisi stabil, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7, algoritma EKF mampu menghasilkan estimasi state yang konvergen dengan data aktual. Perbedaan kecil pada awal estimasi masih terlihat, tetapi segera tereduksi sehingga hasil estimasi tetap mengikuti dinamika sebenarnya.




Gambar 7: Estimasi EKF pada kondisi *stable fault* (state ke-4: Eqd)

### 3.4 Simulasi 4: *Unstable Fault*

Pada skenario ini, sistem diuji dengan gangguan impuls tak terkendali pada input tegangan referensi $V_{ref}$ dengan parameter amplitudo 8 pu, durasi 2 detik, dan waktu naik 0,1 detik. Gangguan ini memiliki intensitas yang lebih tinggi dibandingkan *stable fault* sebelumnya, dengan tujuan memicu ketidakstabilan sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa gangguan tersebut menimbulkan osilasi yang besar dan fluktuasi signifikan pada variabel state generator sinkron. Seperti ditampilkan pada Gambar 8, sistem mengalami instabilitas transien dengan respon state yang menyimpang dari kondisi normal. Meskipun sistem berada pada kondisi tidak stabil, EKF tetap mampu menghasilkan estimasi state yang konsisten dengan data referensi. Grafik hasil estimasi menunjukkan bahwa EKF mengikuti dinamika sebenarnya meskipun terjadi gangguan parah.




Gambar 8: Estimasi EKF pada kondisi un*stable fault* (state ke-4: Eqd)

TABEL I : MSE HASIL ESTIMASI EKF BERBAGAI SKENARIO

| Variabel | Stable Fault | Unstable Fault | Qk dan Rk |
|---|---|---|---|
| Vr | $3.11\times10^{-6}$ | $2.46\times10^{-6}$ | $3.87\times10^{-6}$ |
| E′d | $6.98\times10^{-6}$ | $3.95\times10^{-6}$ | $6.64\times10^{-3}$ |
| E′dc | $4.47\times10^{-9}$ | $4.41\times10^{-9}$ | $3.25\times10^{-6}$ |
| E′q | $7.20\times10^{-6}$ | $3.77\times10^{-6}$ | $2.48\times10^{-3}$ |
| ψ1d | $8.33\times10^{-6}$ | $4.39\times10^{-6}$ | $2.28\times10^{-3}$ |
| ψ2q | $8.27\times10^{-6}$ | $4.87\times10^{-6}$ | $5.27\times10^{-3}$ |
| Sm | $1.64\times10^{-8}$ | $1.27\times10^{-8}$ | $1.02\times10^{-6}$ |
| δ | $7.07\times10^{-5}$ | $4.53\times10^{-5}$ | $7.86\times10^{-3}$ |
| PGV | $3.07\times10^{-6}$ | $2.25\times10^{-6}$ | $7.55\times10^{-4}$ |
| PT | $3.15\times10^{-7}$ | $2.15\times10^{-7}$ | $1.03\times10^{-2}$ |
| pss1 | $1.15\times10^{-7}$ | $3.51\times10^{-8}$ | $9.92\times10^{-2}$ |
| pss2 | $5.62\times10^{-6}$ | $4.18\times10^{-6}$ | $9.96\times10^{-2}$ |
| pss3 | $1.02\times10^{-5}$ | $8.00\times10^{-6}$ | $1.01\times10^{-1}$ |

| Variabel | Stable Fault | Unstable Fault | Qk dan Rk |
|---|---|---|---|
| pss4 | $2.24\times10^{-5}$ | $1.98\times10^{-5}$ | $1.19\times10^{-1}$ |
| Igreal | $1.49\times10^{-4}$ | $1.49\times10^{-4}$ | $1.41\times10^{-4}$ |
| Igimag | $2.22\times10^{-4}$ | $2.09\times10^{-4}$ | $2.50\times10^{-4}$ |

Hasil perhitungan MSE pada Tabel 1 menunjukkan bahwa EKF mampu memberikan estimasi yang akurat pada kondisi gangguan stabil maupun tidak stabil dengan tingkat error yang relatif rendah pada sebagian besar state. Namun, ketika derau proses dan derau pengukuran diberikan secara bersamaan, nilai MSE meningkat signifikan, terutama pada variabel dinamis rotor dan state PSS. Kondisi ini menegaskan bahwa kombinasi derau menjadi faktor paling kritis yang memengaruhi akurasi estimasi. Dengan demikian, diperlukan strategi penanganan derau yang lebih komprehensif agar kinerja EKF tetap andal pada implementasi nyata sistem tenaga listrik.

Pada penelitian ini, validasi hasil masih terbatas pada simulasi numerik. Keterbatasan akses terhadap data lapangan dari Phasor Measurement Unit (PMU) menjadi alasan tidak dilakukannya uji verifikasi menggunakan data nyata. Oleh karena itu, pengujian berbasis data lapangan menjadi arah penelitian lanjutan yang relevan. Selain itu, parameter kovarians proses (Q) dan pengukuran (R) ditentukan berdasarkan nilai acuan dari literatur. Studi sensitivitas terhadap variasi parameter tersebut diperlukan untuk menilai ketahanan algoritma dalam kondisi ketidakpastian yang lebih tinggi.

## 4. KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa algoritma Extended Kalman Filter (EKF) efektif untuk dynamic state estimation pada generator sinkron model sub-transien. EKF mampu mengestimasi state yang tidak dapat diukur secara langsung dengan tingkat akurasi tinggi, yang tercermin dari nilai MSE rendah pada berbagai skenario simulasi. Kinerja terbaik diperoleh pada kasus *unstable fault* dengan MSE sebesar $4{,}41\times10^{-9}$, sedangkan skenario dengan kombinasi derau proses dan pengukuran menghasilkan MSE terbesar sebesar $1{,}19\times10^{-1}$. Secara umum, EKF terbukti konsisten dalam mengikuti dinamika sistem, meskipun peningkatan derau memperlambat konvergensi.

Meski demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan karena hanya diuji pada sistem generator sub-transien berbasis simulasi. Generalisasi ke sistem multi-mesin maupun jaringan tenaga yang lebih kompleks belum divalidasi. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan pengembangan pendekatan *robust* atau *adaptive filtering* agar estimasi tetap stabil pada tingkat ketidakpastian yang lebih tinggi, serta pengujian pada sistem multi-mesin dan data eksperimen guna memperkuat relevansi praktis.

## 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Caltex Riau atas dukungan pendanaan dan fasilitas yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga diberikan kepada semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

[1] A. P. S. Meliopoulos, G. J. Cokkinides, P. Myrda, Y. Liu, R. Fan, L. Sun, R. Huang, and Z. Tan, "Dynamic state estimation-based protection: Status and promise," IEEE Transactions on Power Delivery, 2017.

[2] Y. Liu, A. P. S. Meliopoulos, R. Fan, L. Sun, and Z. Tan, "Dynamic state estimation based protection on series compensated transmission lines," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 5, pp. 2199–2209, 2017.

[3] R. Fan, A. P. S. Meliopoulos, G. J. Cokkinides, L. Sun, and L. Yu, "Dynamic state estimation-based protection of power transformers," in 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO: IEEE, Jul. 2015, pp. 1–5. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/7286463/

[4] E. Ghahremani and I. Kamwa, "Local and wide-area pmu-based decentralized dynamic state estimation in multi-machine power systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 1, pp. 547–562, 2016.

[5] N. Zhou, D. Meng, Z. Huang, and G. Welch, "Dynamic state estimation of a synchronous machine using pmu data: A comparative study," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 450–460, 2015.

[6] Hao, N., He, F., Tian, C., Yao, Y., & Xia, W. (2023). KD-EKF: A Consistent Cooperative Localization Estimator Based on Kalman Decomposition. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, *CI*, 11064–11070. https://doi.org/10.1109/IROS55552.2023.10341604.

[7] N. Milati, H. R. Ali, and O. Wahyunggoro, "Dynamic state estimation of sub-transient synchronous generator model using unscented kalman filter," in 2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA), 2023, pp. 387–392.

[8] [1] N. A. Ramadhani, H. R. Ali, and O. Wahyunggoro, "Derivative-based Dynamic State Estimation of Synchronous Generator using Extended Kalman Filter," in *Proc. 2024 Int. Conf. Smart Computing, IoT and Machine Learning (SIML)*, Surakarta, Indonesia, 2024, pp. 105-111, doi: 10.1109/SIML61815.2024.10578238.

[9] S. Suharto, I. Robandi, and A. Priyadi, "Penalaan power system stabilizer (pss) untuk perbaikan stabilitas dinamik pada sistem tenaga listrik menggunakan bat algorithm (ba)," Jurnal Teknik ITS, vol. 4, no. 1, 2015.

[10] J. Ninazunta and S. Gamboa, "Dynamic state estimation of a synchronous machine applying the extended kalman filter technique," 2024 International Conference on Smart Computing, IoT and Machine Learning (SIML) 110 Authorized licensed use limited to: UNIVERSITAS GADJAH MADA. Downloaded on July 18,2024 at 01:51:54 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply. in Advances in Emerging Trends and Technologies, M. Botto-Tobar, J. Leon-Acurio, A. D ´ ´ıaz Cadena, and P. Montiel D´ıaz, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 176–188.

[11] A. K. Singh and B. C. Pal, "IEEE PES Task Force on Benchmark Systems for Stability Controls Report on the 68-Bus, 16-Machine, 5- Area System."