

Simulasi Dan Analisis Perubahan Sudut Dan Kecepatan Sudut Rotor Terhadap Perubahan Konstanta Koefisien Redaman Torsi Pada Model *Single Machine Infinite Bus*

Ravi Shidqi Putra¹, Heru Dibyo Laksono^{2*}

^{1,2} Departemen Teknik Elektro Fakultas Universitas Andalas Padang 25166

*Korespondensi Penulis : herudibylaksono@eng.unand.ac.id

(Received: 18-03-2024; Revised: 03-06-2024; Accepted: 05-06-2024)

Abstract. *Stability is one of the important aspects in power system operation. Disturbances in power system operations often occur, which cause the power system to become unstable, resulting in a system that does not work normally after experiencing a disturbance. Disturbances are caused by continuous load changes, which result in changes in important parameters such as voltage and frequency. To understand and improve the stability of the power system, an accurate mathematical model is needed that matches the actual system behavior. One of the models used in this research is the Single Machine Infinite Bus (SMIB) model. This research is focused on analyzing the control system in the SMIB model against changes in torque damping parameters. The analysis method involves the use of computer simulation using MATLAB to model the dynamic response of the SMIB system to variations in the tested parameters. The simulation results show the constant value of the torque damping coefficient K_d that meets the design criteria, while for rotor angle changes that meet the design criteria, namely when the constant value of the torque damping coefficient $K_d = 30$ with a phase margin value of 44.97500 which is in accordance with the design criteria ranging from 30 to 60 degree.*

Keywords: *Single machine infinite bus (SMIB), damping torque, control system, simulation MATLAB, system stability.*

Abstrak. Kestabilan merupakan salah satu aspek penting dalam operasi sistem tenaga listrik. Gangguan pada operasi sistem tenaga listrik sering terjadi, yang dimana gangguan tersebut mengakibatkan sistem tenaga listrik menjadi tidak stabil, sehingga berdampak pada sistem yang bekerja secara tidak normal setelah mengalami gangguan. Gangguan disebabkan karena terjadinya perubahan beban secara berkelanjutan, yang mengakibatkan terjadinya perubahan parameter - parameter penting seperti tegangan dan frekuensi. Untuk memahami dan meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik, diperlukan model matematika yang akurat dan sesuai dengan perilaku sistem sebenarnya. Salah satu model yang digunakan dalam penelitian ini adalah model *Single Machine Infinite Bus* (SMIB). Penelitian ini difokuskan pada analisis sistem kendali pada model SMIB terhadap perubahan parameter redaman torsi. Metode analisis melibatkan penggunaan simulasi komputer menggunakan program MATLAB untuk memodelkan respons dinamis sistem SMIB terhadap domain waktu dan frekuensi dengan menggunakan analisa peralihan dan kestabilan dengan variasi parameter yang diujikan. Hasil simulasi menunjukkan nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d yang memenuhi kriteria perancangan, sedangkan untuk perubahan sudut rotor yang memenuhi kriteria perancangan yaitu pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi $K_d = 30$ dengan nilai margin fasa sebesar 44.97500 yang sesuai dengan kriteria perancangan berkisar antara 30 s/d 60 derajat.

Kata kunci: *single machine infinite bus, redaman torsi, sistem kendali, simulasi MATLAB, stabilitas sistem.*

PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik memiliki peran yang sangat penting dalam masyarakat modern saat ini, yang dimana sistem tenaga listrik menggerakkan berbagai aspek dalam kehidupan. Guna memastikan sumber listrik yang efisien dan andal, perlu dipahami agar sistem dapat beroperasi dengan baik dan memaksimalkan kinerjanya jika terjadi gangguan dinamis, yaitu perubahan beban secara tiba-tiba pada sistem tenaga listrik. Gangguan tersebut menyebabkan kestabilan generator terganggu, yang dimana kestabilan adalah kemampuan sistem untuk kembali normal atau stabil setelah mengalami gangguan [1], karena generator tidak menanggapi gangguan dengan cepat, hal ini mengakibatkan terjadinya osilasi pada generator yang berupa osilasi frekuensi dan sudut rotor [2]. Peningkatan level osilasi meningkatkan fluktuasi beban yang tinggi yang menyebabkan ketidak-stabilan pada sistem [3]. Kestabilan merupakan salah satu aspek kunci agar sistem tenaga listrik memiliki kinerja yang baik dan optimal [4], ketidakstabilan sistem dapat berdampak pada generator pembangkit daya yang akan mengalami kehilangan sinkronisme yang pada akhirnya menyebabkan sistem tenaga menjadi gagal atau kolaps [5].

Untuk memahami dan meningkatkan stabilitas pada sistem tenaga listrik, diperlukan model matematika yang akurat dan sesuai dengan perilaku sistem sebenarnya. Salah satu model yang digunakan sebagai referensi pada penelitian ini merupakan model *Single Machine Infinite Bus* (SMIB). Model SMIB ini menggambarkan sistem sederhana yang terdiri dari satu generator yang dihubungkan ke bus dalam jumlah tak terhingga [6], [7]. Model ini mempunyai nilai penting dalam memahami karakteristik dinamis sistem tenaga listrik.

Tantangan utama dalam menjaga kestabilan suatu sistem tenaga listrik adalah mengendalikan perubahan kecepatan sudut atau rotasi pada sistem tersebut. Perubahan ini akan menghasilkan osilasi dan bisa menyebabkan generator kehilangan sinkronisasinya dan berakibat sistem blackout [8]. Oleh karena itu, pada penelitian kali ini akan fokus pada konsep redaman torsi, yaitu torsi atau momen yang diciptakan untuk mengontrol perubahan kecepatan sudut atau putaran suatu sistem. Dengan menggunakan rasio redaman minimum sebagai indeks, optimisasi indikator ini dapat memindahkan koordinat setiap nilai eigen pada bidang s kompleks mendekati garis sumbu real [9].

Selain itu, penting untuk memastikan bahwa generator yang akan dihubungkan dengan sistem tenaga listrik dapat menjalankan proses sinkronisasi dengan baik. Sinkronisasi ini memerlukan keselarasan fasa dan kecepatan putaran antara generator yang akan dihubungkan dengan sistem tenaga listrik yang ada. Untuk mencapai keselarasan tersebut diperlukan sinkronisasi torsi, yaitu torsi atau momen yang diterapkan untuk menyelaraskan fasa atau sudut rotor dari poros input dan output agar generator dapat tersambung tanpa mengganggu pengoperasian sistem tenaga listrik [10].

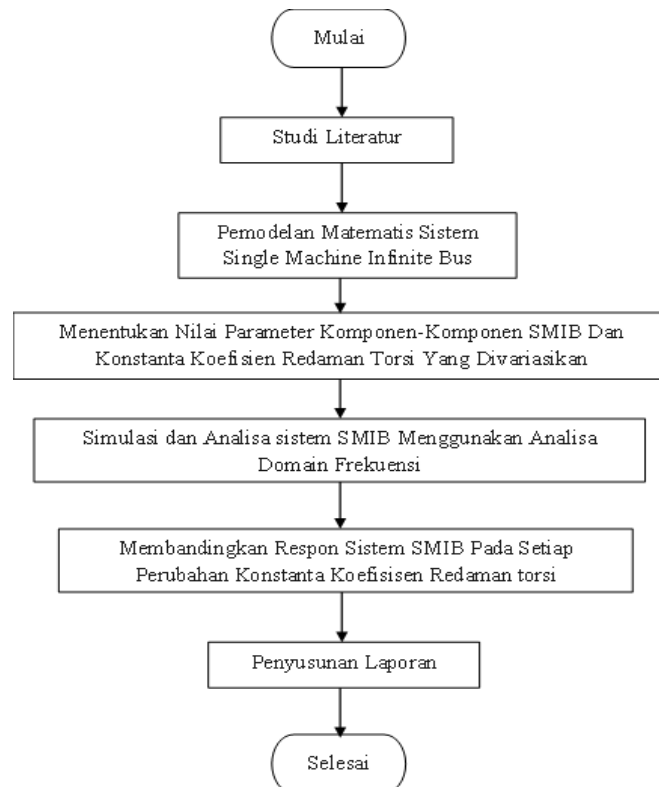
Sebelum membahas lebih jauh mengenai sinkronisasi torsi dan analisis sistem kendali pada model SMIB, ada baiknya meninjau beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Penelitian Djodi Antono dkk. mengeksplorasi implementasi sinkronisasi jaringan listrik tiga fasa PLN dengan generator sinkron, menyoroti pentingnya proses sinkronisasi untuk meningkatkan keandalan dan kapasitas sistem tenaga listrik [11]. Proses sinkronisasi ini meliputi penyetaraan frekuensi, tegangan, sudut fasa dan urutan fasa antara generator dengan sistem pada jaringan PLN, hal ini sangat relevan dengan tujuan penelitian ini.

Selanjutnya, dalam konteks redaman torsi dan stabilitas sistem, sebuah studi yang dilakukan di Universitas Negeri Padang oleh Eko Solihin et al. menganalisis kestabilan dinamik pada sistem *Single Machine Infinite Bus* (SMIB) dengan menggunakan kontrol *Power System Stabilizer* (PSS) dan kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID). Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan kontrol PID pada sistem SMIB yang dilengkapi PSS memberikan hasil yang sangat baik dalam meredam osilasi sudut rotor dan frekuensi [12]. Temuan ini memberikan dasar yang kuat untuk penelitian ini, yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter redaman torsi terhadap stabilitas sistem tenaga listrik.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sistem kendali pada model SMIB dengan mempertimbangkan variasi redaman torsi. Alat yang digunakan untuk simulasi menggunakan simulasi komputer yaitu dengan menggunakan *software* MATLAB sebagai alat utama untuk menganalisis respon dinamis model SMIB terhadap perubahan parameter tersebut. Simulasi ini akan membantu dalam memahami bagaimana parameter redaman torsi mempengaruhi sistem kendali, terutama dalam hal menjaga stabilitas sistem tenaga listrik.

METODE

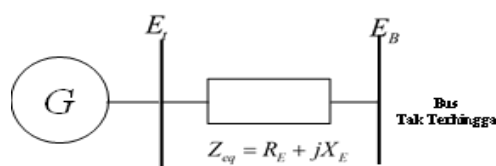
Bagian metode penelitian ini akan menjabarkan flowchart, pemodelan matematis *Single Machine Infinite Bus*, diagram blok *Single Machine Infinite Bus*, persamaan keadaan *Single Machine Infinite Bus*, prosedur perancangan.



GAMBAR 1. Flowchart penelitian.

Pemodelan Matematis *Single Machine Infinite Bus*

Model *Single Machine Infinite Bus* (SMIB) merupakan representasi sistem tenaga yang disederhanakan yang terdiri dari satu generator yang terhubung ke bus tak terhingga melalui saluran transmisi [6]. Bentuk ekuivalen dari diagram SMIB diperlihatkan pada gambar 2.



GAMBAR 2. Bentuk ekuivalen diagram SMIB.

Gambar 2 merupakan bentuk ekuivalen diagram SMIB yang terhubung ke sistem yang lebih besar melalui saluran transmisi [13]. Dalam penelitian ini akan menggunakan representasi diagram blok dan hubungan torsi sudut untuk menganalisis karakteristik stabilitas sistem. Pendekatan diagram blok pertama kali digunakan oleh Heffron dan Phillips dan kemudian oleh deMello dan Concordia untuk menganalisis stabilitas mesin sinkron [14]. Pemodelan matematis dari SMIB diperoleh dari persamaan diferensial dan transformasi Laplace gerak sudut rotor. Berikut merupakan persamaan linear gerak sudut rotor

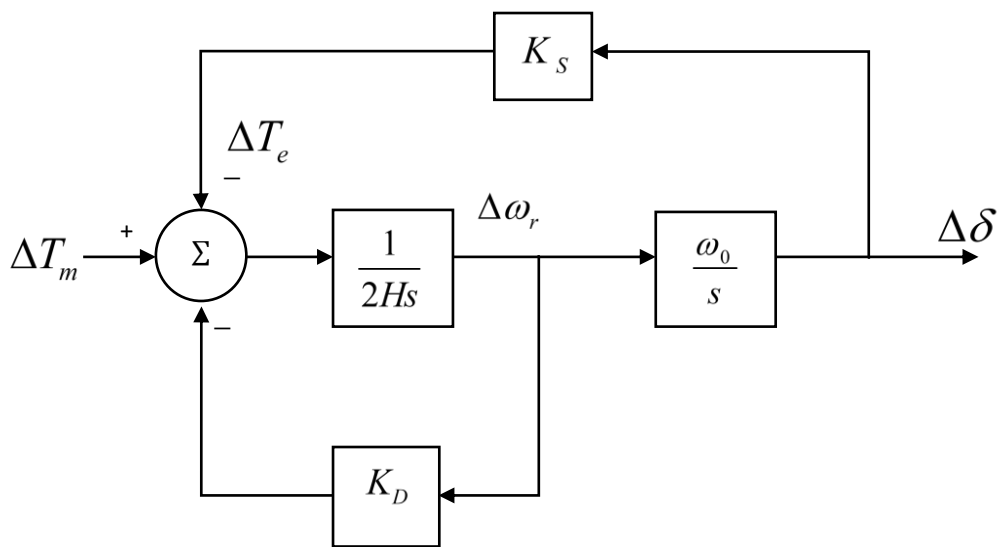
$$p\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} [\Delta T_m - K_s \Delta\delta - K_D \Delta\omega_r] \quad (1)$$

$$p\Delta\delta = \omega_0 \Delta\omega_r \quad (2)$$

Berdasarkan persamaan 1 dan 2 diperoleh persamaan linear differensial dari gerak sudut rotor sebagai berikut

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_s}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (3)$$

Sehingga diperoleh blok diagram representasi dari sistem linear SMIB sebagai berikut



GAMBAR 3. Blok diagram *single machine infinite bus* dengan generator model klasik [16].

Dimana : K_S = Koefisien sinkronisasi torsi (pu torsi/rad)
 K_D = Koefisien redaman torsi (pu torsi/pu kecepatan deviasi)
 H = Inersia konstan (MW-s/MVA)
 $\Delta\omega_r$ = Kecepatan deviasi (pu = $(\omega_r - \omega_0)/\omega_0$)
 $\Delta\delta$ = deviasi sudut rotor (elec. rad)
 s = Laplace operator
 ω_0 = Kecepatan minimal (elec. rad/s = $2\pi f_0$)
 = 377 for a 60 Hz

Berdasarkan persamaan 3 diperoleh persamaan keadaan sistem *single machine infinite bus* yang direpresentasikan dalam bentuk persamaan (5) dan (6) sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bx(t) \quad (5)$$

$$\dot{y}(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (6)$$

Dimana

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_S}{2H} \\ 377 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$D = [0] \quad (10)$$

Setelah memperoleh persamaan keadaan dari sistem *single machine infinite bus*, selanjutnya berdasarkan blok diagram pada gambar 1 diperoleh fungsi alih dari sistem *single machine infinite bus*.

Menentukan Data Parameter Sistem *Single Machine Infinite Bus*

Menentukan nilai semua komponen dari blok diagram SMIB pada gambar 1 pada saat kondisi operasi sistem tenaga listrik kembali pada keadaan tunak setelah mengalami gangguan. Adapun data parameter SMIB seperti pada tabel 1.

TABEL 1. Data parameter SMIB model klasik.

Parameter	Nilai	Definisi
P	0.9	Suplai daya aktif generator
Q	0.3	Suplai daya reaktif generator
E_t	$1.0 \angle 36^\circ$	Tegangan terminal generator
E_B	$0.995 \angle 0^\circ$	Tegangan bus tak hingga
X'_d	0.3	Reaktansi transien generator
H	3.5	Inersia mesin

Analisa Kendali Sistem *Single Machine Infinite Bus*

Pada bagian ini dilakukan analisa kendali sistem SMIB. Analisa yang dilakukan meliputi analisa domain frekuensi dengan menggunakan analisa diagram bode dan magnitude bode dengan menggunakan *software* Matlab.

Analisa domain frekuensi lingkaran terbuka meliputi margin fasa, margin penguatan, frekuensi margin penguatan, dan frekuensi margin. Perhitungan margin penguatan dilakukan dengan menggunakan persamaan (11) berikut:

$$K_g = \frac{1}{|G(j\omega_1)|} \quad (11)$$

Persamaan (11) dapat dikonversi dalam satuan decibel (dB) menggunakan persamaan (12) berikut:

$$K_g \text{ dB} = 20 \log K_g = -20 \log |G(j\omega_1)| \quad (12)$$

Analisa domain frekuensi lingkaran tertutup terdiri dari frekuensi puncak resonansi, nilai puncak resonansi, dan lebar pita. Nilai puncak resonansi M_r yang ditunjukkan dalam persamaan (13) berikut

$$M_r = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (13)$$

Frekuensi puncak resonansi dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1-2\zeta^2} \quad (14)$$

Besar lebar pita (BW) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$\omega_c = \omega_n \left\{ (1-2\zeta^2) \pm \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 - 2} \right\}^{0.5} \quad (15)$$

$$BW = \omega_n \quad (16)$$

Simulasi Perhitungan Kendali Sistem *Single Machine Infinite Bus* Dengan Variasi Konstanta Koefisien Redaman Torsi

Pada bagian ini dilakukan simulasi perhitungan sistem SMIB dengan variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d dengan variasi nilai K_d yaitu sebesar 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100. Simulasi perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan keadaan dari sistem SMIB yaitu persamaan 7 s/d 10.

Analisa Kendali Sistem SMIB Dengan Variasi Konstanta Koefisien Redaman Torsi

Pada bagian ini dilakukan analisa kendali sistem SMIB dengan variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d . Analisa yang digunakan pada penelitian ini merupakan analisa domain frekuensi dari sistem SMIB.

Analisa domain frekuensi lingkaran terbuka pada sistem SMIB untuk setiap variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d terdiri dari margin penguatan, frekuensi margin penguatan, margin fasa dan frekuensi margin yang dihitung dengan menggunakan persamaan (11) dan (12).

Analisa domain frekuensi lingkaran tertutup pada sistem SMIB untuk setiap variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d terdiri dari frekuensi puncak resonansi, nilai puncak resonansi, dan lebar pita yang dihitung dengan menggunakan persamaan (13) - (16).

Analisa kendali dari sistem SMIB untuk setiap variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d diperoleh dengan bantuan perangkat lunak MATLAB.

Kriteria Perancangan

Berdasarkan hasil analisa domain frekuensi maka ditentukan kriteria perancangan agar sistem SMIB mempunyai performansi yang lebih baik. Adapun kriteria perancangan yang diinginkan meliputi

- Nilai margin fasa berada pada rentang 30° - 60° .
- Nilai puncak resonansi berkisar pada rentang 1.1 - 1.5.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Domain Frekuensi Sistem SMIB Untuk Fungsi Alih Lingkaran Terbuka

Bagian ini menjelaskan hasil perhitungan dan analisa dalam bentuk domain frekuensi terhadap perubahan sudut dan kecepatan sudut rotor sistem SMIB terhadap perubahan parameter konstanta koefisien redaman torsi menggunakan fungsi alih lingkaran terbuka. Parameter yang dihitung meliputi margin fasa, margin penguatan, frekuensi margin

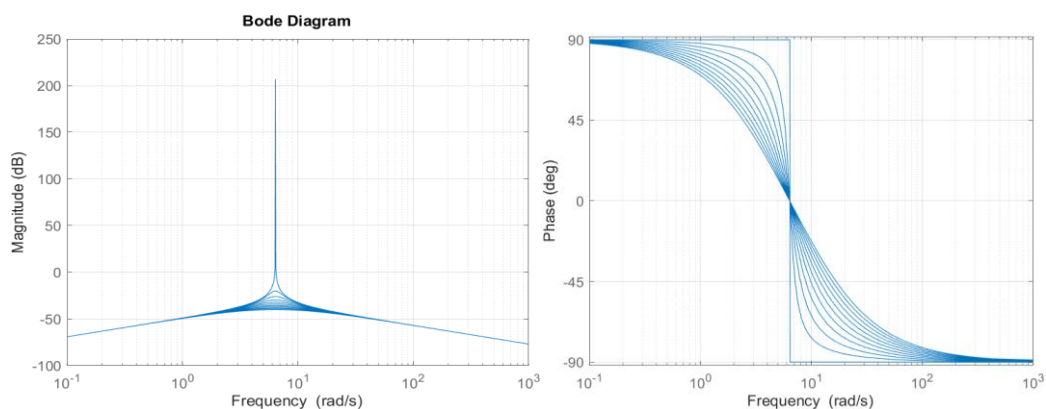
penguatan, dan frekuensi margin yang dimana diperlihatkan juga dalam bentuk diagram bode.

TABEL 2. Informasi respon frekuensi sistem SMIB untuk fungsi alih lingkaran terbuka terhadap perubahan kecepatan sudut rotor dengan variasi K_D .

K_d	Margin Penguatan	Margin Penguatan (dB)	Margin Fasa (derajat)	Frekuensi Margin Penguatan (Hz)	Frekuensi Margin Fasa (Hz)
0	Inf	Inf	-90	NaN	6.3157
10	Inf	Inf	Inf	NaN	NaN
20	Inf	Inf	Inf	NaN	NaN
30	Inf	Inf	Inf	NaN	NaN
40	Inf	Inf	Inf	NaN	NaN
50	Inf	Inf	Inf	NaN	NaN
60	Inf	Inf	Inf	NaN	NaN
70	Inf	Inf	Inf	NaN	NaN
80	Inf	Inf	Inf	NaN	NaN
90	Inf	Inf	Inf	NaN	NaN
100	Inf	Inf	Inf	NaN	NaN

Dari tabel 2 memperlihatkan hasil simulasi analisa dalam bentuk domain frekuensi menggunakan fungsi alih lingkaran terbuka terhadap perubahan kecepatan sudut rotor sistem SMIB. Berdasarkan hasil simulasi ini memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d menyebabkan perubahan nilai margin fasa dan frekuensi margin fasa, yaitu pada saat nilai $K_d = 0$ margin fasa bernilai -900 dan frekuensi margin fasa bernilai 6.3157 Hz. Sedangkan pada saat nilai $K_d > 0$ margin fasa hasilnya tak hingga dan frekuensi margin fasa hasilnya NaN (Not a Number).

Dapat dilihat bahwa untuk variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d tidak ada yang memenuhi kriteria perancangan. Karena pada penelitian terdahulu tanggapan tegangan sistem bersifat stabil dan mutlak jika memiliki nilai margin penguatan besar dari 6.0000 dB dan nilai margin fasa berkisar antara 30.000 s/d 60.000 derajat [15]. Hal ini disebabkan karena koefisien redaman torsi tidak dirancang untuk mengontrol kecepatan sudut rotor secara langsung, tetapi untuk memastikan bahwa sistem dapat pulih dari gangguan dengan cepat dan efisien, dengan mempertahankan sudut rotor dalam batas yang aman dan menghindari ketidakstabilan sistem. Oleh karena itu, koefisien redaman torsi memiliki dampak yang lebih besar pada perilaku sudut rotor daripada pada kecepatan sudut rotor itu sendiri. Adapun respon perubahan kecepatan sudut rotor sistem SMIB terhadap perubahan parameter konstanta koefisien redaman torsi menggunakan fungsi alih lingkaran terbuka diperlihatkan pada diagram bode gambar 3.



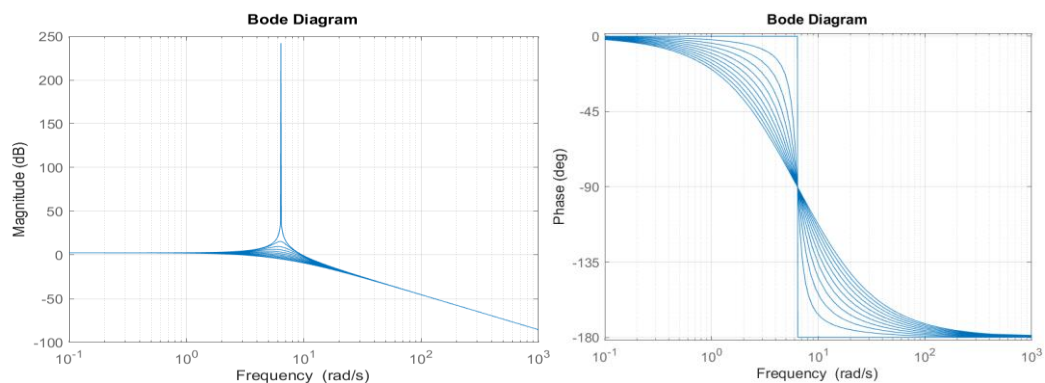
GAMBAR 3. Diagram bode perubahan kecepatan sudut rotor sistem smib terhadap perubahan parameter K_d .

TABEL 3. Informasi respon frekuensi sistem SMIB untuk fungsi alih lingkaran terbuka terhadap perubahan sudut rotor dengan variasi K_d .

K_d	Margin Penguatan	Margin Penguatan (dB)	Margin Fasa (derajat)	Frekuensi Margin Penguatan	Frekuensi Margin Fasa (Hz)
0	Inf	Inf	0	NaN	9.7301
10	Inf	Inf	14.809	NaN	9.6364
20	Inf	Inf	29.751	NaN	9.3577
30	Inf	Inf	44.975	NaN	8.882
40	Inf	Inf	60.517	NaN	8.2032
50	Inf	Inf	76.218	NaN	7.3225
60	Inf	Inf	91.431	NaN	6.2806
70	Inf	Inf	104.68	NaN	5.21
80	Inf	Inf	114.62	NaN	4.284
90	Inf	Inf	121.3	NaN	3.5793
100	Inf	Inf	125.68	NaN	3.0623

Dari tabel 3 memperlihatkan hasil simulasi analisa dalam bentuk domain frekuensi menggunakan fungsi alih lingkaran terbuka untuk perubahan sudut rotor sistem SMIB, dapat dilihat bahwa untuk variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d menyebabkan perubahan nilai margin fasa dan frekuensi margin fasa yang dimana untuk nilai margin fasa yang berbanding lurus dengan nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d , sedangkan untuk frekuensi margin fasa yang dimana nilainya semakin kecil pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d semakin besar.

Berdasarkan hasil simulasi menunjukan pada saat nilai $K_d = 30$ yang memenuhi kriteria perancangan yang dimana nilai margin fasa berada pada rentang 30^0 s/d 60^0 yaitu dengan margin fasa yang nilainya 44.9750. Hal ini disebabkan karena Koefisien redaman torsi mempengaruhi cara sistem merespons terhadap perubahan dalam torsi listrik, yang dapat disebabkan oleh fluktuasi beban atau gangguan lainnya. Dalam hal ini, koefisien redaman membantu menstabilkan sudut rotor dengan meredam osilasi yang terjadi setelah gangguan. Ini penting untuk memastikan bahwa sudut rotor tidak menyimpang terlalu jauh dari posisi seimbangnya, yang dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Adapun respon perubahan sudut rotor sistem SMIB terhadap perubahan parameter konstanta koefisien redaman torsi menggunakan fungsi alih lingkaran terbuka diperlihatkan pada diagram bode gambar 4.



GAMBAR 4. Diagram bode perubahan sudut rotor sistem smib terhadap perubahan parameter K_d .

Analisa Domain Frekuensi Sistem SMIB Untuk Fungsi Alih Lingkaran Tertutup

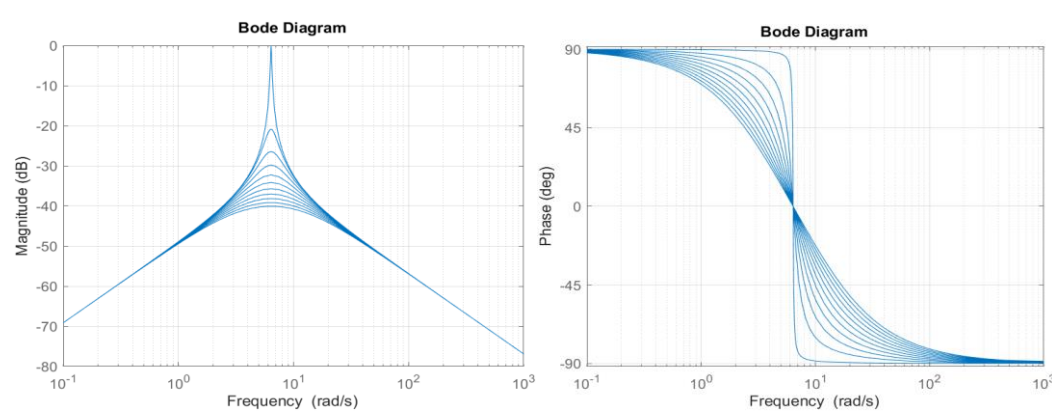
Bagian ini menjelaskan hasil perhitungan dan analisa domain frekuensi terhadap perubahan sudut dan kecepatan sudut rotor sistem SMIB terhadap perubahan parameter konstanta koefisien redaman torsi menggunakan fungsi alih lingkaran tertutup. Parameter yang dihitung meliputi lebar pita, nilai puncak resonansi, frekuensi puncak resonansi yang dimana diperlihatkan juga dalam bentuk diagram bode.

TABEL 4 Informasi respon frekuensi sistem SMIB untuk fungsi alih lingkaran tertutup terhadap perubahan kecepatan sudut rotor dengan variasi K_D .

K_d	Lebar Pita (rad/detik)	Nilai Puncak Resonansi	Nilai Puncak Resonansi (dB)	Frekuensi Puncak Resonansi (rad/detik)
0	Inf	1	-1.9287e-15	6.3867
10	Inf	0.090909	-20.828	6.3867
20	Inf	0.047619	-26.444	6.3867
30	Inf	0.032258	-29.827	6.3867
40	Inf	0.02439	-32.256	6.3867
50	Inf	0.019608	-34.151	6.3867
60	Inf	0.016393	-35.707	6.3867
70	Inf	0.014085	-37.025	6.3867
80	Inf	0.012346	-38.17	6.3867
90	Inf	0.010989	-39.181	6.3867
100	Inf	0.009901	-40.086	6.3867

Dari tabel 4 memperlihatkan hasil simulasi analisa dalam bentuk domain frekuensi menggunakan fungsi alih lingkaran tertutup terhadap perubahan kecepatan sudut rotor sistem SMIB, berdasarkan hasil simulasi ini memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d menyebabkan perubahan nilai puncak resonansi yang dimana untuk puncak resonansi nilainya semakin kecil pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d semakin besar, sedangkan untuk frekuensi puncak resonansi nilainya konstan yaitu sebesar 6.3867 rad/detik.

Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat bahwa untuk variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d tidak ada yang memenuhi kriteria perancangan dengan rentang nilai puncak resonansi yaitu 1.1 - 1.5. Adapun respon perubahan kecepatan sudut rotor sistem SMIB terhadap perubahan parameter konstanta koefisien redaman torsi menggunakan fungsi alih lingkaran terbuka diperlihatkan pada diagram bode gambar 5.



GAMBAR 5. Diagram bode perubahan kecepatan sudut rotor sistem SMIB terhadap perubahan parameter K_d .

Dari tabel 5 memperlihatkan hasil simulasi analisa dalam bentuk domain frekuensi menggunakan fungsi alih lingkaran tertutup untuk perubahan sudut rotor sistem SMIB, dapat dilihat bahwa untuk variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d menyebabkan perubahan pada frekuensi puncak resonansi, nilai lebar pita, dan nilai puncak resonansi.

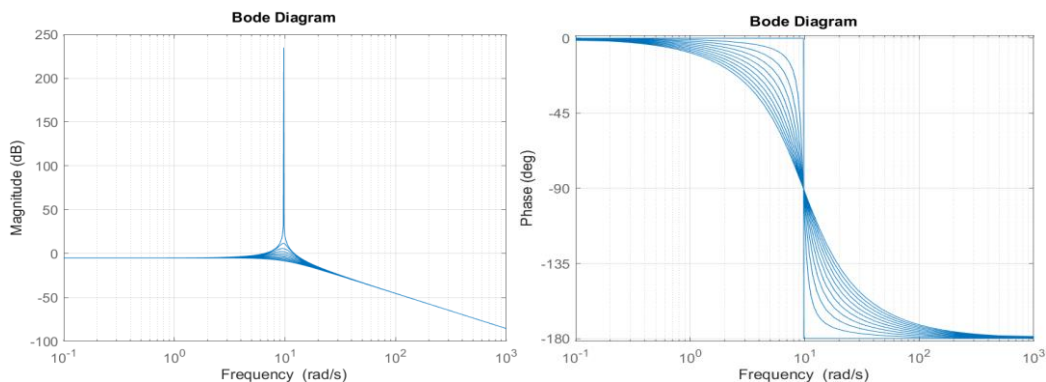
Berlandaskan hasil simulasi memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d mempengaruhi lebar pita yang ditunjukkan dengan nilai lebar pita yang semakin kecil pada saat konstanta koefisien redaman torsi K_d semakin besar. Nilai puncak resonansi mengalami perubahan nilai yang ditunjukkan dengan nilai puncak resonansi yang semakin kecil pada saat konstanta koefisien redaman torsi K_d semakin besar. Nilai frekuensi puncak resonansi mengalami perubahan nilai yang ditunjukkan dengan nilai

frekuensi puncak resonansi yang semakin kecil pada saat konstanta koefisien redaman torsi K_d semakin besar.

TABEL 5. Informasi respon frekuensi sistem SMIB untuk fungsi alih lingkaran tertutup terhadap perubahan sudut rotor dengan variasi K_d .

K_d	Lebar Pita (rad/detik)	Nilai Puncak Resonansi	Nilai Puncak Resonansi (dB)	Frekuensi Puncak Resonansi (rad/detik)
0	15.111	4.1135e+16	332.28	9.7287
10	15.053	3.8856	11.789	9.6765
20	14.88	1.9588	5.8398	9.5162
30	14.588	1.3242	2.4393	9.2498
40	14.177	1.0135	0.11621	8.8596
50	13.644	0.8332	-1.5851	8.3291
60	12.988	0.71942	-2.8603	7.5974
70	12.21	0.64534	-3.8042	6.6941
80	11.323	0.59845	-4.4594	5.5338
90	10.353	0.57364	-4.8272	3.5553
100	9.3444	0.56903	-4.8973	0

Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada saat nilai $K_d = 30$ memenuhi kriteria perancangan yang dimana nilai puncak resonansi berada pada rentang 1.1 s/d 1.5. Adapun respon perubahan sudut rotor sistem SMIB terhadap perubahan parameter konstanta koefisien redaman torsi menggunakan fungsi alih lingkaran terbuka diperlihatkan pada gambar 6 diagram bode.



Gambar 6. Diagram bode perubahan sudut rotor sistem SMIB terhadap perubahan parameter K_d .

KESIMPULAN

Berlandaskan hasil simulasi perhitungan dan analisa domain frekuensi sistem SMIB menggunakan fungsi alih lingkaran terbuka memperlihatkan bahwa untuk perubahan kecepatan sudut rotor tidak ada nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d yang memenuhi kriteria perancangan, Hal ini disebabkan karena koefisien redaman torsi tidak dirancang untuk mengontrol kecepatan sudut rotor secara langsung, tetapi untuk memastikan bahwa sistem dapat pulih dari gangguan dengan cepat dan efisien, dengan mempertahankan sudut rotor dalam batas yang aman dan menghindari ketidakstabilan sistem. Oleh karena itu, koefisien redaman torsi memiliki dampak yang lebih besar pada perilaku sudut rotor daripada pada kecepatan sudut rotor itu sendiri. Sedangkan untuk perubahan sudut rotor yang memenuhi kriteria perancangan yaitu pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi $K_d = 30$ dengan nilai margin fasa sebesar 44.9750° yang sesuai dengan kriteria perancangan berkisar antara 30° s/d 60° . Hal ini disebabkan karena koefisien redaman torsi mempengaruhi cara sistem merespons terhadap perubahan dalam torsi listrik, yang dapat disebabkan oleh fluktuasi beban atau gangguan lainnya. Dalam hal ini, koefisien redaman membantu menstabilkan sudut rotor dengan meredam osilasi yang terjadi setelah gangguan. Ini penting untuk memastikan bahwa sudut rotor tidak menyimpang terlalu jauh

dari posisi seimbangnya, yang dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Berlandaskan hasil simulasi perhitungan dan analisa domain frekuensi sistem SMIB menggunakan fungsi alih lingkaran tertutup memperlihatkan bahwa untuk perubahan kecepatan sudut rotor tidak ada nilai konstanta koefisien redaman torsi K_d yang memenuhi kriteria perancangan, sedangkan untuk perubahan sudut rotor yang memenuhi kriteria perancangan yaitu pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi $K_d = 30$ dengan rentang nilai puncak resonansi yang berada diantara nilai 1.1 s/d 1.5. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai koefisien redaman torsi yang dapat membuat sistem SMIB kembali pada posisi stabilnya setelah mengalami gangguan yaitu dengan nilai konstanta koefisien redaman torsi $K_d = 30$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Mahmoud, "Stabilization of Terminal Voltage and Damping the Mechanical Angle Oscillations in Single-machine Infinite-bus Power System Using MISO Fuzzy Controllers," *Preprints*, 2022.
- [2] M. R. Djalal dan N. Kadir, "Penalaan Optimal Kontroler PSS-PID Pada Sistem Single Machine Infinite Bus Menggunakan Ant Colony Optimization," *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, vol. 10, no. 1, 2021.
- [3] N. Sahu, M. Singh and S. Ralhan, "Performance Analysis of Hybrid Controller in SMIB System using Metaheuristic Optimization Techniques under Different Design Criteria," *International Journal of Power Systems*, vol. 5, pp. 116-129, 2020.
- [4] A. Hammoudeh dan M. A. Saaideh, "Estimation of synchronizing and damping torque coefficients using deep learning," 2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT), pp. 488-493, 2019.
- [5] R. Gianto, "Penggunaan UPFC (Unified Power Flow Controller) untuk Perbaikan," *ELECTRICIAN*, vol. 15, pp. 25-32, 2021.
- [6] S. V. Kumbhar dan V. P. Mohale, "Comparative Study of the Effect of Power System," *Proceedings of the International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC 2020)*, pp. 1288-1292, 2020.
- [7] N. Kadir dan M. R. Djalal, "Optimal design PSS-PID control on single machine infinite bus using ANT COLONY optimization," *Sinergi*, repository.poliupg.ac.id, vol. 25, no. 2, pp. 169-176, 2021.
- [8] C. H. Totz, S. Olmi dan E. Schöll, "Control of synchronization in two-layer power grids," *Phys. Rev. E*, vol. 102, no. 2, p. 022311, 2020.
- [9] N. A. M. Kamari, I. Musirin dan A. A. Ibrahim, "Swarm Intelligence Approach for Angle Stability Improvement of PSS and SVC-Based SMIB," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 1001-1014, 2020.
- [10] W. Dong, Y. Wang dan H. F. Wang, "A Method to Design Power System Stabilizers in a Multi-Machine Power System Based on Single-Machine Infinite-Bus System Model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, pp. 3475-3486, 2021.
- [11] D. Antono dan M. Khambali, "Penerapan Sinkronisasi Jaringan Listrik Tiga Fasa PLN dengan Generator Sinkron Menggunakan Trainer Power Sistem Simulation," *{JTET (Jurnal Teknik Elektro Terapan}*, pp. 151-158, 2013.
- [12] E. Solihin, M. Yuhendri, Risfendra dan Aslimeri, "Analisis Kestabilan Dinamik Pada Sistem Single Machine Infinite Bus," *Jurnal Teknik Elektro Dan Vokasional*, vol. 7, no. 2, pp. 210-220, 2021.

- [13] M. P. Aghababa, B. Marinescu dan F. Xavier, "Observer-based tracking control for single machine infinite bus system via flatness theory," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020.
- [14] M. Pereira dan R. E. Araújo, "Analysis and Design of a Speed Controller for Switched Reluctance Motor Drive," *U.Porto Journal of Engineering*, vol. 5, pp. 46-58, 2019.
- [15] H. D. Laksono, Mazues dan W. D. A, "Analisa Kestabilan Sistem Kendali Eksitasi Generator Tipe Arus Searah Tanpa Dan Dengan Pengendali Berdasarkan Pendekatan Tanggapan Frekuensi," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 6, no. 3, pp. 350-359, 2016.
- [16] A. Sayudi, R. S. Hartati dan I. B. G. Manuaba, "Penalaan Power System Stabilizer PLTDG Pesanggaran Berbasis Losses Concept," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 8, no. 1, pp. 38-44, 2021.