

# Simulasi dan Analisis Sistem Single Machine Infinite Bus terhadap Perubahan Parameter

## Simulation and Analysis of Single Machine Infinite Bus System against Parameter Changes

Heru Dibyo Laksono<sup>1</sup>, Ravi Shidqi Putra<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas; email: herudibyo@laksono@eng.unand.ac.id

<sup>2</sup> Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas; email: <sup>2</sup>ravishidqi05@gmail.com

[Dikirimkan: 18 April 2024, Direvisi: 3 November 2024, Diterima: 25 November 2024]

Corresponding Author: Heru Dibyo Laksono

**INTISARI** — Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan salah satu aspek penting dalam operasi sistem tenaga listrik. Gangguan pada sistem tenaga listrik sering terjadi yang mengakibatkan peningkatan level osilasi yang akan berdampak pada kestabilan sistem tenaga listrik. Salah satu model yang digunakan dalam penelitian ini adalah model *Single Machine Infinite Bus* (SMIB), model ini mampu memahami dan meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh dan mengoptimalkan konfigurasi nilai konstanta koefisien redaman torsi terhadap stabilitas sudut rotor dan kecepatan sudut rotor pada model linear SMIB. Metode analisis menggunakan analisis peralihan dan analisis kestabilan dengan memberikan variasi pada nilai parameter konstanta koefisien redaman torsi yang diujikan. Hasil simulasi menunjukkan pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi  $K_d = 70$  yang memenuhi kriteria perancangan untuk perubahan sudut rotor yang ditandai dengan nilai waktu naik 0.17129 detik, waktu puncak 0.37762 detik, waktu keadaan mantap 0.81285 detik, nilai puncak 0.65566, dan nilai *overshoot* 15.224%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi berpengaruh terhadap stabilitas sudut rotor dan kecepatan sudut rotor pada model linear SMIB.

**ABSTRACT** — *Power system stability is one of the important aspects in power system operation. Disturbances in the power system often occur which result in an increase in the level of oscillations that will have an impact on the stability of the power system. One of the models used in this research is the Single Machine Infinite Bus (SMIB) model, this model is able to understand and improve power system stability. This study aims to identify the influence and optimize the configuration of the constant value of the torque damping coefficient on the stability of the rotor angle and rotor angular velocity in the SMIB linear model. The analysis method uses transition analysis and stability analysis by providing variations in the value of the tested torque damping coefficient constant parameter. The simulation results show that when the value of the torque damping coefficient constant  $K_d = 70$  which meets the design criteria for rotor angle changes characterized by rise time value of 0.17129 seconds, peak time of 0.37762 seconds, settling time of 0.81285 seconds, peak value of 0.65566, and overshoot value of 15.224%. Simulation results show that changing the constant value of the torque damping coefficient affects the stability of the rotor angle and rotor angular velocity in the SMIB linear model.*

**KATA KUNCI** — Single Machine Infinite Bus, Redaman Torsi, Sistem Kendali, Simulasi MATLAB, Stabilitas Sistem.

### I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik mempunyai peranan yang sangat penting dalam masyarakat modern saat ini, dimana sistem tenaga listrik menggerakkan berbagai aspek kehidupan. Untuk menjamin sumber listrik yang efisien dan andal, diperlukan pemahaman agar sistem dapat beroperasi dengan baik dan memaksimalkan kinerjanya jika terjadi gangguan dinamis yaitu perubahan beban pada sistem tenaga listrik secara tiba-tiba dan terus menerus. Gangguan ini mengakibatkan kestabilan generator terganggu, kestabilan merupakan kemampuan sistem untuk kembali pada posisi *equilibrium* setelah mengalami gangguan [1], akibat generator tidak merespons gangguan, hal berdampak osilasi yang tidak normal pada generator berupa osilasi frekuensi pada rotor [2]. Peningkatan level osilasi meningkatkan fluktuasi beban yang tinggi yang menyebabkan ketidakstabilan pada sistem [3]. Kestabilan merupakan salah satu aspek kunci agar sistem tenaga listrik memiliki kinerja yang baik dan optimal [4], ketidakstabilan sistem dapat mengakibatkan generator-generator pembangkit daya menjadi kehilangan sinkronisme yang pada gilirannya dapat menyebabkan sistem tenaga menjadi gagal atau kolaps [5]

Agar sistem tenaga listrik terjaga kestabilannya, dibutuhkan 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). Model SMIB ini merupakan sistem sederhana yang terdiri dari satu generator yang dihubungkan ke bus dalam jumlah tak terhingga [6] [7].

Permasalahan utama dalam menjaga stabilitas suatu sistem tenaga listrik adalah mengendalikan perubahan kecepatan sudut atau putaran 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 membahas bagaimana pengaruh dan mengoptimalkan konfigurasi nilai konstanta koefisien redaman torsi terhadap stabilitas sudut rotor dan kecepatan sudut rotor pada

model linear SMIB. Dengan menggunakan rasio redaman minimum sebagai indeks, optimasi 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 fase 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 fase atau sudut rotor dari poros *input* dan *output* agar generator dapat tersambung tanpa mengganggu pengoperasian sistem tenaga listrik [10].

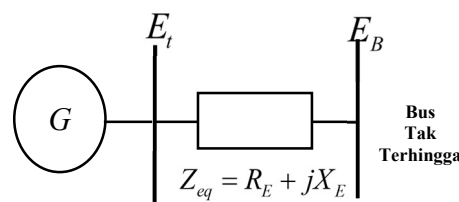
Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi pengaruh perubahan nilai dan mengoptimalkan konfigurasi nilai konstanta koefisien redaman torsi terhadap stabilitas sudut rotor dan kecepatan sudut rotor pada model linear SMIB. Alat yang digunakan untuk melakukan simulasi pada penelitian ini yaitu dengan menggunakan program pada *software* MATLAB sebagai alat utama untuk menganalisis respons dinamis model linear SMIB terhadap perubahan nilai parameter tersebut. Simulasi ini akan membantu dalam memahami bagaimana perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi mempengaruhi sistem kendali, terutama dalam hal menjaga stabilitas sistem tenaga listrik.

## II. METODE PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan pemodelan matematis *Single Machine Infinite Bus*, diagram blok *Single Machine Infinite Bus*, persamaan keadaan *Single Machine Infinite Bus*, menentukan data parameter sistem generator model klasik, dan simulasi perhitungan analisis peralihan dan analisis kestabilan sistem SMIB dengan variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi.

### A. 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 1 berikut



Gambar 1. Bentuk Ekuivalen Diagram SMIB

Gambar 1 merupakan bentuk ekuivalen diagram SMIB yang terhubung ke sistem yang lebih besar melalui saluran transmisi [11]. 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 [12]. Pemodelan matematis dari SMIB diperoleh dari persamaan diferensial dan transformasi Laplace gerak sudut rotor. Berikut merupakan persamaan linear gerak sudut rotor

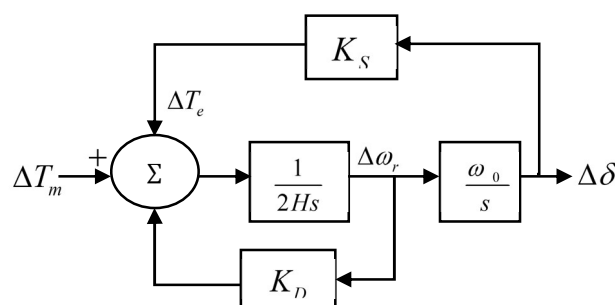
$$p\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} [\Delta T_m - K_s \Delta\delta - K_D \Delta\omega_r] \quad (1)$$

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

Berdasarkan persamaan 1 dan 2, diperoleh persamaan diferensial 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 2. Blok Diagram *Single Machine Infinite Bus* dengan Generator Model Klasik [14]

- Keterangan :
- $K_S$  = 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
  - $\omega_0$  = Kecepatan minimal (elec. rad/s =  $2\pi f_0$ )  
= 377 for a 60 Hz system

Adapun persamaan keadaan sistem *Single Machine Infinite Bus* dapat dinyatakan sebagai berikut

$$x(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (4)$$

dimana

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-K_d}{2H} & \frac{-K_s}{2H} \\ 377 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

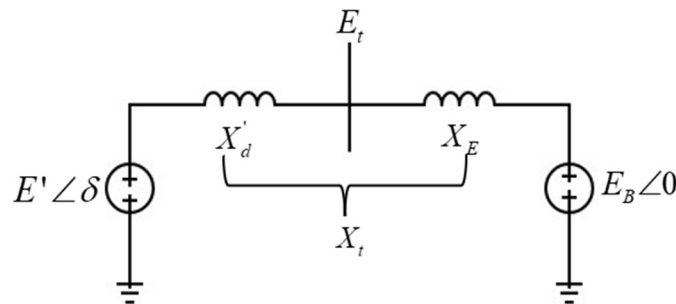
$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 2H \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D = [0] \quad (9)$$

Pada analisis stabilitas sistem tenaga listrik menggunakan sistem SMIB, generator yang digunakan merupakan generator model klasik. Pemodelan generator dengan model klasik mengasumsikan bahwa semua resistansi dalam generator dapat diabaikan agar memudahkan analisis sistem. Hasil dari model ini menghasilkan representasi sistem yang dapat dilihat dalam Gambar 3



Gambar 3. Representasi Sistem Generator Model Klasik [14]

### B. MENENTUKAN DATA PARAMETER SISTEM GENERATOR MODEL KLASIK

Menentukan nilai parameter sistem generator model klasik pada Gambar 3 dengan kondisi operasi sistem tenaga listrik pada keadaan tunak setelah mengalami gangguan. Adapun data parameter dari sistem dapat dilihat pada Tabel I berikut

TABEL I  
DATA PARAMETER MODEL KLASIK SMIB

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

Parameter	Nilai	Definisi
$H$	3.5	Inersia mesin

### C. SIMULASI PERHITUNGAN DAN ANALISIS PERALIHAN SISTEM SMIB DENGAN VARIASI NILAI KONSTANTA KOEFISIEN REDAMAN TORSI

Pada bagian ini dilakukan simulasi perhitungan dan analisis peralihan sistem *Single Machine Infinite Bus* 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, dan 100. Simulasi perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan keadaan dari sistem SMIB yaitu persamaan 5 s/d 9, simulasi perhitungan dilakukan menggunakan program pada *software* MATLAB. Adapun parameter yang diamati pada analisis peralihan adalah waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak dan *overshoot*.

### D. SIMULASI PERHITUNGAN ANALISIS KESTABILAN SISTEM SMIB DENGAN VARIASI NILAI KONSTANTA KOEFISIEN REDAMAN TORSI

Pada bagian ini dilakukan simulasi perhitungan dan analisis kestabilan sistem *Single Machine Infinite Bus* 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, dan 100. Simulasi perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan keadaan dari sistem SMIB yaitu persamaan 5 s/d 9, simulasi perhitungan dilakukan menggunakan program pada *software* MATLAB. Analisis kestabilan pada sistem SMIB untuk setiap variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi  $K_d$  dilakukan dengan metode akar-akar persamaan karakteristik.

### E. KRITERIA PERANCANGAN

Berdasarkan hasil perhitungan analisis peralihan maka ditentukan kriteria perancangan agar sistem SMIB mempunyai performansi yang lebih baik. Adapun kriteria perancangan yang diinginkan meliputi

- Nilai waktu naik kurang dari 0.20 detik.
- Nilai waktu puncak kurang dari 0.40 detik.
- Nilai waktu keadaan mantap kurang dari 5.00 detik.
- Nilai puncak kurang dari 1
- Nilai *overshoot* kurang dari 20.00 %.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas tentang tanggapan peralihan dan kestabilan sistem SMIB dengan variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi terhadap perubahan sudut dan kecepatan sudut rotor. Adapun parameter yang diamati pada analisis peralihan adalah waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak dan *overshoot*.

### A. ANALISIS PERALIHAN

Tanggapan peralihan sistem SMIB yang diamati adalah perubahan sudut rotor dan kecepatan sudut rotor dengan variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi terhadap masukan undak. Adapun parameter yang diamati adalah waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak dan *overshoot*.

Perhitungan nilai parameter peralihan sistem SMIB terhadap masukan undak dengan variasi konstanta koefisien redaman untuk perubahan kecepatan sudut rotor diperlihatkan pada Tabel II berikut

TABEL II

NILAI PARAMETER PERALIHAN PERUBAHAN KECEPATAN SUDUT ROTOR SISTEM SMIB TERHADAP MASUKAN UNDAK DENGAN VARIASI  $K_d$

$K_d$	Waktu Naik (detik)	Waktu Puncak (detik)	Waktu Keadaan Mantap (detik)	Nilai Puncak	Nilai <i>Overshoot</i> (%)
0	0	0.24595	NaN	0.02198	Inf
10	0	0.24595	NaN	0.018577	Inf
20	0	0.21491	NaN	0.016206	Inf
30	0	0.20798	NaN	0.014259	Inf
40	0	0.1887	NaN	0.012712	Inf
50	0	0.18962	NaN	0.011446	Inf
60	0	0.17968	NaN	0.010404	Inf
70	0	0.17253	NaN	0.0095236	Inf
80	0	0.15919	NaN	0.0087764	Inf
90	0	0.15664	NaN	0.0081323	Inf
100	0	0.14814	NaN	0.0075712	Inf

Dari tabel II memperlihatkan hasil simulasi perhitungan parameter peralihan pada sistem *Single Machine Infinite Bus* terhadap masukan undak dengan memvariasikan nilai konstanta koefisien redaman torsi untuk perubahan kecepatan sudut rotor menggunakan program pada *software* MATLAB. Berdasarkan hasil simulasi perhitungan, memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi menyebabkan perubahan dari nilai-nilai parameter peralihan pada sistem *Single Machine Infinite Bus*.

Untuk waktu naik, hasil simulasi perhitungan peralihan dari sistem *Single Machine Infinite Bus* terhadap masukan undak untuk perubahan kecepatan sudut rotor memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi tidak memberikan pengaruh terhadap waktu naik dari sistem *Single Machine Infinite Bus*, yang ditunjukkan dengan nilai waktu naik untuk setiap variasi parameter sebesar 0.

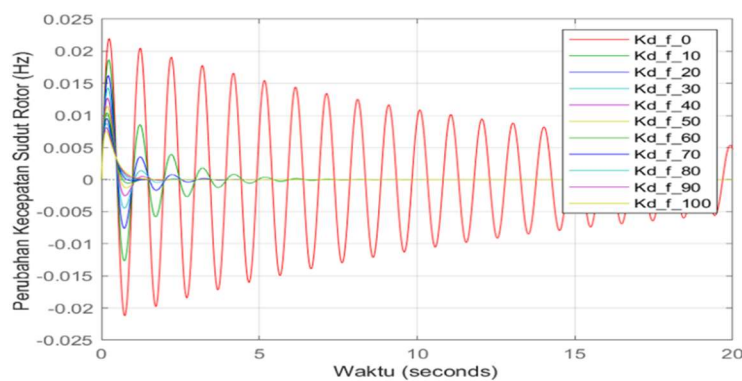
Untuk waktu puncak, hasil simulasi perhitungan peralihan dari sistem *Single Machine Infinite Bus* terhadap masukan undak untuk perubahan kecepatan sudut rotor memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi memberikan pengaruh terhadap waktu puncak dari sistem *Single Machine Infinite Bus*, yang ditunjukkan dengan nilai waktu puncak yang semakin kecil pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi semakin besar.

Untuk waktu keadaan mantap, hasil simulasi perhitungan peralihan dari sistem *Single Machine Infinite Bus* terhadap masukan undak untuk perubahan kecepatan sudut rotor memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi tidak memberikan pengaruh terhadap waktu keadaan mantap dari sistem *Single Machine Infinite Bus*, yang ditunjukkan dengan nilai waktu keadaan mantap untuk setiap nilai konstanta koefisien redaman torsi hasilnya NaN (*Not a Number*).

Untuk nilai puncak, hasil simulasi perhitungan peralihan dari sistem *Single Machine Infinite Bus* terhadap masukan undak untuk perubahan kecepatan sudut rotor memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi memberikan pengaruh terhadap nilai puncak dari sistem *Single Machine Infinite Bus*, yang ditunjukkan dengan nilai puncak yang semakin kecil pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi semakin besar.

Untuk nilai *overshoot*, memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi tidak mempengaruhi nilai *overshoot* yang ditunjukkan dengan nilai *overshoot* untuk setiap nilai konstanta koefisien redaman torsi hasilnya tak hingga.

Berdasarkan hasil simulasi analisis peralihan sistem SMIB terhadap masukan undak dengan variasi nilai konstanta koefisien redaman torsi untuk perubahan kecepatan sudut rotor, menunjukkan bahwa tidak ada nilai konstanta koefisien redaman torsi yang memenuhi kriteria perancangan, namun dari hasil perhitungan ini dapat analisis bahwa semakin besar konstanta koefisien redaman torsi maka osilasi sistem akan semakin teredam setelah mengalami gangguan dan semakin cepat kembali pada kondisi stabilnya. Tanggapan peralihan perubahan kecepatan sudut rotor terhadap masukan undak diperlihatkan pada Gambar 4 berikut



Gambar 4. Tanggapan Peralihan Perubahan Sudut Rotor Sistem SMIB Terhadap Masukan Undak Dengan Variasi  $K_d$

Perhitungan nilai parameter peralihan sistem SMIB terhadap masukan undak dengan variasi konstanta koefisien redaman untuk perubahan sudut rotor diperlihatkan pada Tabel III berikut

TABEL III

NILAI PARAMETER PERALIHAN PERUBAHAN KECEPATAN SUDUT ROTOR SISTEM SMIB TERHADAP MASUKAN UNDAK DENGAN VARIASI  $K_d$

$K_d$	Waktu Naik (detik)	Waktu Puncak (detik)	Waktu Keadaan Mantap (detik)	Nilai Puncak	Nilai <i>Overshoot</i> (%)
0	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
10	0.11342	0.32292	5.2447	1.0205	79.349
20	0.12052	0.32236	2.6729	0.92568	62.677
30	0.12668	0.32236	1.7432	0.84795	49.016
40	0.13514	0.33848	1.3847	0.78577	38.09
50	0.14556	0.34815	1.1082	0.73371	28.941
60	0.15751	0.3546	0.86009	0.69067	21.377
70	0.17129	0.37762	0.81285	0.65566	15.224
80	0.18763	0.40295	0.60834	0.62719	10.221
90	0.20686	0.42982	0.61791	0.60484	6.2927
100	0.22975	0.4771	0.6019	0.58807	3.3458

Dari tabel III memperlihatkan hasil simulasi perhitungan peralihan pada sistem *Single Machine Infinite Bus* terhadap masukan undak dengan memvariasikan nilai konstanta koefisien redaman torsi untuk perubahan sudut rotor menggunakan program pada *software* MATLAB. Berdasarkan hasil simulasi perhitungan, memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi menyebabkan perubahan dari nilai-nilai parameter peralihan pada sistem *Single Machine Infinite Bus*.

Untuk waktu naik, memperlihatkan bahwa pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi  $K_d = 70$  yang memenuhi kriteria perancangan dengan waktu naik 0.17129 detik yang sesuai dengan kriteria perancangan yaitu dengan waktu naik kurang dari 0.20 detik. Berdasarkan tabel hasil perhitungan memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi mempengaruhi waktu naik dari sistem yang ditunjukkan dengan nilai waktu naik yang semakin besar pada saat konstanta koefisien redaman torsi semakin besar.

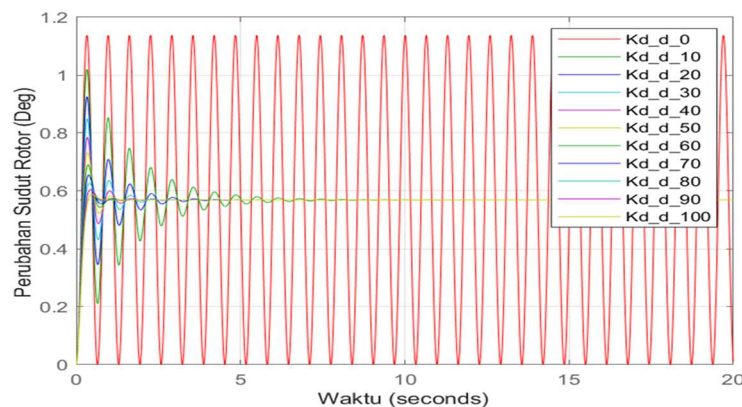
Untuk waktu puncak, memperlihatkan bahwa pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi  $K_d = 70$  yang memenuhi kriteria perancangan dengan waktu puncak 0.37762 detik yang sesuai dengan kriteria perancangan yaitu dengan waktu puncak kurang dari 0.40 detik. Berdasarkan tabel hasil perhitungan memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi mempengaruhi waktu puncak dari sistem yang ditunjukkan dengan nilai waktu puncak yang semakin besar pada saat konstanta koefisien redaman torsi semakin besar.

Untuk waktu keadaan mantap, memperlihatkan bahwa pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi  $K_d = 70$  yang memenuhi kriteria perancangan dengan waktu keadaan mantap 0.81285 detik yang sesuai dengan kriteria perancangan yaitu dengan waktu keadaan mantap kurang dari 5 detik. Berdasarkan tabel hasil perhitungan memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi mempengaruhi waktu keadaan mantap dari sistem yang ditunjukkan dengan waktu keadaan mantap yang semakin kecil pada saat konstanta koefisien redaman torsi semakin besar.

Untuk nilai puncak, memperlihatkan bahwa pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi  $K_d = 70$  yang memenuhi kriteria perancangan dengan nilai puncak 0.65566 yang sesuai dengan kriteria perancangan yaitu dengan nilai puncak kurang dari 1. Berdasarkan tabel hasil perhitungan memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi mempengaruhi nilai puncak dari sistem yang ditunjukkan dengan nilai puncak yang semakin kecil pada saat konstanta koefisien redaman torsi semakin besar.

Untuk nilai *overshoot*, memperlihatkan bahwa pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi  $K_d = 70$  yang memenuhi kriteria perancangan dengan nilai *overshoot* 15.224% yang sesuai dengan kriteria perancangan yaitu dengan nilai *overshoot* kurang dari 20%. Berdasarkan tabel hasil perhitungan memperlihatkan bahwa perubahan nilai konstanta koefisien redaman torsi mempengaruhi nilai *overshoot* dari sistem yang ditunjukkan dengan nilai *overshoot* yang semakin kecil pada saat konstanta koefisien redaman torsi semakin besar.

Berdasarkan hasil simulasi analisis peralihan sistem SMIB terhadap masukan undak dengan variasi konstanta koefisien redaman untuk perubahan sudut rotor, menunjukkan bahwa pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi  $K_d = 70$  memenuhi kriteria perancangan dengan nilai waktu naik 0.17129 detik, waktu puncak 0.37762 detik, waktu keadaan mantap 0.81285 detik, nilai puncak 0.65566, dan nilai *overshoot* 15.224%, namun dari analisis ini memperlihatkan bahwa semakin besar konstanta koefisien redaman torsi maka osilasi sistem akan semakin teredam setelah mengalami gangguan dan semakin cepat kembali pada kondisi stabilnya. Tanggapan peralihan perubahan kecepatan sudut rotor terhadap masukan undak diperlihatkan pada Gambar 5 berikut



Gambar 5. Tanggapan Peralihan Perubahan Kecepatan Sudut Rotor Sistem SMIB Terhadap Masukan Undak Dengan Variasi  $K_d$

## B. ANALISIS KESTABILAN

Analisis kestabilan dilakukan dengan metode akar-akar persamaan karakteristik. Sistem akan stabil jika persamaan keadaan sistem tersebut memiliki akar-akar bilangan *real* yang bernilai negatif. Menggunakan persamaan keadaan sistem SMIB, diperoleh hasil analisis kestabilan perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor terhadap perubahan parameter  $K_d$  sebagai berikut

Pada saat nilai  $K_d = 0$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel IV berikut

TABEL IV  
INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 0$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
0.00e+00 + 6.39e+00i	0.00e+00	6.39e+00
0.00e+00 - 6.39e+00i	0.00e+00	6.39e+00

Pada saat nilai  $K_d = 10$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel V berikut

TABEL V  
 INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 10$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
$-7.14e-01 + 6.35e+00i$	1.12e-01	6.39e+00
$-7.14e-01 - 6.35e+00i$	1.12e-01	6.39e+00

Pada saat nilai  $K_d = 20$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel VI berikut

TABEL VI  
 INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 20$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
$-1.43e+00 + 6.22e+00i$	2.24e-01	6.39e+00
$-1.43e+00 - 6.22e+00i$	2.24e-01	6.39e+00

Pada saat nilai  $K_d = 30$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel VII berikut

TABEL VII  
 INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 30$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
$-2.14e+00 + 6.02e+00i$	3.36e-01	6.39e+00
$-2.14e+00 - 6.02e+00i$	3.36e-01	6.39e+00

Pada saat nilai  $K_d = 40$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel VIII berikut

TABEL VIII  
 INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 40$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
$-2.86e+00 + 5.71e+00i$	4.47e-01	6.39e+00
$-2.86e+00 - 5.71e+00i$	4.47e-01	6.39e+00

Pada saat nilai  $K_d = 50$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel 9 berikut

TABEL IX  
 INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 50$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
$-3.57e+00 + 5.29e+00i$	5.59e-01	6.39e+00
$-3.57e+00 - 5.29e+00i$	5.59e-01	6.39e+00

Pada saat nilai  $K_d = 60$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel X berikut

TABEL X  
 INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 60$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
$-4.29e+00 + 4.74e+00i$	6.71e-01	6.39e+00

-4.29e+00 - 4.74e+00i	6.71e-01	6.39e+00
-----------------------	----------	----------

Pada saat nilai  $K_d = 70$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel XI berikut.

TABEL XI  
 INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 70$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
-5.00e+00 + 3.97e+00i	7.83e-01	6.39e+00
-5.00e+00 - 3.97e+00i	7.83e-01	6.39e+00

Pada saat nilai  $K_d = 80$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel XII berikut.

TABEL XII  
 INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 80$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
-5.71e+00 + 2.85e+00i	8.95e-01	6.39e+00
-5.71e+00 - 2.85e+00i	8.95e-01	6.39e+00

Pada saat nilai  $K_d = 90$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel XIII berikut.

TABEL 13  
 INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 90$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
-5.70e+00	1.00e+00	5.70e+00
-7.16e+00	1.00e+00	7.16e+00

Pada saat nilai  $K_d = 100$  diperoleh informasi posisi akar-akar persamaan sistem SMIB untuk perubahan sudut dan perubahan kecepatan sudut rotor yang dinyatakan dalam bentuk tabel 14 berikut

TABEL 14  
 INFORMASI POSISI AKAR-AKAR PERSAMAAN SISTEM SMIB UNTUK PARAMETER  $K_d = 100$

Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
-3.94e+00	1.00e+00	3.94e+00
-1.03e+01	1.00e+00	1.03e+01

Berdasarkan tabel hasil analisis kestabilan dengan menggunakan metode akar-akar persamaan karakteristik, dapat diperoleh bahwa nilai parameter  $K_d$  berpengaruh terhadap kestabilan sistem, yang dimana pada saat nilai  $K_d > 0$  sistem tersebut stabil karena memiliki akar-akar bilangan *real* yang bernilai negatif.

#### IV. KESIMPULAN

Hasil analisis peralihan sistem SMIB terhadap masukan undak untuk perubahan sudut rotor yang memenuhi kriteria perancangan yaitu pada saat nilai konstanta koefisien redaman torsi  $K_d = 70$  yang ditandai dengan nilai waktu naik 0.17129 detik, waktu puncak 0.37762 detik, waktu keadaan mantap 0.81285 detik, nilai puncak 0.65566, dan nilai *overshoot* 15.224%. Hasil analisis kestabilan pada saat nilai  $K_d > 0$  sistem SMIB akan bersifat stabil karena memiliki akar-akar bilangan *real* yang bernilai negatif. Berdasarkan hasil analisis peralihan dan analisis kestabilan yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai konstanta koefisien redaman torsi  $K_d$  maka osilasi sistem akan semakin teredam setelah mengalami gangguan dan semakin cepat kembali pada kondisi stabilnya.

#### KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ir. Heru Dibyo Laksono, S.T., M.T. dan Departemen Teknik Elektro Universitas Andalas yang telah menyediakan fasilitas penunjang perancangan dan penulisan artikel penelitian ini.

## REFERENSI

- [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] 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.
- [12] A. Ma'arif, Dasar sistem kendali pemodelan, pengendalian, analisis, simulasi, dan implementasi, Yogyakarta: UAD PRESS, 2021.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] K. Eltag, M. S. Aslam dan R. Ullah, "Dynamic Stability Enhancement Using Fuzzy PID Control Technology for," *International Journal of Control, Automation and Systems*, pp. 234-242, 2019.
- [16] T. K. Roy, M. A. Mahmud dan W. X. Shen, "An Adaptive Partial Feedback Linearizing Control," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, pp. 2557-2561, 2020.
- [17] Joyeeta, T. S. a. Roy, T. K. a. Sheikh dan M. R. Islam, "Design of a Nonlinear Excitation Controller for Single Machine Infinite Bus Power Systems to Improve the Transient Stability," dalam *2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)*, Rajshahi, Bangladesh, 2021, pp. 1-5.
- [18] A. F. Rashwan, M. Ahmed dan M. R. Mossa, "Explicit adaptive power system stabilizer design based an on-line," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, p. 101544, 2022.
- [19] Z. Sun, Y. Cao dan Z. Wen, "A Grey Wolf Optimizer algorithm based fuzzy logic power system stabilizer for single machine infinite bus system," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 847-853, 2023.
- [20] A. Sabo, N. I. A. Wahab dan MohammadLutfiOthman, "Application of Neuro-Fuzzy Controller to Replace," *Sustainability*, vol. 12, 2020.