

Analisis Pemasangan Kontrol PID-CES Untuk System Single Machine Infinite Bus Pada Kondisi Load Sheeding

Muhammad Ruswandi Djalal¹, Makmur Saini², A.M.Shiddiq Yunus³

^{1,2}Program Studi Teknik Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Jl. Perintis Kemerdekaan KM.10, Makassar, 90245, Indonesia

³Program Studi Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Jl. Perintis Kemerdekaan KM.10, Makassar, 90245, Indonesia

E-mail: ^{1*}wandi@poliupg.ac.id, ²makmur.saini@poliupg.ac.id, ³shiddiq@poliupg.ac.id

Abstrak

Perubahan beban pada sistem tenaga listrik secara tiba-tiba menyebabkan terjadinya gangguan dinamik. Gangguan tersebut menyebabkan kestabilan generator terganggu, karena generator tidak merespon gangguan tersebut secara cepat. Hal ini menyebabkan terjadinya osilasi pada generator berupa osilasi frekuensi dan sudut rotor. Pada penelitian ini diusulkan sebuah kontroler yang berguna untuk mengatur fluktuasi daya aktif di bus generator, yaitu dengan menggunakan Capacitive Energy Storage (CES). Capacitive Energy Storage (CES) merupakan peralatan penyimpan energi yang dapat meredam osilasi pada sistem tenaga listrik. Pada penelitian ini dilakukan koordinasi dari kontroler PID dan CES yang diaplikasikan pada sistem Single Machine Infinite Bus (SMIB). Dari hasil analisa didapatkan respon frekuensi dan sudut rotor sistem SMIB yang optimal, ditunjukkan dengan respon overshoot sistem yang minimum. Kontroler mampu memberikan kestabilan sehingga osilasi overshoot dapat diredam, serta kinerja settling time yang semakin cepat untuk sistem menuju ke kondisi steady state. Untuk menguji kestabilan sistem SMIB digunakan studi kasus pelepasan beban. Software yang digunakan pada penelitian ini adalah Matlab.

Kata kunci: *PID, SMIB, Settling Time, CES, Overshoot.*

Abstract

Changes in the load on the electric power system suddenly cause dynamic disturbances. The disturbance causes the stability of the generator to be disturbed, because the generator does not respond to the disturbance quickly. This causes oscillations in the generator in the form of oscillations of frequency and rotor angle. In this study, a controller is proposed that is useful for regulating active power fluctuations in the generator bus, namely by using Capacitive Energy Storage (CES). Capacitive Energy Storage (CES) is an energy storage device that can reduce oscillations in the electric power system. In this study, the coordination of the PID and CES controllers was applied to the Single Machine Infinite Bus (SMIB) system. From the analysis results, the optimal frequency response and rotor angle of the SMIB system are shown, indicated by the minimum system overshoot response. The controller is able to provide stability so that overshoot oscillations can be suppressed, as well as faster settling time performance for the system to reach steady state conditions. To test the stability of the SMIB system, a load shedding case study was used. The software used in this research is Matlab.

Keywords: PID, SMIB, Settling Time, CES, Overshoot.

1. Pendahuluan

Dalam studi kestabilan dinamik, diasumsikan bahwa perubahan torsi akibat respon governor diabaikan karena respon governor sangat lambat dibandingkan dengan respon sistem eksitasi, sehingga faktor pengendali dibebankan pada sistem eksitasi. Penambahan rangkaian eksitasi penguat kurang mampu menstabilkan sistem

terutama untuk osilasi frekuensi rendah. *Low Frequency Oscillation* antara 0.2 - 2.0 Hz [1].

Frekuensi yang lebih rendah dapat diperluas menjadi osilasi antar area sehingga diperlukan kontrol tambahan seperti kontrol *Power Sistem Stabilizer* (PSS). PSS merupakan peralatan kontrol tambahan pada eksitasi generator yang digunakan untuk memberi redaman tambahan pada eksitasi generator [2, 3]. Selain itu juga berfungsi untuk mengurangi osilasi lokal atau global pada generator, sebagai respon terhadap penyimpangan

yang terjadi pada nilai variabel yang telah ditetapkan [4, 5].

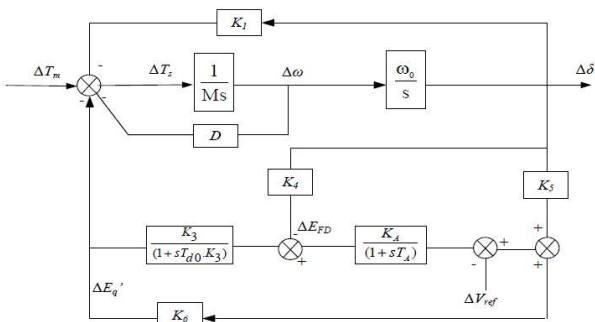
CES merupakan sebuah peralatan untuk menyimpan dan melepaskan daya dalam jumlah yang besar secara simultan. CES menyimpan energi dalam bentuk medan listrik pada kapasitor. Sebuah CES terdiri dari storage capacitor dan Power Conversion System (PCS) dengan control dan fungsi pengaman. Sebuah kontroler PID juga dipasang di CES untuk mengatur besarnya daya input atau output dari CES berdasarkan perubahan kecepatan generator. Untuk mendapatkan peredaman yang baik diperlukan parameter CES yang optimal sehingga dapat digunakan metode optimisasi untuk menala PID CES.

Studi kasus yang digunakan adalah sistem *Single Machine Infinite Bus* (SMIB). SMIB merupakan subsistem tenaga listrik yang terdiri dari satu atau lebih generator yang terhubung ke bus yang tak terhingga [6, 7]. Kemudian menganalisa hasil simulasi dengan cara membandingkan hasil simulasi sistem tanpa control, system dengan control PID, system dengan CES, dan system dengan PID-CES.

2. Metode Penelitian

a. Pemodelan Linier Mesin Sinkron

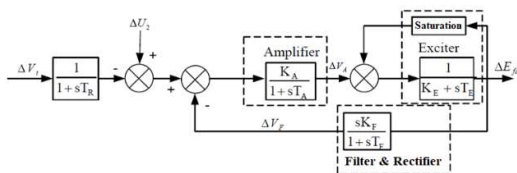
Pemodelan linier mesin sinkron ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Pemodelan Linier Mesin Sinkron

b. Pemodelan Eksitasi

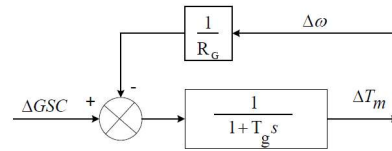
Peralatan eksitasi adalah salah satu bagian sistem yang di mana dengan eksiter ini dapat mengatur variabel output generator, seperti tegangan, arus dan faktor daya [2]. Model eksitasi mengacu pemodelan IEEE ditunjukkan pada gambar 2 [8].



Gambar 2. Block Diagram Eksitasi

c. Pemodelan Governor

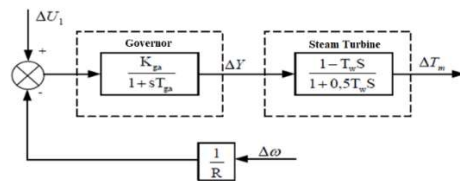
Governor adalah sebuah kontroler yang berfungsi untuk mengatur nilai torsi mekanik T_m yang menjadi input dari generator [8]. Pemodelan ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Pemodelan Governor

d. Pemodelan Turbin

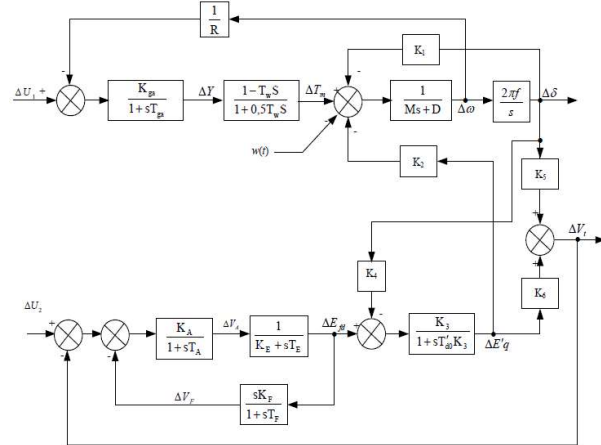
Pemodelan turbin digunakan adalah model turbin pembangkit listrik tenaga uap, dari model IEEE [9]. Pemodelan ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Pemodelan Turbin

e. Pemodelan Single Machine Infinite Bus (SMIB)

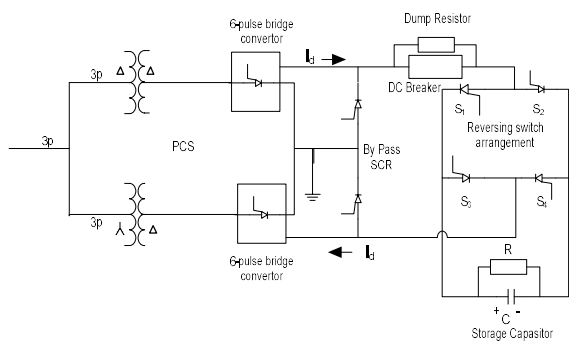
Pemodelan keseluruhan sistem ditunjukkan pada model Single Machine Infinite Bus [10] gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan SMIB

f. Capacitive Energy Storage

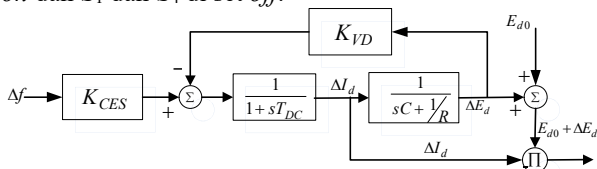
CES merupakan sebuah peralatan untuk menyimpan dan melepaskan daya dalam jumlah yang besar secara simultan. CES menyimpan energi dalam bentuk medan listrik pada kapasitor. Sebuah CES terdiri dari *storage capacitor* dan *Power Conversion System* (PCS) dengan control dan fungsi pengaman.



Gambar 6. Capacitive Energy Storage

Gambar 6 menunjukkan konfigurasi dasar unit CES dalam sistem tenaga listrik. Kapasitor penyimpan terdiri dari beberapa kapasitor diskrit yang dihubungkan secara paralel, dengan kapasitansi C. Rugi-rugi bocor dan dielektrik kapasitor bank pada CES dimodelkan dengan resistansi R yang dihubungkan secara paralel pada kapasitor. Kapasitor penyimpan dihubungkan ke jala-jala melalui *Power Conversion System* (PCS) 12-pulsa. PCS terdiri dari penyearah ac-to-dc dan inverter dc-ke-ac. Thyristor bypass berfungsi untuk memberikan jalan bagi arus I_d saat terjadi kegagalan konverter. Pemutus dc memungkinkan arus I_d dialihkan ke tempat pembuangan energi resistor R_D jika konverter gagal.

Perubahan arah arus saat *charge* dan *discharge* diatasi dengan penyusunan switch secara terbalik menggunakan *gate-turn-off thyristors* GTO. Pada mode *charging*, switch S_1 dan S_4 di set *on* dan switch S_2 dan S_3 di set *off*. Pada mode *discharging*, switch S_2 dan S_3 diset *on* dan S_1 dan S_4 di set *off*.



Gambar 7. Diagram Blok CES

Model linier dari CES ditunjukkan pada Gambar 7. Dari gambar dapat dilihat bahwa perubahan frekuensi (Δf) tiap area sistem tenaga listrik digunakan sebagai sinyal kontrol ke CES. Sehingga perubahan arus ΔI_{di} adalah,

$$\Delta I_{di} = \frac{[K_{CES} \cdot \Delta f - K_{VD} \cdot \Delta E_d]}{1 + sT_{DC}} \quad (1)$$

dengan K_{CES} adalah gain CES yang sesuai dengan umpan balik (Δf). Selanjutnya E_d dikontrol sesuai dengan sinyal kontrol. Deviasi tegangan kapasitor ΔE_d adalah sebagai berikut,

$$\Delta E_d = \left[\frac{1}{sC + 1/R} \right] \Delta I_d \quad (2)$$

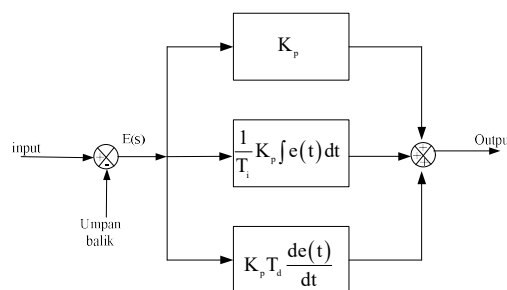
Daya output CES yang dilepas ke sistem pada saat terjadi perubahan beban adalah sebagai berikut,

$$\Delta P_{CES} = (E_{d0} + \Delta E_d) \cdot \Delta I_d \quad (3)$$

g. Kontroler PID

Kontroler proporsional integral differensial (PID) sampai saat ini banyak digemari kalangan praktisi industri. Hal ini dikarenakan penggunaannya yang mudah, dan dapat meningkatkan performansi dari sistem secara cepat.

Keluaran kontroler PID merupakan jumlahan dari keluaran kontroler proporsional, keluaran kontroler integral dan keluaran kontroler diferensial. Gambar 8 menunjukkan blok diagram kontroler PID.



Gambar 8. Diagram blok kontroler PID

3. Hasil dan Pembahasan

Analisa sistem dilakukan, yaitu analisa frekuensi sistem dan sudut rotor SMIB. Analisa dilakukan dengan beberapa membandingkan sistem tanpa control dengan system yang ditambahkan control PID dan CES. Untuk menguji kestabilan sistem, sistem SMIB diberi gangguan berupa perubahan beban.

a. Respon Frekuensi SMIB

Analisa pertama dimulai dengan meninjau respon kestabilan frekuensi sistem SMIB. Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 9. Gambar 9 menunjukkan hasil simulasi respon frekuensi SMIB. Dari hasil simulasi sistem SMIB diberi gangguan perubahan beban sebesar 0,01 pu pada detik ke 1, kemudian terjadi pelepasan beban pada detik ke 20 sebesar 0.005 pu. Pada perubahan beban pertama, terjadi penambahan beban, yaitu kondisi di mana daya elektrik tidak sama dengan daya mekanis (P_m) pada kondisi ini $P_e > P_m$, sehingga antar torsi elektrik dan torsi mekanis tidak seimbang. Kondisi ini menyebabkan frekuensi elektrik (Δf) juga berubah. Selama ketidakstabilan ini kecepatan putaran rotor ($\Delta \omega$) menjadi tidak sinkron. Pada kondisi ini grafik respon frekuensi kebawah sebelum kembali ke steady state. Fungsi dari sistem kontrol kemudian diperlukan untuk

mengembalikan ke kondisi steady state. Karakteristik respon *overshoot* pada kondisi ini ditunjukkan pada tabel 1.

Table 1. Deviasi Frekuensi

Deviasi	Overshoot (pu)
Uncontrol	0.0001874 & -0.0002398
PID	0.0001564 & -0.0002278
CES	3.397e-06 & -0.0001357
PID-CES	-8.08e-05 & 0

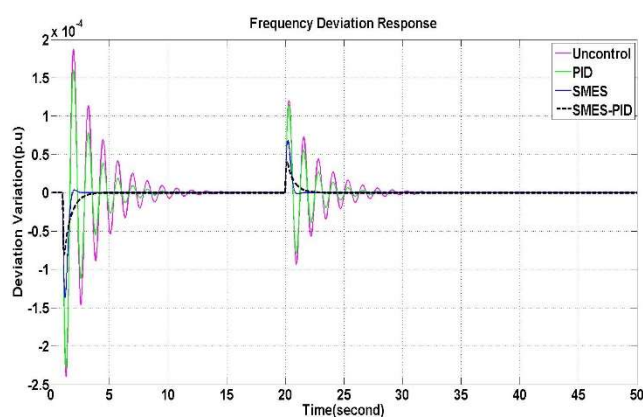
Tabel 1 menunjukkan karakteristik *overshoot* sistem ketika terjadi perubahan beban pada detik ke-1 berupa penambahan beban. Sistem SMIB tanpa kontrol didapatkan *overshoot* sebesar 0.0001874 & -0.0002398 pu dengan *settling time* 14.57s. Sistem SMIB dengan kontrol PID didapatkan *overshoot* sebesar 0.0001564 & -0.0002278pu dengan *settling time* 10.9s. Sistem SMIB dengan kontrol CES didapatkan *overshoot* sebesar 3.397e-06 & -0.0001357pu dengan *settling time* 3.5s. Sistem SMIB dengan kontrol PID-CES didapatkan *overshoot* sebesar -8.08e-05 & 0pu dengan *settling time* 2s.

Kemudian pada perubahan beban berikutnya berupa pengurangan beban yang menyebabkan daya elektrik (P_e) berubah. Pada kondisi ini daya elektrik tidak sama dengan daya mekanis (P_m) $P_e < P_m$, sehingga antar torsi elektrik dan torsi mekanis tidak seimbang. Kondisi ini menyebabkan frekuensi elektrik (Δf) juga berubah. Selama ketidakstabilan ini kecepatan putaran rotor ($\Delta \omega$) menjadi tidak sinkron. Pada kondisi ini grafik respon frekuensi ke atas sebelum kembali ke steady state. Fungsi dari sistem kontrol kemudian diperlukan untuk mengembalikan ke kondisi steady state. Karakteristik respon *overshoot* pada kondisi ini ditunjukkan pada tabel 2. Gambar 9 merupakan grafik respon frekuensi elektrik sistem (Δf).

Table 2. Deviasi Frekuensi

Deviasi	Overshoot (pu)
Uncontrol	0.0001203 & -9.341e-05
PID	0.0001134 & -7.848e-05
CES	6.852e-05 & -1.573e-06
PID-CES	3.968e-05 & 4.766e-07

Tabel 2 menunjukkan karakteristik *overshoot* sistem ketika terjadi perubahan beban pada detik ke-20. Sistem SMIB tanpa kontrol didapatkan *overshoot* sebesar 0.0001203 & -9.341e-05pu dengan *settling time* 32.75s. Sistem SMIB dengan kontrol PID didapatkan *overshoot* sebesar 0.0001134 & -7.848e-05pu dengan *settling time* 28.14s. Sistem SMIB dengan kontrol CES didapatkan *overshoot* sebesar 6.852e-05 & -1.573e-06pu dengan *settling time* 23.67s. Sistem SMIB dengan kontrol PID-CES didapatkan *overshoot* sebesar 3.968e-05 & 4.766e-07pu dengan *settling time* 22.05s.



Gambar 9. Respon Frekuensi SMIB

b. Respon Sudut Rotor

Analisa berikutnya, melihat kinerja respon sudut rotor SMIB dengan pemasangan kontrol PSS. Pada penelitian ini pengujian pada SMIB diberikan berupa perubahan sebesar 0.05 pu pada 1s. Perubahan yang dimaksudkan yaitu terjadi kenaikan dan penambahan beban. Kenaikan beban tersebut mengakibatkan perubahan daya elektrik juga akan bertambah. Apabila daya mekanik generator lebih besar dari daya elektrik maka dapat mengakibatkan percepatan pada rotor, percepatan rotor ini juga akan berpengaruh terhadap perubahan sudut rotor, sehingga respon sudut rotor akan turun atau negatif dari kondisi sebelum gangguan, ditunjukkan pada gambar 10. Respon yang diamati dari perubahan sudut rotor yaitu nilai *overshoot* dan *settling time*, seperti ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Deviasi Sudut Rotor

Deviasi	Overshoot (pu)
Uncontrol	-0.008515 & -0.03672
PID	-0.01108 & -0.03505
CES	-0.02128 & -0.02175
PID-CES	-0.02133 & -0.02121

Tabel 4 menunjukkan karakteristik *overshoot* sudut rotor sistem ketika terjadi perubahan beban pada detik ke-1 berupa penambahan beban. Sistem SMIB tanpa kontrol didapatkan *overshoot* sebesar -0.008515 & -0.03672pu dengan *settling time* 14.94s. Sistem SMIB dengan kontrol PID didapatkan *overshoot* sebesar -0.01108 & -0.03505 pu dengan *settling time* 10.66s. Sistem SMIB dengan kontrol CES didapatkan *overshoot* sebesar -0.02128 & -0.02175pu dengan *settling time* 4.85s. Sistem SMIB dengan kontrol PID-CES didapatkan *overshoot* sebesar -0.02133 & -0.02121pu dengan *settling time* 4.09s.

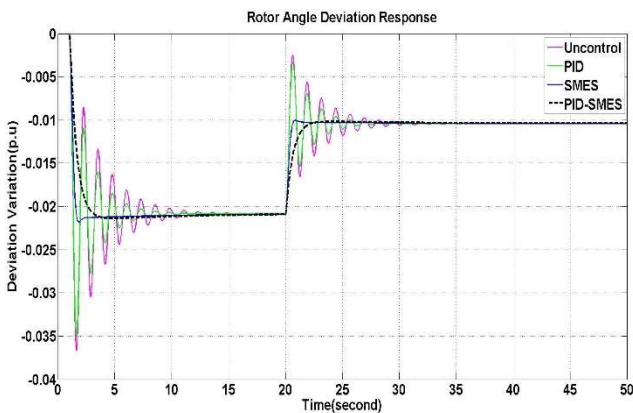
Kemudian pada perubahan beban berikutnya berupa pengurangan beban pada detik ke-20. Pada kondisi ini daya mekanik generator lebih kecil dari daya elektrik, sehingga mengakibatkan perlambatan pada rotor,

perlambatan rotor ini juga akan berpengaruh terhadap perubahan sudut rotor, sehingga respon sudut rotor akan naik atau positif dari kondisi sebelum gangguan. Hal ini terjadi karena kopel magnetis akan mendorong medan stator dengan medan rotor, Sehingga sudut rotor dari generator akan naik, seperti ditunjukkan pada gambar 10. Karakteristik *overshoot* sistem pada kondisi ini ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4 menunjukkan karakteristik *overshoot* sudut rotor sistem ketika terjadi perubahan beban pada detik ke-20. Sistem SMIB tanpa kontrol didapatkan *overshoot* sebesar -0.008515 & -0.03672pu dengan *settling time* 33.68s. Sistem SMIB dengan kontrol PID didapatkan *overshoot* sebesar -0.01108 & -0.03505 pu dengan *settling time* 29.14s. Sistem SMIB dengan kontrol CES didapatkan *overshoot* sebesar -0.02128 & -0.02175pu dengan *settling time* 24.04s. Sistem SMIB dengan kontrol PID-CES didapatkan *overshoot* sebesar -0.02133 & -0.02121pu dengan *settling time* 23.41s.

Tabel 4. Deviasi Sudut Rotor

Deviasi	Overshoot (pu)
Uncontrol	-0.00252 & -0.01645
PID	-0.003329 & -0.01525
CES	-0.01005 & -0.01035
PID-CES	-0.01023 & -0.01019



Gambar 10. Respon Sudut Rotor SMIB

4. Kesimpulan

Dengan pemasangan control PID dan Capacitive Energy Storage pada system SMIB didapatkan respon frekuensi dan sudut rotor SMIB yang optimal dibanding dengan sistem tanpa control dan control PID, hal ini ditunjukkan dengan respon sistem yang mengalami perbaikan, di mana kontroler mampu memberikan kestabilan sehingga osilasi *overshoot* diredam, serta kinerja *settling time* yang semakin cepat untuk sistem menuju ke kondisi *steady state*.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, dan Pusat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Politeknik Negeri Ujung Pandang yang telah mendukung Penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] P. Kundur, *Power system stability and control*.
- [2] M. Y. Yunus, M. R. Djalal, and Marhatang, "Optimal Design Power System Stabilizer Using Firefly Algorithm in Interconnected 150 kV Sulsebar System, Indonesia," *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 12, no. 3, pp. 250-259, 2017.
- [3] M. R. Djalal, M. Y. Yunus, H. Setiadi, and A. U. Krismanto, "Small-Signal-Stability Enhancement using a Power-System Stabilizer based on the Cuckoo-Search Algorithm against Contingency N-1 in the Sulsebar 150-kV System," *Makara Journal of Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 1-8, 2018.
- [4] M. R. Djalal, A. Imran, and I. Robandi, "Optimal placement and tuning power system stabilizer using Participation Factor and Imperialist Competitive Algorithm in 150 kV South of Sulawesi system," in *Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2015 International Seminar on*, 2015, pp. 147-152: IEEE.
- [5] M. R. Djalal, H. Setiadi, D. Lastomo, and M. Y. Yunus, "Modal Analysis and Stability Enhancement of 150 kV Sulsebar Electrical System using PSS and RFB based on Cuckoo Search Algorithm," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 9, no. 4, pp. 800-812, 2017.
- [6] H. D. Laksono and I. R. Putra, "Analisa Performansi Single Machine Infinite Bus (SMIB) dengan Metoda Linear Quadratic Regulator (LQR)(Studi Kasus: PLTA Singkarak)," *Teknika*, vol. 20, no. 2, 2013.
- [7] Y. AM Shiddiq, R. D. Muhammad, and S. A. Yusri, "SMIB stability enhancement using capacitive energy storage and PID based on ant colony optimization," 2020.
- [8] I. Robandi, "Modern Power System Control," *Penerbit ANDI, Yogyakarta*, 2009.
- [9] K. R. Padiyar, *Power System Dynamics*. John Wiley & sons Ltd, Interlaine Publishing Ltd, 1996.
- [10] Suharto, "Penalaan Power System Stabilizer (Pss) Untuk Perbaikan Stabilitas Dinamik Pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Bat Algorithm (Ba)," Undergraduate, ITS Surabaya, 2015.
- [11] M. A. Fassamsi, "Optimal Tuning Pid Superconducting Magnetic Energy Storage (Smes)

- Menggunakan Imperialist Competitive Algorithm (Ica) Untuk Meredam Osilasi Daya Pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 Kv," 2011.
- [12] G. V. S. Vulusala and M. Sreedhar, "Application of superconducting magnetic energy storage in electrical power and energy systems: A review," *International Journal of Energy Research*, vol. 42, 05/16 2017.
- [13] A. M. S. Yunus, M. Saini, M. R. Djalal, A. Abu-Siada, and M. A. S. Masoum, "Impact of Superconducting Magnetic Energy Storage Unit on Doubly Fed Induction Generator Performance During Various Levels of Grid Faults," 2019, Doubly Fed Induction Generator; Grid Codes; Superconducting Magnetic Energy Storage Unit; Fault Ride Through vol. 14, no. 4, 2019.