

Pengaruh Penambahan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) Terhadap Peningkatan Kestabilan Transien Menggunakan Metode *Critical Trajectory* Berbasis *Losing Synchronism*

¹Ardyono Priyadi, ²Arief Riambodo, ³Talitha Puspita Sari, ⁴Soedibyo

^{1,2,3,4}Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

¹priyadi@ee.its.ac.id, ²riambodo15@mhs.ee.its.ac.id, ³talithapuspita@gmail.com ⁴soedieb@ee.its.ac.id

Abstract—Three phase fault is one of a transient phenomenon that must be isolate immediately to prevent losing synchron of generator in power plant, so that the system remain stable. Critical clearing time is maximum time allowed to isolate the system fault so that the system remain stable. Super capacitor energy storage installation to the system is one way to improve CCT value. Super capacitor is one of energy storage that be able to supply and store large amounts of electricity power quickly. Super Capacitor can improve CCT value by muffle oscillation of 3 phase fault. With higher CCT value, then time operation of protection system can be longer. The result is the system remain stable after fault removed and it can be improve transient stability in power system. Within an optimal sizing of super capacitor capacities for the system, then the value of CCT that obtained is higher than protection time operation. So that in this final project will be carried out an optimal sizing of super capacitor for improving transient stability with critical trajectory based on losing synchronism method

Keywords : Transient stability, Critical clearing time, Super capacitor energy storage, critical trajectory, Losing synchronism

Abstrak— Gangguan arus hubung singkat tiga fasa merupakan salah satu gangguan transien yang harus segera diisolir untuk mencegah terjadinya kehilangan sinkronisasi pada pembangkit dan agar sistem tetap stabil. *Critical clearing time* (CCT) merupakan waktu maksimal pemutusan yang diperbolehkan untuk mengisolasi gangguan agar sistem tetap stabil. Pemasangan Sistem penyimpanan energi super kapasitor pada sistem adalah salah satu cara untuk meningkatkan nilai CCT pada sistem. *Super capacitor energy storage* (SCES) adalah salah satu penyimpan energi yang mampu mensuplai dan menyimpan tenaga listrik dalam jumlah besar dengan cepat. SCES dapat meningkatkan nilai CCT dengan cara meredam osilasi yang ditimbulkan oleh gangguan 3 fasa. Dengan nilai CCT yang lebih besar, maka waktu operasi dari sistem proteksi lebih panjang . Hasilnya, sistem akan tetap stabil setelah gangguan diisolasi dan hal ini dapat meningkatkan kestabilan transien dari sistem. Dengan penentuan nilai SCES yang optimal pada sistem maka akan didapatkan nilai CCT yang lebih besar dari waktu operasi sistem proteksi yang ada. Sehingga pada penelitian ini akan dilakukan optimasi nilai SCES untuk memperbaiki kestabilan transien sistem tenaga listrik. menggunakan metode *Critical Trajectory* berbasis *Losing Synchronism*

Kata Kunci— Kestabilan transien, Critical clearing time, Super capacitor energy storage , critical trajectory, Losing synchronism.

I. PENDAHULUAN

Stabilitas sistem tenaga merupakan salah satu permasalahan utama dalam menjaga kontinuitas pada operasi sistem [1]. Perubahan daya dalam jumlah besar secara tiba-tiba dapat mengakibatkan stabilitas sistem tenaga terganggu. Dengan adanya gangguan pada sistem akan dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik . Oleh karena itu, untuk melindungi sistem tenaga listrik dari gangguan adalah dengan memasang rele pengaman yang dapat mendeteksi gangguan dan men-trigger *circuit breaker* untuk memutus saluran. Namun, setelah gangguan dihilangkan tidak menjamin sistem akan kembali dalam kondisi steady state dikarenakan adanya waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing Time*). Sistem akan dapat kembali ke kondisi stabil jika *circuit breaker* memutus saluran sebelum CCT, sebaliknya jika *circuit breaker* memutus saluran setelah CCT maka sistem akan menjadi tidak stabil. Nilai CCT pada sistem dapat ditambahkan atau diperbaiki dengan pemasangan SCES sehingga kestabilan transien juga akan meningkat.

SCES adalah salah satu penyimpanan energi yang mampu mensuplai tenaga listrik dalam jumlah besar. Pemasangan SCES berada di bus generator guna menambah nilai CCT dengan cara meredam daya mekanis agar seimbang dengan daya elektrik yang mengalami penurunan saat terjadi gangguan hubung singkat. Dengan nilai CCT yang bertambah, maka jaminan sistem untuk kembali stabil lebih besar karena kemungkinan waktu pemutusan oleh *circuit breaker* dapat lebih kecil dari pada nilai CCT sistem.

Dengan penambahan SCES pada sistem maka akan didapatkan nilai CCT yang lebih besar dari waktu operasi sistem proteksi. Untuk memperoleh pengaruh nilai super kapasitor terhadap peningkatan *critical clearing time*, akan dilakukan simulasi pemasangan SCES pada sistem dengan menggunakan metode *Losing synchronism*. Metode *Losing Synchronism* merupakan metode penentuan lintasan kritis (*critical trajectory*) untuk mendapatkan nilai CCT secara langsung.

Pada Penelitian ini metode *Lossing Synchronism* akan dijadikan landasan untuk analisis kestabilan transien sistem multi mesin dengan penambahan SCES pada bus generator serta, mendapatkan pengaruh terhadap peningkatan CCT dan mampu memperbaiki kestabilan transien, sehingga kestabilan sistem tenaga menjadi lebih baik.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Kestabilan Transien

Perubahan daya mendadak seperti terputusnya generator atau generator *outage*, akibat gangguan hubung singkat, dan mode pengoperasian starting motor merupakan beberapa faktor penyebab kegagalan sistem untuk menjaga kestabilan transien. Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem untuk mempertahankan sinkronisasinya agar tidak lepas dengan sistem ketika terjadi gangguan - gangguan besar secara tiba-tiba selama sekitar satu ayunan pertama (*first swing*) ketika pengatur tegangan otomatis (AVR) dan governor belum bekerja [2]. Analisis kestabilan transien perlu dilakukan untuk menganalisa sistem terhadap gangguan besar yang terjadi, misalnya pemutusan oleh CB secara tiba-tiba maupun gangguan hubung singkat.

Pada penelitian ini kestabilan transien yang dibahas adalah kestabilan sudut rotor. Perbandingan daya (P) dan sudut rotor (δ) sangat berpengaruh pada kestabilan sudut rotor [3]. Pada saat operasi manual maka daya mekanik generator sama dengan daya elektrik dari sistem. Namun pada saat gangguan maka terjadi perbedaan antara daya mekanik generator dan daya listrik sistem.

B. Critical Clearing Time

Pemutusan saluran akibat adanya gangguan hubung singkat menyebabkan perubahan kondisi awal pada sistem tenaga listrik. Pemutusan saluran dilakukan oleh rele pengaman melalui *Circuit Breaker* (CB).

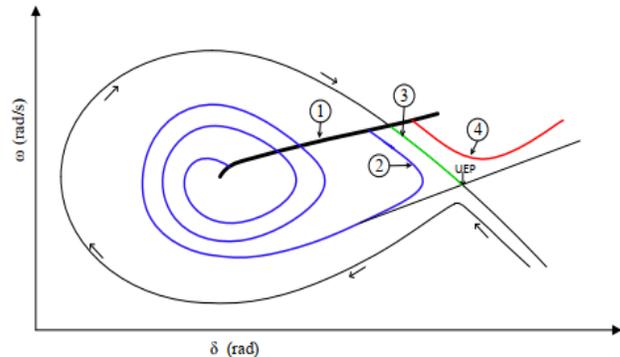
Tabel 1. Waktu pemutusan rele pengaman [4]

Operasi pada Relay	Tipe Relay	
	Statis	Elektromekanik
Lama CB memutus saluran	0,08s	0,08s
Relay Overtravel	0	0,1s
Toleransi Error Relay	0,12s	0,12s
Total CTI	0,2s	0,3s

Pada saat terjadi gangguan, rele pengaman akan memberikan sinyal pada CB untuk memutus saluran dalam waktu kurang dari 0,3 detik sehingga peralatan pada sistem akan teramankan dari kerusakan akibat hubung singkat. Namun, kondisi tersebut tidak menjamin sistem akan kembali pada kondisi stabil. Hal ini dikarenakan adanya waktu pemutusan kritis atau *critical clearing time* (CCT) pada sistem tenaga listrik.

C. Critical Trajectory

Metode *Critical trajectory* atau yang biasa disebut dengan metode lintasan kritis merupakan metode analisis yang menggunakan lintasan yang dimulai dari titik terjadinya gangguan (*fault on trajectory*) hingga mencapai titik kritis dimana sistem akan kehilangan sinkronisasinya (*loss of synchronism*) [5].



Gambar 1. Lintasan kritis saat kestabilan transien

Pada Gambar 1 menunjukkan lintasan (trajectory) dari sebuah generator saat terjadi kestabilan transien. Lintasan “1” menunjukkan *fault on trajectory* yaitu lintasan saat terjadi gangguan yang dimulai dari *Stable Equilibrium Point* (SEP). Lintasan “2” menunjukkan kondisi sistem stabil setelah terjadinya gangguan. Lintasan “4” menunjukkan kondisi sistem tidak dapat kembali ke kondisi stabil setelah terjadinya gangguan dikarenakan gangguan terlambat diputus. Sedangkan lintasan “3” merupakan lintasan kritis (*critical trajectory*) suatu sistem tenaga listrik. CCT dapat ditentukan dengan menghitung perbedaan waktu antara SEP dan *exit point*.

D. Super Kapasitor

Super kapasitor merupakan suatu alat penyimpanan energi yang memiliki kapasitansi yang besar, kepadatan energi tinggi, pengisian dan pengosongan yang sangat cepat dibanding kapasitor maupun peralatan penyimpanan energi konvensional lainnya. Dalam penelitian ini super kapasitor digunakan sebagai penyimpan energi (SCES) pada sistem apabila terjadi gangguan. SCES akan meredam osilasi yang timbul saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa. Kemampuan respon SCES yang lebih cepat dibandingkan dengan *speed governor* dan AVR juga menjadi salah satu alasan SCES digunakan dalam penelitian ini [6].

III. PEMODELAN SISTEM

A. Definisi awal

Permasalahan kestabilan transien dapat dihitung melalui kondisi keadaan awal (*Initial condition*) sebelum gangguan, selama gangguan dan setelah gangguan. Kondisi awal sebelum gangguan didefinisikan x_{pre} , ketika gangguan terjadi pada

saat $t=0$. Kemudian sistem diatur oleh persamaan dinamis ketika gangguan seperti berikut [5],

$$\dot{x} = fF(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre} \quad (1)$$

Dimana $x \in R^N, t \in R, fF: R^N \rightarrow R^N$
 Kurva hasil perhitungan persamaan diatas adalah berupa lintasan terjadinya gangguan (*fault on trajectory*), persamaan 1 dapat ditulis

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

Dimana $X_F(t; x_{pre}): R \rightarrow R^N$
 Gangguan dihilangkan saat $t = \tau$ dan sistem diatur oleh persamaan dinamis seperti berikut,

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N \quad (3)$$

Hasil dari persamaan diatas merupakan lintasan setelah terjadi gangguan. Persamaan 3 dapat ditulis

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(t: x^0: R^N \rightarrow R^N) \quad (4)$$

Dengan catatan kondisi awal x^0 adalah titik pada lintasan kritis saat gangguan saat waktu τ , waktu gangguan hilang

$$x^0 = X_F(\tau, x_{pre}) \quad (5)$$

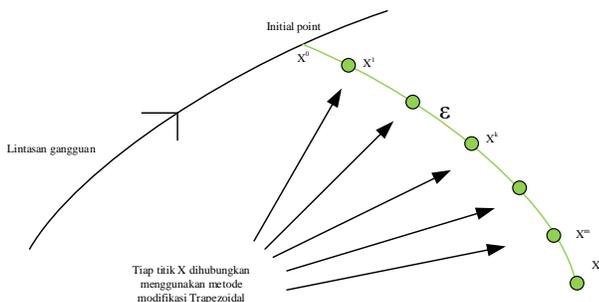
B. Modifikasi Persamaan Trapezoidal

Perhitungan trapezoidal digunakan untuk persamaan 3 pada saat t^k dinotasikan dengan x^k , sehingga persamaan trapesoidal konvensional menjadi

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(x^{k+1} + x^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (6)$$

Dimana

$$\dot{x}^k = f(x^k)$$



Gambar 2. Konsep persamaan metode Trapezoidal

$$\epsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2}|x^{k+1} + x^k|(t^{k+1} - t^k) \quad (7)$$

Titik awal x^0 dan titik akhir x^u dihubungkan dengan titik titik lintasan, jarak antar titik lintasan disimbolkan dengan epsilon ϵ . Lalu dengan persamaan 3.37 persamaan waktu diubah dengan jarak sebagai berikut

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|x^{k+1} + x^k|} \epsilon \quad (8)$$

Dengan substitusi persamaan 6 ke persamaan 8, maka persamaan baru menjadi

$$x^{k+1} - x^k \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|} \epsilon = 0 \quad (9)$$

Dengan persamaan diatas, integrasi numerik terhadap waktu berubah menjadi terhadap jarak. Transformasi ini dapat menggambarkan lintasan kritis dengan waktu berhingga.

C. Critical Trajectory Metode Losing Synchronism

Perumusan masalah untuk memperoleh kondisi kritis sebagai titik akhir kestabilan transien adalah sebagai berikut

$$\min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \epsilon, \tau, Ks, v} \{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)'(\mu^k) + (\mu^{m+1})'W(\mu^{m+1}) \} \quad (10)$$

Dimana $x^k \in R^N, \epsilon \in R, \tau \in R, Ks \in R, v \in R^{NGen}$

$$\begin{aligned} \mu^k &= x^{k+1} - x^k \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|} \epsilon \\ \dot{x}^k &= f(x^k) \end{aligned} \quad (11)$$

Dengan kondisi batasan

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (12)$$

$$\mu^{m+1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \cdot v \\ v - Ks \cdot \theta^{m+1} \\ |v| - 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

Persamaan 12 merupakan kondisi batasan untuk titik awal x^0 , dimana persamaan ini menunjukkan lintasan gangguan sebagai fungsi dari waktu pemutusan, τ . Sedangkan persamaan 13 adalah kondisi batasan untuk *end point*, dimana θ^{m+1} , *sub-vector* dari x^{m+1} memenuhi kondisi kritis sinkronisasi.

D. Modifikasi Persamaan Ayunan karena Penambahan Super Capacitor Energy Storage

Pada Penelitian ini Sistem penyimpanan energi Super Kapasitor atau biasa disebut Super Capacitor Energy Storage (SCES) diasumsikan terpasang di bus generator secara paralel dan dalam rangkaiannya sudah termasuk rectifier/inverter. Ketika sistem mengalami gangguan tiga fasa, osilasi first

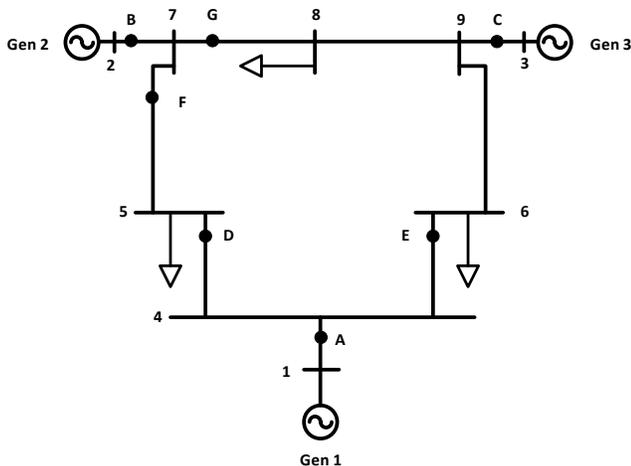
swing akan bernilai sangat besar dan dapat menyebabkan peningkatan nilai sudut rotor generator sehingga sistem berpotensi kehilangan sinkronisasinya. Pemasangan SCES dalam sistem dapat meredam osilasi yang terjadi. SCES diasumsikan selalu berada dalam kondisi kosong, sehingga saat terjadi gangguan dan daya elektrik turun SCES langsung dapat menggantikan daya elektrik yang turun. Model persamaan matematika yang digunakan saat super SCES meredam osilasi saat terjadi gannguan adalah sebagai berikut [6].

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - M_i \dot{\omega}_i - P_{SCES} \quad (14)$$

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} - P_{SCES} \quad (15)$$

IV. SIMULASI DAN ANALISIS DATA

Bab ini berisikan hasil serta analisis dari simulasi penentuan nilai optimal SCES pada sistem IEEE 3 generator 9 bus. Dengan hasil yang diharapkan yaitu mengetahui pengaruh dari pemasangan SCES terhadap peningkatan kestabilan sistem tenaga sesaat setelah terjadi gangguan 3 fasa. Simulasi dilakukan dengan 3 keadaan, sistem tanpa SCES, setelah pemasangan, dan penambahan nilai SCES hingga 1 pu.



Gambar 3. Sistem 3 Generator 9 Bus

Sistem yang digunakan menurut gambar 3 diasumsikan bahwa semua saluran adalah tipe transmisi *double circuit*. Maka apabila terjadi gangguan pada saluran saluran masih dapat mengalirkan daya karena gangguan hanya terjadi di salah satu saluran.

A. Perhitungan Nilai CCT pada sistem 3 generator 9 bus sebelum Penambahan SCES

Tabel 2. Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 Generator 9 Bus tanpa SCES

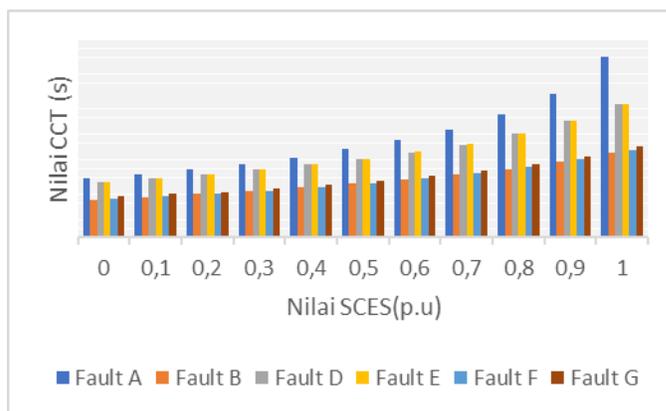
gang guan	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Metode Konvensional (TDS)	
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
A	1-4	0,3431	0,5825	0,34-0,35	69,9
B	2-7	0,2178	0,3500	0,21-0,22	42
C	3-9	0,2567	0,3636	0,25-0,27	43,632
D	4-5	0,3232	0,3285	0,32-0,33	39,42
E	4-6	0,3242	0,3558	0,32-0,33	42,696
F	7-5	0,2223	0,3451	0,22-0,24	41,412
G	7-8	0,2368	0,4138	0,23-0,24	49,656

Perhitungan menggunakan metode yang diusulkan tidak terdapat *error* jika dibandingkan dengan metode konvensional. Maka metode ini dapat diterapkan untuk simulasi berikutnya yaitu penambahan SCES. SCES ditempatkan pada bus generator 2 yang merupakan generator kritis [11].

Tabel 3. Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 Generator 9 Bus Dengan Penambahan SCES

SC (p.u)	Titik A (s)	Titik B (s)	Titik D (s)	Titik E (s)	Titik F (s)
0,0	0,3431	0,2178	0,3232	0,3242	0,2223
0,1	0,3678	0,2355	0,3446	0,3453	0,2374
0,2	0,3952	0,2523	0,3679	0,3683	0,254
0,3	0,4262	0,2677	0,3937	0,3937	0,2722
0,4	0,461	0,2919	0,4228	0,4223	0,292
0,5	0,5151	0,3122	0,456	0,4549	0,3138
0,6	0,5693	0,338	0,4943	0,4981	0,3466
0,7	0,6241	0,3668	0,5385	0,5456	0,3762
0,8	0,7143	0,3994	0,6059	0,6047	0,4115
0,9	0,836	0,4418	0,6818	0,6799	0,455
1,0	1,0547	0,4953	0,776	0,7778	0,5103

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan nilai SCES berbanding lurus dengan penambahan CCT. Hasil peningkatan CCT dari tabel 3 akan diperjelas melalui gambar 4



Gambar 4. Kurva peningkatan CCT terhadap nila SCES

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Gangguan hubung singkat merupakan salah satu masalah dalam sistem tenaga listrik karena dapat mempengaruhi kestabilan dari sistem. Salah satu penentu kestabilan sistem adalah kestabilan transien. Kestabilan transien sangat erat kaitannya dengan *critical clearing time* atau waktu pemutusan kritis yang merupakan waktu penentu stabil tidaknya suatu sistem. Metode *critical trajectory* berbasis *losing synchronism* adalah salah metode untuk menentukan CCT secara langsung pada penelitian ini. Dalam penambahan SCES pada sistem didapatkan peningkatan nilai CCT setiap penambahan nilai SCES 0,1 pu hingga 1 pu. Nilai CCT terting yaitu daihasilkan saat gangguan di titik A yaitu nilai CCT sebesar 1,0547s . Hal ini menunjukkan bahwa peniambahan SCES pada sistem mampu meningkatkan kestabilan transien sistem dengan melihat CCT yang meningkat sehingga kestabilan sistem lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and Classification of Power System Stability", IEEE Transactions on Power system , vol. 19, no. 2, may 2004.
- [2] J.J. Grainger, W.D. Stevenson, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1994.
- [3] P. Kundur," Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [4] IEEE, "Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Std 242-2001, Oct 2001.
- [5] H. D. Chiang, C. C. Chu, and G. Cauley, "Direct stability analysis of electric power systems using energy functions: Theory, applications, and perspective," Proc. IEEE, vol. 83, no. 11, pp. 1497–1529, Nov. 1995
- [6] A. Priyadi, M. Hery, N. Yurino, M. pujiantara, T. Puspita , "Losing Synchronism Technique based on Critical Trajectory Method for Obtaining The CCT with Installing SCES" ISITIA Conference, 2018.
- [7] Saadat, Hadi, "Power System Analysis 2nd Edition", McGraw Hill, Boston, 2004.
- [8] H. Hashim, M. R. Zulkepali, Y. Omar, "An Analysis of Transient Stability Using Center-of-Inertia: Angle and Speed", IEEE International Conf, Dec 2010.
- [9] N. Yorino, A. Priyadi, Hironori K., dan M. Takeshita, "A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [10] Anderson, P. M. dan A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", United States: A John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [11] D. Z. Ariadana," Optimasi CES menggunakan Differential Evolution Algorithm untuk kestabilan transien multimesin berdasarkan fungsi energi", Tugas Akhir Elektro ITS, Juni 2014.