

Efek Penambahan SCES Pada Sistem Multimesin dengan *Damping* dan Kontroler Berdasarkan Metode *Critical Trajectory*

¹ Ardyono Priyadi, ² Nazila Iyyaya Fariha, ³ Talitha Puspita Sari, ⁴ Vita Lystianingrum, ⁵ Margo Pujiantara, ⁶ Sjamsjul Anam

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

¹ priyadi@ ee.its.ac.id, ² nazilaiyyaya@gmail.com, ³ talithapuspita@gmail.com, ⁴ vita@ee.its.ac.id, ⁵ margo@ee.its.ac.id, ⁶ anam@ee.its.ac.id

Article Info

Article history:

Received July 14th, 2020

Revised July 26th, 2020

Accepted August 24th, 2020

Keyword:

Critical Clearing Time

Critical Trajectory

Damper Winding

Multi-machine

Supercapacitor Energy Storage

Transient Stability

ABSTRACT

The system can maintain its synchronization under a transient condition. The transient stability system can be evaluated using the critical trajectory method by calculating the Critical Clearing Time (CCT). The advantage of using a critical trajectory method is that the CCT can be found directly and more accurate than the time domain simulation method. This paper proposed the addition of Supercapacitor Energy Storage (SCES) and damping to enhance the transient stability on multi machine system. SCES is an electrical energy storage device that quickly stores and supplies large amounts of electricity, while damper winding damp the oscillations during unstable steady state conditions. Within the addition of SCES and damping in the system, the stability will last longer than before. The stability system is seen by the extended CCT. Furthermore, multi-machine to infinite bus used to validate the proposed method. The test system also includes the Automatic Voltage Regulator (AVR) and the governor.

Copyright © 2020 Jurnal FORTECH.
All rights reserved.

Abstrak — Tujuan utama dari studi kestabilan transien adalah untuk memastikan bahwa sistem dapat mempertahankan sinkronisasinya pada kondisi transien. Kestabilan transien dapat dievaluasi menggunakan metode *critical trajectory*, dengan cara menghitung *Critical Clearing Time* (CCT). Salah satu keuntungan menggunakan metode *critical trajectory* adalah nilai CCT diperoleh secara langsung dan dapat memberikan nilai yang lebih akurat dari metode *time domain simulation*. Pada penelitian kali ini, diusulkan penambahan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dan *damping* untuk memperbaiki kestabilan transien pada sistem multi mesin. SCES adalah sebuah alat penyimpan energi listrik yang dapat menyimpan dan menyuplai listrik dalam jumlah besar secara cepat, sedangkan damper winding dapat meredam osilasi ketika kondisi *unstable steady state*. Dengan adanya penambahan SCES dan *damping* pada sistem, kestabilan akan menjadi lebih baik daripada sebelumnya. Kestabilan sistem ditunjukkan dengan meningkatnya nilai CCT. Sistem multi mesin yang terhubung dengan *infinite bus* digunakan untuk melakukan validasi metode yang diusulkan. Selain itu, *test system* juga mencakup *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dan *governor*.

Kata Kunci — *Critical Clearing Time*, *Critical Trajectory*, *Damper Winding*, *Kestabilan Transien*, *Multimesin*, *Supercapacitor Energy Storage*

I. PENDAHULUAN

Kestabilan transien adalah kemampuan mesin-mesin sinkron yang saling terinterkoneksi untuk mempertahankan sinkronisasi saat terjadi gangguan transien. Pada sistem yang saling interkoneksi, frekuensi sistem dan kecepatan putar rotor pada mesin sinkron adalah sama. Adanya gangguan akan menyebabkan pergeseran sudut rotor tergantung dari besarnya gangguan yang terjadi.

Gangguan merupakan suatu hal yang tidak bisa dihindari pada sistem kelistrikan. Ketika terjadi perubahan beban yang tidak terduga, sistem akan berusaha mempertahankan kondisi pasokan listrik yang sesuai dengan permintaan. Hal tersebut dapat membebani pekerjaan dari pembangkit lain yang bekerja secara paralel dan belum menjamin seluruh pembangkit bisa mempertahankan sinkronisasinya agar tidak terlepas dari sistem. Sehingga perlu ditentukannya waktu kritis pemutusan/*Critical Clearing Time* (CCT).

CCT merupakan waktu kritis pemutusan yang diperbolehkan untuk menghilangkan gangguan. Nilai CCT dapat diperbaiki dengan menambahkan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada sistem multimesin. SCES dapat menyimpan dan menyuplai listrik dalam jumlah besar secara cepat. Sehingga pengamanan pada sistem memiliki waktu lebih

panjang untuk memutus gangguan dan mampu menjaga kestabilan.

Penelitian ini menggunakan salah satu metode langsung untuk mendapatkan nilai CCT yaitu metode *critical trajectory*. Hasil CCT dari metode tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil CCT yang diperoleh dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) yang merupakan metode konvensional untuk memperoleh nilai CCT. Analisa kestabilan transien akan dilakukan akibat penambahan SCES pada bus generator sistem multimesin dan damping. Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan kontroler berupa AVR dan *governor*.

II. TEORI PENUNJANG

A. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem untuk mempertahankan keadaan sinkronnya pada saat dan sesudah terjadi gangguan. Definisi ini juga berlaku untuk sistem yang beroperasi dengan menginterkoneksi beberapa generator (*multimachine*)[1].

Berdasarkan referensi[2], dilakukan pengelompokan sistem tenaga listrik untuk memudahkan dalam analisa permasalahan kestabilan sistem. Kelompok tersebut dibagi menjadi tiga kategori, yaitu:

1. Kestabilan tegangan
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan sudut rotor.

B. Kestabilan Transien

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya ketika mengalami gangguan transien. Gangguan transien merupakan gangguan besar yang bersifat tiba-tiba selama periode satu ayunan pertama. Respon sistem yang dihasilkan berupa penyimpangan yang besar dari sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh hubungan nonlinier sudut rotor terhadap daya[3]. Secara sistematis, kestabilan diklasifikasikan berdasarkan beberapa pertimbangan, yaitu[1]:

1. Ukuran dari gangguan
2. Pemodelan yang tepat dan analisa gangguan yang spesifik
3. Rentang waktu saat gangguan berlangsung
4. Parameter sistem yang paling berpengaruh.

C. Critical Clearing Time

Critical Clearing Time (CCT) merupakan waktu pemutusan kritis yang akan menentukan apakah sistem tenaga listrik akan dapat kembali ke kondisi stabil maupun tidak stabil. Saat terjadi gangguan, pemutusan yang dilakukan oleh *circuit breaker* harus kurang dari waktu pemutus kritisnya untuk dapat memastikan sistem dapat kembali ke kondisi stabil. Jika gangguan diputus lebih dari waktu kritisnya, maka sistem akan berada dalam keadaan tidak stabil.

Tabel 1 merupakan waktu operasi dari relay[4]. CB bekerja dengan koordinasi dari *relay* pengamanan yang mengirimkan sinyal pada CB untuk melakukan pemutusan saluran dalam waktu kurang dari 0,3 detik.

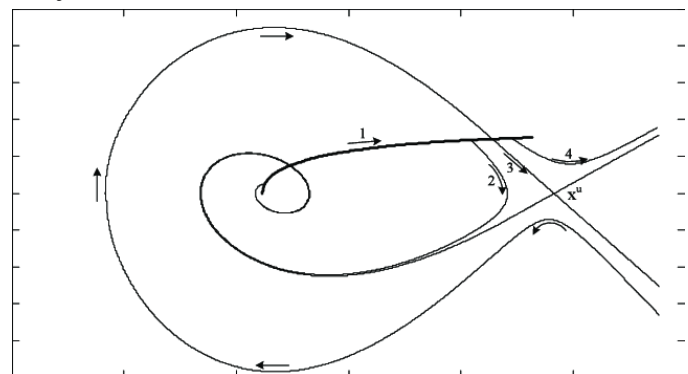
Namun, waktu operasi dari Tabel 1 tidak mempertimbangkan nilai CCT, sehingga tidak menjamin sistem akan kembali pada kondisi stabil. Maka, diperlukan analisis pada CCT untuk memperbaiki keandalan suatu sistem tenaga listrik.

Tabel 1. Waktu pemutusan *relay* pengamanan

Relay Operation	Type of Relay	
	Static	Electromechanical
Circuit breaker opening time	0,08 s	0,08 s
Relay overtravel	0,00 s	0,10 s
Relay tolerance and setting errors	0,12 s	0,12 s
Total CTI	0,2 s	0,3 s

D. Critical Trajectory

Lintasan kritis merupakan sekumpulan titik mulai dari *initial point* x^0 pada lintasan kritis hingga mencapai titik akhir (*endpoint*) x^{m+1} yang memenuhi kondisi *modified losing synchronism*[5]. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi metode *critical trajectory*. Lintasan 1 merupakan lintasan ketika sistem mengalami gangguan (*fault-on*) hingga gangguan tersebut diputus pada waktu CCT. Lintasan 2 untuk kondisi sistem yang stabil dimana gangguan hilang di titik awal, kemudian mengalami osilasi di sekitar titik ekuilibrium yang stabil sehingga setelah terjadi pemutusan gangguan, sistem kembali beroperasi pada daerah stabilnya yaitu *Stable Equilibrium Point* (SEP). Lintasan 3 merupakan lintasan kritis yang terletak di antara kondisi stabil dan tidak stabil. Lintasan 4 adalah lintasan saat gangguan terlambat diputus sehingga sistem kehilangan kestabilannya. Apabila jumlah mesin yang terhubung ke bus *infinite* lebih dari 1, maka titik kritisnya menjadi CUEP[5]-[6].



Gambar 1. Lintasan kritis pada sistem *single machine* yang terhubung pada sistem *infinite bus* dengan penambahan *damping* [6]

E. *Damper Winding*

Damper winding atau kumparan peredam merupakan suatu batangan khusus yang terbuat dari plat besi yang diletakkan di slot yang ada pada dinding-dinding kutub rotor dari motor sinkron yang kemudian dihubung-singkatkan di setiap ujungnya oleh *shorting ring* yang besar[7]. Kumparan ini meningkatkan kestabilan sistem tenaga secara keseluruhan dengan mengurangi atau meredam besar nilai daya dan torsi transien. Prinsip kerja kumparan peredam ini secara umum adalah dengan torsi yang dihasilkan pada kumparan peredam mampu meredam osilasi mekanis rotor.

F. *Supercapacitor Energy Storage*

Supercapacitor Energy Storage (SCES) merupakan salah satu sistem penyimpanan energi yang dapat menyimpan dan melepaskan daya listrik. Penyimpanan energi ini terdiri atas beberapa kapasitor yang terhubung secara parallel dan dihubungkan pada sistem tenaga[8]. SCES memiliki kerapatan energi (*energy density*) yang tinggi[9], sehingga mampu untuk mengeluarkan daya dalam jumlah yang besar. Oleh karena itu, SCES memiliki *life cycle* yang tinggi sebab durasi *charge* dan *discharge* hanya ditempuh dalam hitungan detik. Oleh karena itu, SCES dapat digunakan untuk membantu meningkatkan kestabilan transien selama periode transien saat sistem mengalami gangguan.

Pada penelitian ini SCES digunakan sebagai penyimpan energi pada sistem apabila terjadi gangguan. SCES akan mengisi kembali tegangannya (*charging*) saat terjadi pelepasan beban secara tiba-tiba dan ketika sistem kembali pada kondisi *steady state*, energi berlebih yang diserap kemudian dilepaskan dan tegangan kapasitor kembali ke nilai normalnya[9].

III. METODE PENELITIAN

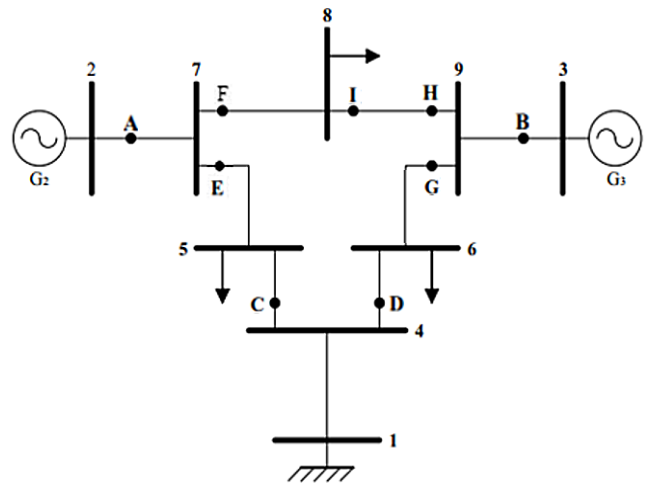
A. *Metode*

Perhitungan pada metode ini dimulai dengan perhitungan *power flow* untuk memperoleh parameter awal sistem, kemudian dilakukan reduksi jaringan untuk menghilangkan bus yang bersifat pasif. Lalu, dilakukan pemodelan sistem dan lintasan kritis menggunakan persamaan ayunan, metode runge-kutta orde 4 dan modifikasi trapezoidal dengan *end point* lintasan kritis ditentukan menggunakan metode yang diajukan yaitu *critical trajectory* berdasarkan *modified losing synchronism*. Selanjutnya dilakukan pemodelan sistem dengan penambahan SCES yang bertujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai CCT sistem.

B. *Plant dan Titik Lokasi Gangguan*

Sistem yang digunakan adalah modifikasi Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus yang terhubung dengan *infinite bus* pada generator 1. Penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan kontroler berupa AVR dan *governor* serta

pengaruh *damping* sebesar 3% pada sistem. Diasumsikan bahwa sistem menggunakan saluran ganda, sehingga ketika terjadi gangguan hubung singkat pada salah satu saluran maka saluran yang tidak mengalami gangguan tetap beroperasi.



Gambar 2. Single Line Diagram modifikasi sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus terhubung *infinite bus*

Keterangan:

- A : titik gangguan antara bus 2 dan bus 7, dekat bus 2
- B : titik gangguan antara bus 3 dan bus 9, dekat bus 3
- C : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5, dekat bus 4
- D : titik gangguan antara bus 4 dan bus 6, dekat bus 4
- E : titik gangguan antara bus 5 dan bus 7, dekat bus 7
- F : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8, dekat bus 7
- G : titik gangguan antara bus 6 dan bus 9, dekat bus 9
- H : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9, dekat bus 9
- I : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9, dekat bus 8

C. *Pemodelan Sistem*

Model sistem multimesin terhubung pada bus *infinite* diartikan sebagai model xd' generator yang ditunjukkan oleh dua persamaan diferensial [5]. Persamaan ayunan direpresentasikan oleh persamaan berikut:

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\delta) - D_i \dot{\omega}_i \tag{1}$$

$$P_{ei}(\delta) = \sum_{j=i}^n Y_{ij} E_i E_j \cos(-\delta_i + \delta_j + \alpha_{ij}) \tag{2}$$

Keterangan

- M_i : Momen inersia ke i
- $\dot{\omega}$: Percepatan sudut
- P_m : Daya mekanis
- P_e : Daya listrik
- D : Koefisien *damping*

D. *Pemodelan Kontroler*

Penelitian ini akan mempertimbangkan pengaruh dari kontroler berupa AVR dan *governor*, yang akan dimodelkan sebagai berikut:

1. *Automatic Voltage Regulator*

$$\Delta E = \frac{K_{AVR}}{1 + T_{AVR} \cdot s} \Delta V_{AVR} \tag{3}$$

$$\Delta V_{AVR} = (V_{ref} - V_t) \tag{4}$$

$$E = E_0 + \Delta E \tag{5}$$

Dilakukan substitusi pada persamaan (3) dan (4) ke persamaan (5), sehingga didapatkan:

$$\dot{E} = \frac{1}{T_{AVR}} [(E_0 - E) + K_{AVR}(V_{ref} - V_t)] \tag{6}$$

Disubstitusikan persamaan $V_t = \frac{E x_l + V_b \cdot x_d}{x}$ dan diasumsikan $\dot{E} = 0$, sehingga didapatkan:

$$E = E_0 + K_{AVR} \left(V_{ref} - \frac{E x_l + V_b \cdot x_d}{x} \right) \tag{7}$$

$$E = \frac{E_0 + K_{AVR} V_{ref} x - K_{AVR} V_b \cdot x_d}{x + K_{AVR} x_l} \tag{8}$$

$$E = \frac{E_0 + K_{AVR} \left(V_{ref} - \frac{V_b \cdot x_d}{x} \right)}{1 + \frac{K_{AVR} x_l}{x}} \tag{9}$$

Keterangan

K_{AVR} : penguatan dari regulator

T_{AVR} : waktu konstan dari regulator

2. *Governor*

$$\Delta P_m = \frac{K_{GOV}}{1 + T_{GOV} \cdot s} \Delta \omega \tag{10}$$

$$\Delta \omega = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \tag{11}$$

$$P_m = P_{mref} + \Delta P_m \tag{12}$$

Dilakukan substitusi pada persamaan (10) dan (11) ke persamaan (12), sehingga didapatkan:

$$P_m = \frac{1}{T_{GOV}} \left[(P_{mref} - P_m) + K_{GOV} \left(\frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \right) \right] \tag{13}$$

Keterangan

K_{GOV} : penguatan konstan = $\frac{1}{R}$

T_{GOV} : waktu konstan dari *governor*

E. *Perumusan Masalah*

Pada kondisi normal, sistem beroperasi dalam kondisi stabil, dilambangkan dengan x_{pre} . Lalu, sistem diatur oleh kestabilan dinamis *fault on* saat sistem sedang mengalami gangguan $[0, \tau]$ yang ditunjukkan sebagai berikut:

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre} \tag{14}$$

dimana $x \in R^N, t \in R, f_F: R^N \rightarrow R^N$.

Kurva dari persamaan (14) disebut sebagai lintasan saat terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*) dan dinyatakan dengan:

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \tag{15}$$

dimana $X_F(\cdot; x_{pre}) : R \rightarrow R^N$.

Gangguan berhasil dihilangkan pada waktu $t = \tau$. Kemudian, sistem diatur oleh kestabilan dinamis setelah terjadinya gangguan (*post-fault*). Setelah sistem menghilangkan gangguan, maka dapat dirumuskan dengan persamaan *nonlinear* sebagai berikut:

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N. \tag{16}$$

Kurva solusi dari persamaan (16) disebut sebagai lintasan setelah terjadinya gangguan (*post-fault trajectory*) dan direpresentasikan dengan:

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(\cdot; x^0): R^N \rightarrow R^N \tag{17}$$

Dengan catatan bahwa titik awal x^0 adalah suatu titik pada *fault-on trajectory* saat waktu $t = \tau$ atau waktu pemutusan gangguan. Maka persamaan (14)-(17) dapat disederhanakan menjadi formulasi sebagai berikut:

$$x^0 = X_F(\tau, x_{pre}) \tag{18}$$

F. *Modified Losing Synchronism*

Pada sistem *single machine* sinkronisasi akan hilang ketika nilai $\partial T / \partial \theta = 0$ atau $\partial P / \partial \theta = 0$. T merupakan torsi sinkronisasi, P merupakan daya sinkronisasi, dan θ merupakan sudut rotor. Sedangkan pada kasus multi mesin koefisien sinkronisasinya dituliskan dengan persamaan berikut:

$$\left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] v = 0 \tag{19}$$

v merupakan *eigenvector* yang berhubungan dengan *eigenvalue* 0 dan diasumsikan bahwa kondisi *eigenvector* selalu berhubungan dengan perubahan dari θ , sehingga nilai dari v menjadi:

$$v = k_s \cdot \dot{\theta} \tag{20}$$

Pada *modified losing synchronism*, diasumsikan bahwa *eigenvector* v selalu searah dengan UEP (*Unstable Equilibrium Point*), yaitu titik hilangnya sinkronisasi sistem, sehingga k_s dapat dianggap konstan. Hal tersebut bertujuan untuk mengurangi jumlah persamaan yang diperlukan agar proses perhitungan menjadi lebih cepat [4].

Jika nilai $k_s = 1$, maka

$$v = \dot{\theta} \tag{21}$$

Dan diperoleh persamaan

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \dot{\theta} \tag{22}$$

G. *Pemodelan SCES pada Sistem*

Pada simulasi ini diasumsikan bahwa SCES pada sistem selalu berada dalam kondisi kosong. Apabila terjadi gangguan, SCES dapat langsung bekerja dengan asumsi bahwa SCES hanya melakukan penyerapan daya atau mengalami proses *charging*, sehingga tidak ada daya yang disalurkan atau disuplai oleh SCES.

Dengan penambahan SCES, pemodelan sistem multimesin dengan *Center of Angle* (COA) atau *Center of Inertia* (COI) dapat dituliskan dengan persamaan ayunan sebagai berikut [4][10]:

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\delta) - D_i(\delta_i) - P_{SCES} \tag{23}$$

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\delta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} - D_i(\delta_i) - P_{SCES} \tag{24}$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini akan divalidasi menggunakan modifikasi sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* yang terhubung dengan *infinite bus*. Terdapat 9 titik lokasi terjadinya gangguan seperti pada Gambar 2. Gangguan yang terjadi berupa gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel.

A. *Analisa Nilai CCT tanpa SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada Bus Generator 2*

Pada simulasi ini, nilai CCT diperoleh pada saat sebelum dan sesudah SCES terpasang pada bus generator 2. Simulasi yang dilakukan akan mempertimbangkan koefisien *damping* sebesar 3% dan kontroler berupa AVR dan *governor*. Kemudian, nilai CCT yang diperoleh dibandingkan dengan hasil dari metode TDS untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

Tabel 2 menunjukkan hasil simulasi menggunakan kedua metode. Dengan adanya penambahan SCES pada bus generator 2, CCT sistem meningkat pada tiap titik gangguan. Sehingga didapatkan rata-rata kenaikan CCT sebesar 0,0166 detik atau 5,58% dibandingkan dengan hasil CCT yang diperoleh tanpa adanya SCES pada sistem.

Tabel 2. Nilai CCT sistem tanpa SCES dan dengan SCES 0.1 p.u pada bus generator 2

Fault Point	Metode Konvensional (TDS)		Metode Critical Trajectory		
	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
A	0,22-0,23	0,24-0,25	0,2288	0,2480	8,39%
B	0,31-0,32	0,31-0,32	0,3121	0,3149	0,90%
C	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3272	0,3443	5,23%
D	0,32-0,33	0,35-0,36	0,3247	0,3501	7,82%
E	0,24-0,25	0,26-0,27	0,2499	0,2635	5,44%
F	0,24-0,25	0,25-0,26	0,2440	0,2519	3,24%
G	0,31-0,32	0,32-0,33	0,3178	0,3296	3,71%
H	0,31-0,32	0,32-0,33	0,3148	0,3234	2,73%
I	0,36-0,37	0,40-0,41	0,3614	0,4047	11,98%
Rata-rata CCT sistem			0,2979	0,3145	5,58%

Tabel 3. Nilai CCT tanpa SCES dan dengan SCES 0.1 p.u pada bus generator 3

Fault Point	Metode Konvensional (TDS)		Metode Critical Trajectory		
	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
A	0,22-0,23	0,22-0,23	0,2288	0,2249	-1,70%
B	0,31-0,32	0,35-0,36	0,3121	0,3526	12,98%
C	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3272	0,3441	5,17%
D	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3247	0,3475	7,02%
E	0,24-0,25	0,24-0,25	0,2499	0,2497	-0,08%
F	0,24-0,25	0,24-0,25	0,2440	0,2478	1,56%
G	0,31-0,32	0,34-0,34	0,3178	0,3470	9,19%
H	0,31-0,32	0,35-0,36	0,3148	0,3556	12,96%
I	0,36-0,37	0,36-0,37	0,3614	0,3633	0,53%
Rata-rata CCT sistem			0,2979	0,3147	5,66%

Tabel 4. Nilai CCT sistem dengan SCES 0.1 p.u – 0.5 p.u di tiap titik gangguan

Fault Point	Nilai SCES (p.u)					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	Rata-rata
A	0,248	0,261	0,282	0,306	0,322	0,284
B	0,315	0,308	0,306	0,303	0,302	0,307
C	0,344	0,370	0,402	0,443	0,482	0,408
D	0,350	0,371	0,403	0,442	0,472	0,407
E	0,264	0,283	0,305	0,327	0,350	0,306

Fault Point	Nilai SCES (p.u)					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	Rata-rata
F	0,252	0,280	0,294	0,310	0,341	0,295
G	0,330	0,326	0,325	0,322	0,317	0,324
H	0,323	0,320	0,316	0,318	0,319	0,319
I	0,405	0,452	0,527	0,618	0,751	0,551

B. Analisa Nilai CCT tanpa SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada Bus Generator 3

Nilai CCT akan dibandingkan sebelum dan sesudah memasang SCES pada bus generator 3. Simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan koefisien *damping* sebesar 3% dan kontroler berupa AVR dan *governor*. Setelah itu nilai CCT akan dibandingkan menggunakan metode *critical trajectory* dan metode TDS.

Tabel 3 menunjukkan hasil simulasi menggunakan kedua metode. Dengan adanya penambahan SCES pada bus generator 3, CCT sistem meningkat pada tiap titik gangguan Rata-rata nilai CCT mengalami kenaikan sebesar 0,0169 detik atau 5,66% dibandingkan dengan hasil CCT yang diperoleh tanpa adanya SCES pada sistem. Namun, terdapat beberapa penurunan nilai CCT saat terjadi gangguan pada titik A dan E. Maka, dapat disimpulkan bahwa bus generator 3 bukanlah bus generator terbaik untuk meletakkan SCES pada sistem.

C. Analisa Nilai CCT dengan Penambahan Kapasitas SCES 0,1 – 0,5 p.u di tiap Titik Gangguan Bus Generator 2

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa pada sub-bab sebelumnya dalam melakukan pemilihan lokasi penempatan SCES, selanjutnya akan dilakukan simulasi untuk mengetahui efek kapasitas dari SCES pada bus generator 2. Kapasitas SCES akan beragam dari 0.1 p.u hingga 0.5 p.u.

Tabel 4 menunjukkan hasil peningkatan CCT dengan nilai SCES yang beragam. Dari tabel tersebut diperoleh penurunan beberapa nilai CCT, yang mana berbanding terbalik dengan peningkatan kapasitas SCES. Penurunan nilai CCT terjadi ketika gangguan terjadi pada titik B, G dan H. Pada titik gangguan tersebut terjadi saturasi setelah dipasang SCES dengan kapasitas 01 p.u. Sehingga kapasitas optimal SCES pada modifikasi sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus sebesar 0.1 p.u.

V. KESIMPULAN

Berdarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa adanya penambahan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada sistem dapat

mempengaruhi nilai *Critical Clearing Time* (CCT) yang dihasilkan. Untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus, bus generator 2 dipilih sebagai lokasi peletakan SCES terbaik dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 5,58% atau 0,0166 detik. Namun, kenaikan nilai CCT tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kapasitas SCES. Hal tersebut dapat dilihat dari hasil simulasi yang menunjukkan pada titik gangguan tertentu atau dengan peletakan SCES di bus generator tertentu justru menurunkan nilai CCT. Hal ini diakibatkan karena adanya kondisi saturasi dan pengaruh dari kapasitas generator sistem.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Das, J.C., "Transient in Electrical Systems, Analysis, Recognition, and Mitigation", McGraw-Hill Companies Inc, ch. 12, 2010.
- [2] P. Kundur et al., "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, hlm.1387–1401, Agu 2004.
- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", University of Toronto, Toronto, McGrawHill Inc, Ch. 2, 1994.
- [4] T. P. Sari, A. Priyadi, dan M. Pujiantara, "Improving Transient Stability Assessment by Installing Supercapacitor Energy Storage using Critical Trajectory Method based on Modified Losing Synchronism", ISITIA Conference, pp. 2-3, 2018.
- [5] N. Yorino, A. Priyadi, H. Kakui, dan M. Takeshita, "A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 3, hlm. 1620–1626, Agu. 2010.
- [6] A. Priyadi, M. Hery, M. Pujiantara, N. Yorino, and I. Hafidz, "Buku Bahan Ajar Kestabilan Transien" Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab. 2-3, 2017.
- [7] S. J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", 4th ed. McGraw-Hill Inc, New York, 2005.
- [8] R. J. Abraham, D. Das, dan A. Patra, "Effect of capacitive energy storage on automatic generation control", dalam 2005 International Power Engineering Conference, Singapore, 2005.
- [9] J. R. Miller, "Introduction to Electrochemical Capacitor Technology", IEEE Electr. Insul. Mag., 2010.
- [10] A. Priyadi, T. P. Sari, I. Hafidz, M. Pujiantara, N. Yorino and M. H. Purnomo, "Losing Synchronism Technique based on Critical Trajectory Method for Obtaining the CCT with Installing SCES," ISITIA Conference, pp. 63-66, 2018