

Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) Berbasis *Trajectory* Kritis Menggunakan Persamaan Simultan pada Sistem yang Terhubung dengan *Smart Grid*

Rachma Prilian Eviningsih, Ardyono Priyadi, dan Soedibjo

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: rachma11@mhs.ee.its.ac.id, priyadi@ee.its.ac.id, soedieb@ee.its.ac.id

Abstrak— Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik dapat menyebabkan terjadinya ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik dan agar sistem kembali dalam kondisi *steady state*, maka gangguan tersebut harus segera dihilangkan sesegera mungkin. Oleh karena itu, analisis kestabilan transien pada sistem tenaga listrik mempunyai peranan yang sangat penting dan menjadi pusat perhatian utama. Pada tugas akhir ini akan dilakukan perhitungan CCT dengan menggunakan metode *critical trajectory* dengan penambahan persamaan simultan. Dengan adanya penambahan persamaan simultan pada matriks Jacobian akan mereduksi jumlah persamaannya menjadi sama dengan jumlah variabelnya sehingga proses integrasi numerik dapat dilakukan dengan cepat dan hasilnya akan lebih akurat jika dibandingkan dengan menggunakan metode lainnya. Sistem yang digunakan adalah sistem smart grid 3-generator 9-bus saat terhubung dengan *infinite bus* maupun saat dalam kondisi *stand-alone*.

Kata Kunci— Kestabilan Transien, *Critical Clearing Time* (CCT), *Critical Trajectory*, *Smart Grid*

I. PENDAHULUAN

Analisis kestabilan pada sistem tenaga listrik selalu menjadi perhatian utama dikarenakan kestabilan sistem tenaga listrik memiliki peranan yang penting dalam menjaga keamanan terutama pada saat operasi sistem tenaga listrik terutama pada sistem yang terhubung secara terinterkoneksi melalui jaringan transmisi karena sistem tersebut tidak akan pernah lepas dari adanya gangguan. Dengan adanya gangguan pada sistem akan dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, untuk melindungi sistem tenaga listrik dari kerusakan akibat adanya gangguan adalah dengan memasang rele pengaman yang dapat mendeteksi gangguan dan *trigger* untuk membuka *circuit breaker*. Namun, hal tersebut tidak menjamin sistem akan kembali dalam kondisi *steady state* setelah terjadi gangguan dikarenakan adanya waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing Time*). Sistem akan dapat kembali ke kondisi stabil jika *circuit breaker* diputus sebelum CCT, sebaliknya jika *circuit breaker* diputus setelah CCT maka sistem akan menjadi tidak stabil.

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai CCT salah satunya adalah dengan menggunakan integrasi numerikal. Integrasi numerikal merupakan sebuah metode yang digunakan selama ini untuk melakukan perhitungan CCT dikarenakan metode tersebut cukup akurat dan mampu memberikan gambaran tentang kestabilan transien yang dialami sistem tenaga listrik. Akan tetapi, dengan menggunakan integrasi numerik membutuhkan proses yang sangat panjang untuk melakukan

perhitungan CCT sehingga membutuhkan waktu yang cukup lama dalam proses iterasinya. Oleh karena itu, metode ini tidak dapat diterapkan pada analisis kestabilan transien secara *real time*.

Oleh karena itu, dikembangkanlah sebuah metode baru untuk melakukan perhitungan CCT yaitu metode *critical trajectory*. Dengan menggunakan metode ini, perhitungan CCT dapat dilakukan dengan lebih cepat dan hasilnya lebih akurat dibandingkan jika menggunakan metode integrasi numerik. Dan dengan ditemukannya metode baru ini, diharapkan kedepannya analisis kestabilan transien dapat dilakukan secara *real time*.

Pada tugas akhir kali ini, diusulkan sebuah metode baru untuk mendapatkan CCT berbasis *critical trajectory* dengan penambahan persamaan simultan. Dengan penambahan persamaan simultan ini, diharapkan perhitungan CCT dapat dilakukan secara cepat dan mendapatkan hasil yang lebih akurat. Hal ini dikarenakan penambahan persamaan simultan pada matriks Jacobian akan mereduksi jumlah persamaannya menjadi sama dengan jumlah variabelnya sehingga proses integrasi numerik dapat dilakukan dengan cepat. Sistem yang akan digunakan pada tugas akhir kali ini adalah sistem *smart grid* Fouad dan Anderson 3-generator 9-bus. Analisa yang akan dilakukan pada penelitian kali ini adalah mencari nilai CCT pada saat sistem tersebut dalam keadaan *stand-alone* maupun pada saat sistem tersebut terhubung dengan *infinite bus*. Dengan demikian, kita akan dapat menganalisa dan membandingkan hasil perhitungan CCT untuk menjaga kestabilan transien pada sistem yang kita gunakan agar sistem tersebut dapat beroperasi dengan baik saat terjadi gangguan maupun saat dalam kondisi *steady state*.

II. KESTABILAN TRANSIEN PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

A. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Menurut referensi [1], kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai suatu kemampuan sistem tenaga listrik dengan operasi awal tertentu untuk mendapatkan kembali dan mempertahankan kesetimbangan kondisi operasi dalam sistem setelah mengalami gangguan. Gangguan yang dapat mempengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua, yaitu gangguan kecil dan gangguan besar.

Berdasarkan referensi [2], untuk lebih mudah dalam menganalisa kestabilan sistem tenaga listrik maka akan dibagi menjadi tiga hal penting, antara lain:

1. Kestabilan sudut rotor

2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan

B. Kestabilan Transien

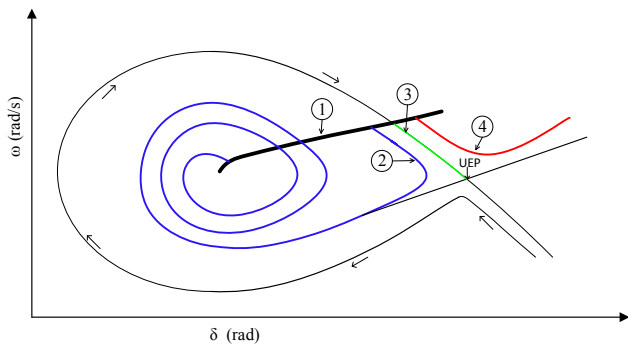
Seperti yang sudah dijelaskan pada referensi [3], kestabilan transien atau *transien stability* dapat diartikan sebagai sebuah kemampuan sistem untuk mencapai titik kesetimbangan atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan stabilitas karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem.

Analisis kestabilan transien merupakan analisis yang utama untuk menelaah perilaku sistem daya misalnya gangguan yang berupa:

1. Perubahan beban yang mendadak karena terputusnya unit pembangkit.
2. Perubahan pada jaringan transmisi misalnya gangguan hubung singkat atau pemutusan saklar (*switching*).

C. Critical Trajectory

Menurut referensi [5]-[6], *critical trajectory* atau yang biasa disebut dengan lintasan kritis merupakan lintasan yang dimulai dari titik terjadinya gangguan (*fault on trajectory*) hingga mencapai titik kritis dimana sistem akan kehilangan sinkronisasinya (*loss of synchronism*).



Gambar 1. Lintasan kritis satu generator terhubung pada infinite bus dengan damping.

Pada Gambar 2. menunjukkan beberapa lintasan (*trajectory*) dari sebuah generator yang terhubung dengan infinite bus dengan damping. 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. Lintasan ini akan mencapai *Unstable Equilibrium Point* (UEP) yakni titik kritis dari sistem.

D. Critical Clearing Time

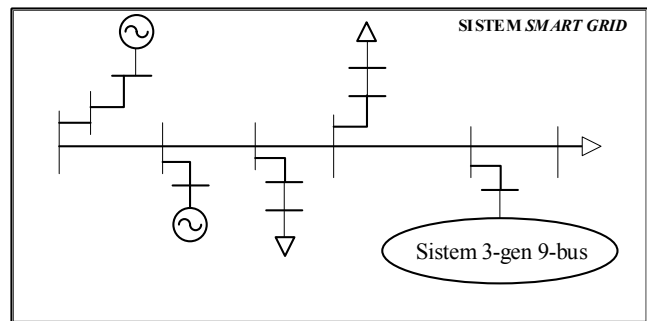
Critical Clearing Time atau CCT merupakan waktu pemutus kritis yang akan menentukan apakah sistem tenaga listrik akan dapat kembali ke kondisi stabil maupun tidak stabil. Jika suatu sistem tenaga listrik mengalami gangguan baik itu gangguan besar maupun gangguan kecil maka area yang terjadi gangguan harus segera diisolasi dan pengisolasian dapat dilakukan dengan cara pemutusan saluran melalui *circuit breaker* (CB) saluran maupun pelepasan generator dari sistem melalui *circuit breaker* generator. 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.

E. Controlling Unstable Equilibrium Point

Menurut referensi [7], *Controlling Unstable Equilibrium Point* (CUEP) merupakan suatu metode yang digunakan untuk menentukan energi kritis dengan batas kesalahan yang cukup relevan pada sistem. Metode ini cukup akurat untuk menentukan kestabilan sistem tenaga listrik sebab secara mendasar *Controlling Unstable Equilibrium Point* (CUEP) menjadi batas pengendali batas kestabilan sistem tenaga listrik. Apabila lintasan gangguan (*fault trajectory*) melewati *Controlling Unstable Equilibrium Point* (CUEP) pada batas kestabilan, maka sistem tidak stabil. Akan tetapi, jika lintasan gangguan (*fault trajectory*) tidak melewati *Controlling Unstable Equilibrium Point* (CUEP) pada batas kestabilan, maka sistem akan stabil.

F. Pemodelan Smart Grid



Gambar 2. Pemodelan Sistem Smart Grid.

Pada Gambar 2. menunjukkan pemodelan sistem *smart grid* yang akan digunakan pada tugas akhir kali ini. Dari Gambar 3. dapat dilihat terdapat 2 sistem *smart grid* yaitu sistem radial dan sistem dengan *Distributed Generation* (DG) yang dimodelkan dengan 3-generator 9-bus. Kedua sistem tersebut saling terinterkoneksi antara satu dengan yang lainnya. *Distributed Generation* (DG) pada sistem tersebut menggunakan sumber energi terbarukan (*renewable energy*) yaitu *Micro Hydro* sebagai sumber pembangkit listrik dimana daya yang dibangkitkan sekitar 30-300kW.

Sistem dengan menggunakan DG tersebut selain daya yang dibangkitkan cukup untuk sistemnya sendiri, sistem tersebut juga dapat mensuplai daya ke sistem radial jika daya yang dibangkitkan berlebih. Dengan demikian, sistem DG yang dimodelkan dengan 3-generator 9-bus dapat dioperasikan dengan *stand-alone* maupun saling terinterkoneksi dengan sistem radial.

Namun, pada tugas akhir kali ini hanya melakukan perhitungan CCT pada sistem 3-generator 9-bus saja. Hal ini dikarenakan jika terjadi gangguan pada sistem radial tidak akan berdampak pada sistem 3-generator 9-bus. Dan jika terjadi gangguan pada sistem radial, maka secara otomatis sistem 3-generator 9-bus akan langsung beroperasi secara *stand-alone*, sehingga gangguan tidak akan membuat kegagalan pada sistem tersebut.

III. PEMODELAN SISTEM

A. Pendefinisian Awal

Pada kondisi awalnya, sistem tenaga listrik beroperasi dalam kondisi stabil, dilambangkan dengan x_{pre} , dimana ketika gangguan terjadi pada saat $t=0$. Kemudian, kondisi ini berubah secara dinamis selama terjadi gangguan $[0, \tau]$ dan sesuai dengan persamaan berikut ini:

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

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

Kurva hasil dari penyelesaian persamaan (1) disebut *fault-on trajectory* dan kondisi tersebut ditulis dengan persamaan berikut:

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

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

Ketika gangguan diputus pada saat waktu τ , maka kondisi sistem akan berubah secara dinamis yang ditunjukkan oleh persamaan nonlinear berikut ini:

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

Kurva hasil dari persamaan (3) disebut dengan *post-fault trajectory*, yang ditulis dengan persamaan berikut ini:

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

Dengan catatan bahwa titik awal x^0 adalah titik pada saat *fault-on trajectory* saat $t=\tau$, waktu pemutusan gangguan.

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

B. Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem yang akan dilakukan kali ini adalah dengan memodelkannya sama seperti pada persamaan ayunan (*swing equation*) sebagai berikut:

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e \quad (6)$$

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (7)$$

Dikarenakan pada penelitian kali ini sistem yang digunakan dengan mempertimbangkan *damping* pada setiap generatornya, maka (6) akan menjadi seperti dibawah ini:

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e(\delta) - D\omega \quad (8)$$

dimana, D merupakan koefisien *damping* pada generator.

C. Modifikasi Persamaan Trapezoidal

Pada sub-bab ini, akan dijelaskan mengenai modifikasi persamaan trapezoidal. Untuk menyelesaikan solusi dari persamaan (3) pada saat t^k yang dinotasikan dengan x^k , maka persamaan berikut menggunakan persamaan trapezoidal secara konvensional.

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2} (\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k) (t^{k+1} - t^k) \quad (9)$$

dimana,

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (10)$$

Lambang k pada persamaan diatas dimaksudkan untuk nomor iterasi terhadap waktu.

Gambar 4. mengilustrasikan *critical trajectory*, dimana terdapat dua batas titik yaitu x^0 dan x^u . Kedua titik ini merupakan *initial point* CCT dan titik kritisnya (*end point condition*) dari sebuah sistem.

Untuk menghitung jarak antara x^0 dan x^u pada persamaan (9) didefinisikan sebagai berikut ini:

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k| (t^{k+1} - t^k) \quad (11)$$

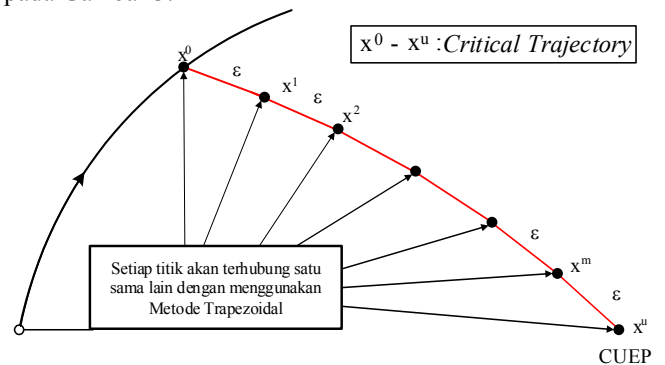
Setelah itu, domain waktu t pada persamaan (11) dibawa kedalam domain jarak k menjadi:

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (12)$$

Kemudian, persamaan (12) disubstitusikan kedalam persamaan (9) maka akan didapat persamaan seperti dibawah ini:

$$x^{k+1} - x^k - \frac{x^{k+1} + x^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \quad (13)$$

Dari persamaan (13), integrasi numerik dalam domain waktu ditransformasikan kedalam domain jarak. Hasil transformasi membuat menjadi mungkin untuk menggambarkan *critical trajectory* dengan beberapa titik namun dengan jarak yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Konsep Modifikasi Persamaan Trapezoidal.

Untuk persamaan simultan, minimisasi penyelesaian modifikasi persamaan trapezoidal dituliskan dengan persamaan berikut ini:

$$G(x) \begin{cases} x^{k+1} - x^k - \frac{x^{k+1} + x^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \\ x^0 - X_F(CCT; x_{pre}) = 0 \\ CUEP = x^u \end{cases} \quad (14)$$

Dimana variabel yang akan dihitung adalah:

$$X = (x^0, x^1, \dots, x^m, x^{m+1}, \varepsilon, \tau) \quad (15)$$

D. Kondisi Batas (Boundary Conditions)

Berdasarkan Gambar 3, kondisi batas (*boundary conditions*) yang dimaksudkan adalah kondisi titik awal (*initial point condition*) yang dilambangkan dengan x^0 , dan kondisi titik akhir (*end point condition*) yang dilambangkan dengan x^u .

1. Initial Point Condition

Berdasarkan persamaan (5), *initial point* pada *fault-on trajectory* pada saat terjadi gangguan akan diputus pada saat CCT, maka persamaannya akan menjadi:

$$x^0 = X_F(CCT, x_{pre}) \quad (16)$$

2. End Point Condition dengan Menggunakan Persamaan Simultan

Konsep dasar dalam perhitungan CCT menggunakan persamaan simultan adalah model penyelesaian pada *critical*

trajectory. Meskipun elemen x yang terdapat pada gambar 3.6 tidak mencapai x^u , namun terdapat pasangan dari x yang saling terhubung sehingga dapat mencapai titik x^u . Kondisi demikianlah yang akan dipertahankan hingga dapat mencapai *end point* $m+1$:

$$\theta_{cg}^{m+1} = \theta_{cg}^u, \omega_{cg}^{m+1} = \omega_{cg}^u \quad (17)$$

Indeks cg yang terdapat pada persamaan (17) menunjukkan nilai dari generator kritis.

Nilai x^u merupakan *Controlling UEP* (CUEP) yang didapatkan dari metode *BCU shadowing*. Sedangkan generator kritis dipilih berdasarkan nilai energi potensial pada setiap generator.

$$E_p = \sum_i E_{p_i} \quad (18)$$

dimana,

$$E_{p_i} = [P_{m_i} - (E_i)^2 G_{ii}][\theta_i - \theta_i^s] \quad (19)$$

E_{p_i} adalah energi potensial generator ke- i , P_{m_i} adalah daya mekanik generator ke- i , E_i adalah tegangan pada reaktansi transien generator ke- i , dan G_{ii} adalah konduktansi generator. Sedangkan symbol "s" menunjukkan kondisi *stable equilibrium point* (SEP).

Kondisi kritis pada persamaan (4) didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau \quad \left\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m+1})' W_c (\mu^{m+1}) \right\} \quad (20)$$

dimana,

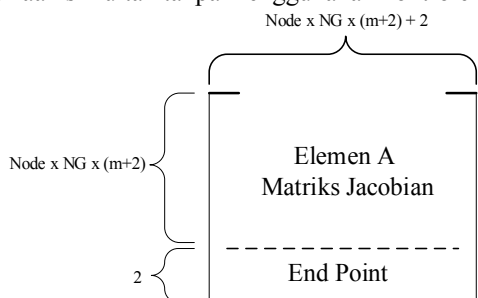
$$x^k \in R^N, (k = 0, \dots, m), \varepsilon \in R, \tau \in R$$

Mengacu pada persamaan (10) dan (12) serta inisialisasi kondisi awal (16), *end point* pada metode ini sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$(\mu^{m+1}) = x^{m+1} - x^u \text{ dengan } f(x^u) = 0 \quad (21)$$

W_c merupakan matriks identitas, dimana nilai diagonal pada matriks tersebut bernilai 1 (satu), sedangkan nilai elemen matriks yang lain bernilai 0 (nol). Matriks ini tidak digunakan pada semua generator, namun hanya pada generator kritis saja (17) sehingga jumlah persamaan sama dengan jumlah variabel yang dicari. Metode demikian disebut dengan persamaan simultan.

Gambar 4. menunjukkan matriks Jacobian untuk persamaan simultan tanpa menggunakan kontroler.



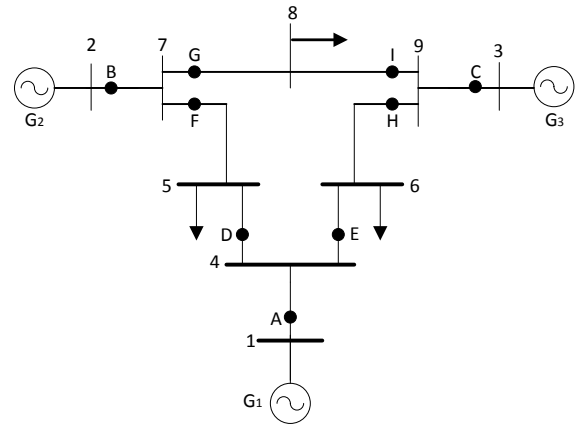
Gambar 4. Matriks Jacobian untuk perhitungan CCT menggunakan Persamaan Simultan Tanpa Kontroler.

IV. SIMULASI DAN ANALISA DATA

A. Perhitungan CCT pada Sistem Smart Grid Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus saat Kondisi Stand-alone

Untuk menguji keakuratan metode yang diusulkan pada penelitian kali ini, maka akan dilakukan simulasi pada sistem *smart grid* yaitu sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus yang terdiri dari 9 bus (1 *slack bus*, 2 generator, dan 3 *load bus*) serta 9 saluran. Gambar 5. menunjukkan *single line diagram* sistem *smart grid*. Dalam penelitian kali ini,

diasumsikan gangguan yang terjadi adalah gangguan 3 fasa ketanah dengan saluran transmisi *double circuit*.



Gambar 5. Sistem *Smart Grid* Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus.

Pada Gambar 5., diasumsikan bahwa semua generator pada sistem *smart grid* menggunakan *Distributed Generator* (DG) dengan pembangkit *Micro Hydro* dan diasumsikan terdapat 9 titik gangguan pada saluran transmisi. Selanjutnya dari titik gangguan yang sudah ditentukan sebelumnya, maka dapat ditentukan nilai CUEP pada setiap generator dengan menggunakan metode *BCU-Shadowing*. Tabel 1. menunjukkan nilai CUEP masing-masing generator pada sistem *smart grid* 3-generator 9-bus.

Tabel 1. Nilai CUEP pada sistem *smart grid* 3-generator 9-bus.

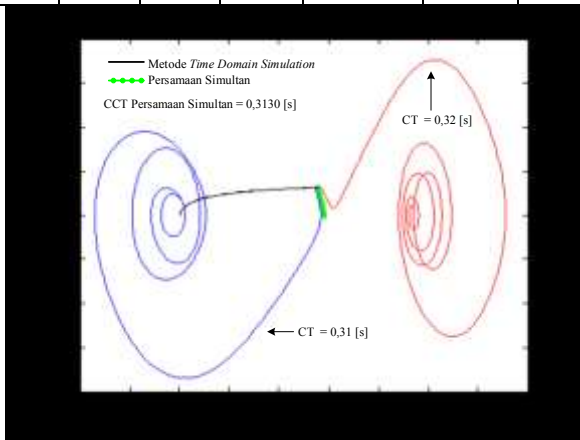
Fault Open	OPEN LINE	CUEP			CG
		G ₁	G ₂	G ₃	
A	1-4	-0,4274	2,7011	2,6353	G ₂
B	2-7	-0,2419	2,8962	-0,1237	G ₂
C	3-9	-0,4273	2,7013	2,6350	G ₂
D	4-5	-0,4274	2,7013	2,6354	G ₂
E	4-6	-0,4274	2,7015	2,6351	G ₂
F	7-5	-0,2420	2,8968	-0,1231	G ₂
G	7-8	-0,2419	2,8962	-0,1241	G ₂
H	9-6	-0,4274	2,7017	2,6350	G ₂
I	9-8	-0,4274	2,7016	2,6348	G ₂

1. Perhitungan CCT pada Sistem Smart Grid 3-Generator 9-Bus saat Kondisi Stand-alone dengan Damping

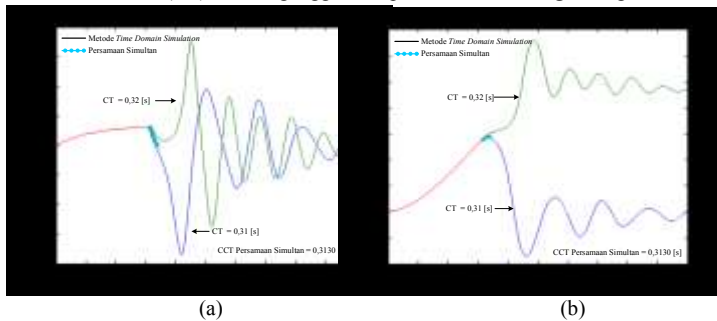
Simulasi yang akan dilakukan selanjutnya adalah mencari nilai CCT dengan menggunakan metode yang diusulkan pada sistem *smart grid* 3-generator 9-bus saat kondisi *stand-alone* dengan mempertimbangkan adanya *damping* pada setiap generator. Konstanta *damping* yang digunakan pada penelitian kali ini adalah sebesar 1%. Pada tabel 2. menunjukkan perbandingan nilai CCT pada setiap titik gangguan antara metode yang diusulkan dengan metode TDS dengan mempertimbangkan adanya *damping* pada setiap generator.

Tabel 2. Perbandingan hasil nilai CCT metode yang diusulkan dengan hasil nilai CCT metode TDS pada sistem *smart grid* 3-generator 9-bus dengan *damping*.

FAULT POINT	OPEN LINE	PERSAMAAN SIMULTAN		METODE TDS		ERROR (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	1-4	0,3325	0,7892	0,33 – 0,34	107,892	-
B	2-7	0,3130	0,8997	0,31 – 0,32	108,997	-
C	3-9	0,3386	1,8648	0,33 – 0,34	118,648	-
D	4-5	0,3263	0,9277	0,33 – 0,34	109,277	-1,1212
E	4-6	0,3263	0,9657	0,33 – 0,34	109,657	-1,1212
F	7-5	0,3131	0,9602	0,31 – 0,32	109,602	-
G	7-8	0,3130	0,9653	0,31 – 0,32	109,653	-
H	9-6	0,3237	0,8693	0,32 – 0,33	108,693	-
I	9-8	0,3236	0,9108	0,32 – 0,33	109,108	-



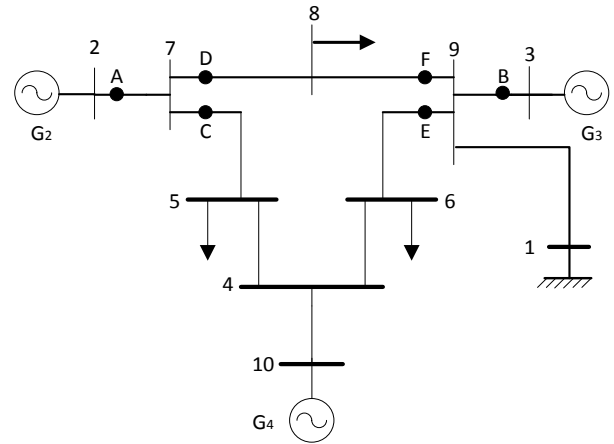
Gambar 6. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ω (rad/s) terhadap sudut rotor δ (rad) di titik gangguan G pada sistem *smart grid* 3-generator



Gambar 7. Grafik karakteristik (a) kecepatan sudut rotor terhadap waktu (s) dan (b) sudut rotor terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem *smart grid* 3-generator 9-bus dengan *damping*.

B. Perhitungan CCT pada Sistem Smart Grid Fouad dan Anderson 3-Generator 10-Bus saat Terhubung Infinite Bus

Untuk simulasi selanjutnya, akan dilakukan pengujian keakuratan metode yang diusulkan pada penelitian kali ini namun dengan sistem yang berbeda, dimana sistem yang akan digunakan pada simulasi kali ini adalah sistem *smart grid* 3-Generator 10-Bus. Sistem tersebut menggunakan referensi *infinite bus*, dimana yang dijadikan sebagai referensi *infinite bus* adalah generator G_1 dengan nilai momen inersia yang tak terhingga, Gambar 8. menunjukkan *single line diagram* sistem *smart grid* yang terhubung *infinite bus*.



Gambar 8. Sistem *Smart Grid* 3-Generator 10-bus saat terhubung *Infinite Bus*.

Pada Gambar 8., diasumsikan bahwa semua generator pada sistem menggunakan *Distributed Generator* (DG) dengan pembangkit *Micro Hydro* dan berikut adalah 6 letak titik gangguan pada saluran transmisi. Selanjutnya dari titik gangguan yang sudah ditentukan sebelumnya, maka dapat ditentukan nilai CUEP pada setiap generator dengan menggunakan metode *BCU-Shadowing*. Tabel 3. menunjukkan nilai CUEP masing-masing generator pada sistem *smart grid* 3-generator 10-bus.

Tabel 3. Nilai CUEP pada sistem *smart grid* 3-generator 10-bus saat terhubung *infinite bus*.

FAUL T POINT	OPE N LINE	CUEP				CG
		G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	
A	2-7	-0,0000	3,1091	0,0193	0,0374	G ₂
B	3-9	-0,0000	0,0340	3,1224	0,0363	G ₃
C	7-5	-0,0000	3,1093	0,0193	0,0372	G ₂
D	7-8	-0,0000	3,1097	0,0193	0,0378	G ₂
E	9-6	-0,0000	3,1093	0,0193	0,0378	G ₂
F	9-8	-0,0000	3,1098	0,0193	0,0380	G ₂

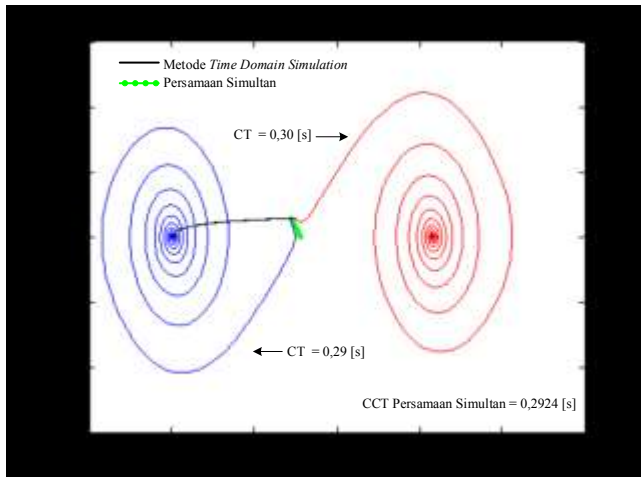
Tabel 4. Perbandingan hasil nilai CCT metode yang diusulkan dengan hasil nilai CCT metode TDS pada sistem *smart grid* 3-generator 10-bus saat terhubung *infinite bus* dengan *damping*.

FAULT POINT	OPEN LINE	PERSAMAAN SIMULTAN		METODE TDS		ERROR (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	2-7	0,2924	1,1765	0,29 – 0,30	111,765	-
B	3-9	0,4661	1,1843	0,46 – 0,47	111,843	-
C	7-5	0,2930	1,4222	0,29 – 0,30	114,222	-
D	7-8	0,2930	1,8181	0,29 – 0,30	118,181	-
E	9-6	0,3173	2,1355	0,31 – 0,32	121,355	-
F	9-8	0,3171	2,2261	0,31 – 0,32	122,261	-

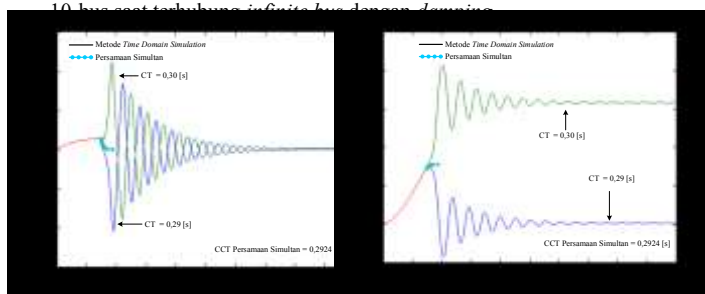
1. Perhitungan CCT pada Sistem Smart Grid 3-Generator 10-Bus saat Terhubung Infinite Bus dengan Damping

Simulasi yang akan dilakukan selanjutnya adalah mencari nilai CCT dengan menggunakan metode yang diusulkan pada sistem *smart grid* 3-generator 10-bus saat terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan adanya *damping* pada setiap generator. Konstanta *damping* yang digunakan pada penelitian kali ini adalah sebesar 1%. Pada Tabel 4.

menunjukkan perbandingan nilai CCT pada setiap titik gangguan antara metode yang diusulkan dengan metode TDS dengan mempertimbangkan adanya *damping* pada setiap generator.



Gambar 9. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ω (rad/s) terhadap sudut rotor δ (rad) di titik gangguan A pada sistem *smart grid* 3-generator 10-bus saat terhubung *infinite bus* dengan *damping*.



Gambar 10. Grafik karakteristik (a) kecepatan sudut rotor terhadap waktu (s) dan (b) sudut rotor terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem *smart grid* 3-generator 10-bus saat terhubung *infinite bus* dengan *damping*.

V. KESIMPULAN

Dengan menggunakan metode yang diusulkan untuk mendapatkan nilai CCT maka hasil yang didapatkan lebih akurat dan waktunya untuk iterasinya lebih cepat jika dibandingkan dengan perhitungan CCT menggunakan metode TDS. Hal ini dibuktikan saat melakukan perhitungan CCT pada sistem *smart grid* 3-generator 10-bus saat terhubung dengan *infinite bus* mempertimbangkan *damping* pada titik gangguan A dengan menggunakan metode TDS didapatkan range nilai CCT antara 0,29 - 0,30 detik. Sedangkan dengan menggunakan metode yang diusulkan, nilai CCT pada titik gangguan tersebut didapatkan nilai yang lebih akurat yaitu 0,2924 detik. Dan saat melakukan perhitungan CCT dengan menggunakan metode yang diusulkan tidak terdapat *error*.

Hasil dari perhitungan CCT juga dapat digunakan sebagai referensi *setting* waktu pemutus pada *circuit breaker* dengan menggunakan nilai CCT minimum dari semua nilai CCT yang sudah didapatkan pada setiap titik gangguan yang sudah ditentukan sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

[01] Pongtiku, James A., Maickel Tuegeh, Hans Tumaliang, "Analisa Stabilitas Transien Untuk Menentukan Waktu Pemutusan Kritis (*Critical Clearing Time*) Pada Jaringan Transmisi 70 kV PLTA Tanggari II-GI Sawangan Dengan Menggunakan Program Matlab". Teknik Elektro-FT, UNSRAT, 2014.

[2] 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.

[3] Anderson, P.M. dan A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", United States: A John Wiley & Sons, Inc, 2003.

[4] Kundur, P., "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc, 1994.

[5] Priyadi Ardyono, N. Yorino, dan Mauridhi H. P. "Critical trajectory for Transient Stability Analysis". Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. 2012

[6] 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.

[7] Dong, Hsiao, Chiang, Felix F. Wu, dan Pravin P. Varaiya. "A BCU Method for Direct Analysis of Power System Transient Stability", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 9. No. 3, August 1994.

[8] Athay T., R. Podmore, S. Virmani, "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No.2, March/April 1979.

[9] Grainger, J.J., Stevenson, W.D., *Power System Analysis*, New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.

[10] Keyhani, Ali dan Muhammad Marwali, "Smart Power Grids 2011", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

[11] Momoh, James "SMART GRID Fundamentals of Design and Analysis", United States: A John Wiley & Sons, Inc, 2012.

[12] Hadjsaid, Nouredine dan Jean-Claude Sabonnadière, "Smart Grids", United States: A John Wiley & Sons, Inc, 2012.