

Evaluasi Pengaturan Waktu Rele Pengaman di PT Pertamina Refinery Unit V Balikpapan dengan Mempertimbangkan *Transient Stability Assessment*

¹Tegar Iman Ababil, ²Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. ³Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

^{1,2,3} Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya

¹ tegarimababail@gmail.com, ² priyadi@ee.its.ac.id, ³ margo@ee.its.ac.id

Abstrak - Suatu sistem tenaga listrik dengan keandalan yang tinggi mampu memenuhi koordinasi pengaman sistem yang baik untuk menjaga kestabilan dan keberlanjutan sistem operasi secara terus menerus. Saat terjadi gangguan, rele pengaman akan bekerja dan memicu *Circuit Breaker* untuk bekerja dalam waktu tertentu. Namun hal tersebut masih belum dapat menjaga kestabilan sistem kembali seperti semula. Evaluasi kestabilan transien dibutuhkan untuk menentukan batas *Critical Clearing Time* (CCT). CCT adalah nilai waktu kritis setelah terjadi gangguan dimana sistem harus menghilangkan gangguan sebelum CCT berlangsung. Jika sistem menghilangkan gangguan setelah waktu CCT maka kestabilan sistem akan terganggu. Saat ini PT Pertamina Refinery Unit (RU) V Balikpapan memiliki pengaturan waktu rele pengaman yang masih belum mempertimbangkan *Transient Stability Assessment*. Keandalan dan kontinuitas sistem dapat ditingkatkan dengan mendapatkan nilai CCT dengan metode *Time Domain Simulation*. Dari permasalahan yang ada direkomendasikan penggunaan *Bus Differential Relay* yang mampu bekerja dengan waktu operasi yang cepat dan selektif.

Kata Kunci - Kestabilan Transien, *Critical Clearing Time*, *Time Domain Simulation*, *Bus Differential Relay*

Abstract - An electrical system with high reliability is able to meet good system protection coordination to maintain the stability and continuity of the operating system continuously. When an interruption occurs, the Protection Relay will work and trigger the *Circuit Breaker* to work within a certain time. But it still can not keep the system stability back to normal. *Transient stability evaluation* is needed to determine the *Critical Clearing Time* (CCT) limit. CCT is a critical time value after an interruption occurs where the system must eliminate interference before the CCT takes place. If the system eliminates interference after CCT time then the system stability will be disrupted. Currently PT Pertamina Refinery Unit (RU) V Balikpapan has a protection relay timing that still has not considered *Transient Stability Assessment*. Reliability and continuity system can be enhanced by obtaining CCT value with *Time Domain Simulation* method. From the existing problems recommended use of *Bus Differential Relay* that is able to work with a fast operating time.

Keyword - Kestabilan Transien, *Critical Clearing Time*, *Time Domain Simulation*, *Bus Differential Relay*

I. PENDAHULUAN

PT Pertamina RU V Balikpapan merupakan unit pengolahan yang memasok Bahan Bakar Minyak (BBM) dan Bahan Bakar Non Minyak (BBNM) kedua terbesar setelah RU IV Cilacap memegang peran penting bagi ketersediaan BBM dan BBNM yang telah ada di Indonesia. Peran inilah yang membuat proses produksi harus berjalan secara terus menerus. Sehingga butuh adanya kestabilan sistem tenaga listrik yang baik agar mampu menanggung semua kebutuhan kelistrikan sistem PT Pertamina RU V Balikpapan.

Proteksi sistem tenaga listrik yang telah ada hanya bergantung pada pengaturan waktu rele pengaman yang tersebar pada tiap penyulang. Saat terjadi gangguan hubung singkat maka rele pengaman akan mendeteksi gangguan dan akan memicu kerja dari *Circuit Breaker* untuk menghilangkan gangguan. Namun penghilangan gangguan tersebut belum menjamin kestabilan sistem dapat kembali stabil sehingga dibutuhkan suatu parameter tambahan agar setelah gangguan hubung singkat terjadi sistem dapat kembali stabil. Salah satu solusi dari permasalahan tersebut yaitu dengan analisis kestabilan transien sistem dengan memperhitungkan nilai pemutus waktu kritis atau *Critical Clearing Time* (CCT). CCT merupakan nilai batas waktu penghilangan kritis setelah terjadi suatu gangguan pada sistem. Dengan kata lain untuk membuat sistem kembali stabil maka penghilangan gangguan harus dilakukan sebelum batas waktu CCT yang ada.

II. DASAR TEORI

A. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Definisi dari kestabilan sistem tenaga listrik merupakan kondisi dimana suatu *multimachine* atau generator yang terhubung secara sinkron memiliki kemampuan untuk kembali ke titik seimbang setelah mengalami gangguan pada sistem. Gangguan yang terjadi pada sistem akan membuat arus dan tegangan berubah di setiap bus sistem. Hal tersebut mengakibatkan terjadinya perbedaan nilai input mekanis dari sebuah *prime mover* dan keluaran tenaga listrik dari generator yang berimbas pada kecepatan putar rotor pada generator yang

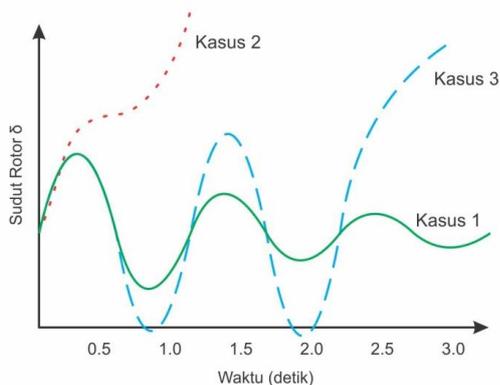
bekerja. Menurut referensi [4] kestabilan terbagi atas tiga klasifikasi yaitu :

- 1) Kestabilan Sudut Rotor
- 2) Kestabilan Frekuensi
- 3) Kestabilan Tegangan

B. Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari sistem yang terhubung pada beberapa generator agar dapat kembali ke titik seimbang untuk mempertahankan keadaan sinkron setelah mengalami gangguan [5]. Ketika terjadi gangguan pada sistem akan menyebabkan perubahan keseimbangan torsi elektik dan torsi mekanik sehingga mengakibatkan percepatan atau perlambatan sudut rotor. Alasan digunakannya kestabilan sudut rotor dalam penentuan *Transient Stability Assessment* karena kondisi yang paling cepat untuk diamati yaitu sudut rotor sehingga saat sudut rotor tidak stabil kemungkinan besar frekuensi dan tegangan akan menjadi tidak stabil begitu juga sebaliknya.

Pada Gambar 1 akan ditunjukkan respon dari sudut rotor generator akibat gangguan transien pada beberapa kasus untuk menunjukkan keadaan stabil dan tidak stabil dari generator. Kasus pertama terjadi ketika gangguan dihilangkan sudut rotor yang naik akan menurun hingga mencapai keadaan steady yang dapat merepresentasikan keadaan stabil. Kasus kedua terjadi ketika sudut rotor naik secara bertahap hingga generator tersebut lepas dari sinkron. Kasus ketiga terjadi saat generator beresilasi terus menerus kemudian akan lepas dari sinkronnya.



Gambar 1. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan transien [5]

C. Kestabilan Transien

Kestabilan Transien merupakan kemampuan sistem untuk kembali sinkron setelah sistem mengalami gangguan besar seketika dan terjadi dalam periode ayunan pertama. Kestabilan ini terjadi saat pengatur tegangan otomatis (exciter) dan pengatur frekuensi (governor) belum bekerja.

Dalam *Transient Stability Assesment* atau analisis kestabilan transien ini tidak lagi membahas kestabilan *steady state*. Dimana saat suatu sistem dikatakan stabil pada kondisi *steady state* namun belum tentu stabil saat terjadi gangguan

transien. Terdapat beberapa gangguan yang mampu mempengaruhi kestabilan transien, yaitu :

- 1) Gangguan Hubung Singkat
- 2) Efek Motor Starting
- 3) Pelepasan Beban Seketika

D. Persamaan Ayunan

Persamaan Ayunan merupakan persamaan yang berhubungan dengan gerakan rotor mesin sinkron yang menganut prinsip dasar dinamika tentang momen putar kecepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari percepatan sudut dan kelembaman rotor (*moment of inertia*) [8]. Persamaan ayunan dari generator sinkron dapat dituliskan sebagai berikut :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \tag{1}$$

Keterangan :

- J : adalah momen inerti total dari massa rotor (kg-m²),
- θ_m : adalah pergeseran sudut rotor terhadap sumbu yang diam dalam radian mekanis (rad),
- t : adalah waktu dalam satuan detik (s),
- T_a : adalah momen putar kecepatan percepatan bersih (N-m),
- T_m : adalah momen putar mekanis atau poros penggerak yang diberikan oleh prime mover dikurangi dengan momen putar perlambatan (retarding) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran (N-m) dan
- T_e : adalah momen putar listrik atau elektromagnetik (N-m).

Saat keadaan tetap (steady state) T_a akan bernilai nol karena tidak ada percepatan ataupun perlambatan pada massa rotor sehingga kecepatan resultannya merupakan kecepatan sinkron generator tersebut. Diasumsikan T_m dianggap konstan pada kondisi operasinya karena kecepatan putar *prime mover* diatur oleh *governor*. Dimana *governor* belum bekerja pada periode transien. Sehingga saat T_e mengalami penurunan maka akan terjadi percepatan pada kecepatan sinkron generator. Sedangkan saat T_e mengalami peningkatan akan mengakibatkan perlambatan kecepatan sinkron generator.

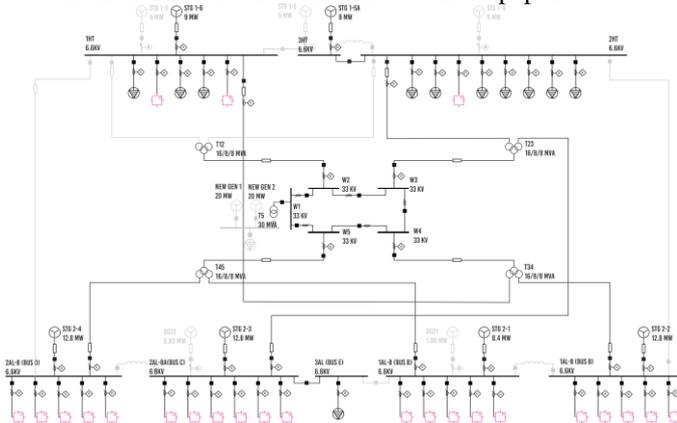
E. Critical Clearing Time

Critical Clearing Time (CCT) merupakan batas waktu yang dapat diijinkan oleh sistem untuk menghilangkan gangguan agar sistem mampu kembali stabil setelah terjadi gangguan. Jika suatu sistem melakukan penghilangan gangguannya melewati batas dari CCT maka akan mengakibatkan beberapa generator lepas sinkron sehingga sistem tidak mampu menjadi kembali stabil seperti sebelum gangguan. Dengan adanya batas dari CCT dapat mencegah terjadinya kerusakan terhadap generator. Salah satu kerusakan

yang dapat timbul ketika gangguan dihilangkan melebihi batas CCT yaitu patahnya rotor generator.

III. ANALISIS HASIL SIMULASI DAN REKOMENDASI

Saat ini PT Pertamina RU V Balikpapan disuplai oleh enam generator tenaga uap (*Steam Turbine Generator*). Sistem distribusi yang ada memiliki tiga level tegangan (33 kV, 6.6kV dan 0.38kV) memiliki peranannya masing-masing. Untuk level tegangan 33kV berfungsi untuk menjaga keandalan sistem yang terhubung pada bus sistem distribusi ring. Kemudian untuk bus level tegangan 6.6kV dan 0.38kV digunakan untuk mendistribusikan beban motor dan beban statis. Berikut Gambar 2 menunjukkan *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT Pertamina RU V Balikpapan.



Gambar 2. *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT Pertamina RU V Balikpapan

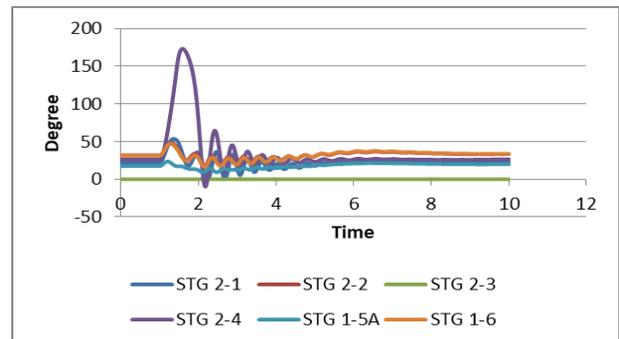
A. Penentuan Batas CCT

Analisis data simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan respon generator yang tersambung pada sistem kelistrikan PT Pertamina RU V Balikpapan. Salah satu respon yang perlu diperhatikan dalam studi kasus ini yaitu CCT. Dimana CCT dapat dianalisa melalui respon stabil dan tidaknya melalui sudut rotor tiap generator. Untuk mendapatkan waktu stabil dan tidak stabil digunakan cara trial and error [8]. Setelah itu akan didapatkan CCT berupa range waktu stabil dan tidak stabilnya. Sehingga untuk kestabilan dan sinkronisasi antar generator masih dapat diamati perubahan respon sudut rotor generator. Pada studi kasus ini akan ditampilkan respon sudut rotor pada bus yang berada dibawah generator dan bus ring saat terjadi gangguan menggunakan metode *Time Domain Simulation*.

1) Gangguan Hubung Singkat pada Bus dibawah Generator

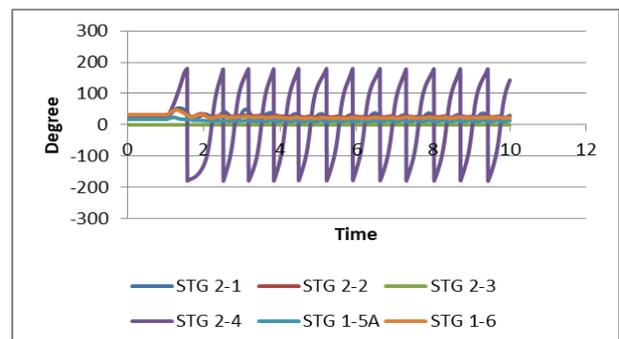
Disimulasikan gangguan hubung singkat tiga fasa pada bus 2AL-B (Bus D) pada 1 detik setelah simulasi dimulai. Saat gangguan terjadi didapatkan waktu penghilangan

gangguan pada kondisi stabil adalah 0,44s, sedangkan waktu penghilangan gangguan tidak stabil pada bus 2AL-B (Bus D) adalah 0,45s. Berikut gambar grafik sudut rotor generator yang telah diplot saat kondisi stabil dan kondisi tidak stabil.



Gambar 3. Respon sudut rotor pada bus 2AL-B (Bus D) saat gangguan dihilangkan di waktu 0,44s

Dapat diamati dari Gambar 3 jika gangguan dihilangkan pada keadaan stabilnya yaitu 0,44s maka respon tiap generator dengan sistem akan kembali menuju keadaan stabilnya. Ketika dilihat lebih lanjut maka respon pada generator STG 2-4 ketika gangguan terjadi pada batas kritisnya akan mengakibatkan perubahan sudut rotor sebesar (173.18°) setelah gangguan terjadi.

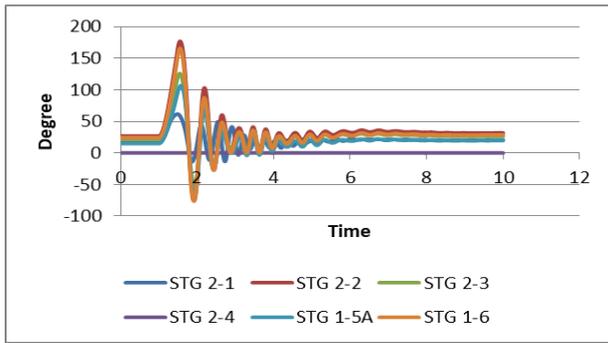


Gambar 4. Respon sudut rotor pada bus 2AL-B (Bus D) saat gangguan dihilangkan di waktu 0,45s

Kemudian jika gangguan dihilangkan pada keadaan tidak stabilnya yaitu 0,45s maka respon generator STG 2-4 akan kehilangan sinkronnya dengan respon sudut rotor sebesar (179.75°) kemudian berubah menjadi (-179.6°). Perbedaan sudut rotor yang cukup besar menggambarkan generator mengalami step out dari sistem seperti Gambar 4.

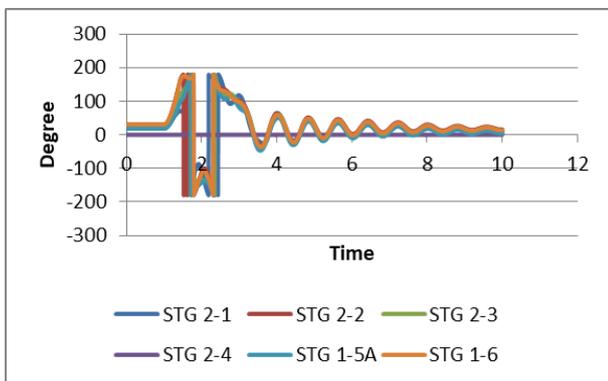
2) Gangguan Hubung Singkat pada Bus Ring

Disimulasikan gangguan hubung singkat tiga fasa pada bus W5 pada 1 detik setelah simulasi dimulai. Saat gangguan terjadi didapatkan waktu penghilangan gangguan pada kondisi stabil adalah 0,41s, sedangkan waktu penghilangan gangguan tidak stabil pada bus W5 adalah 0,42s. Berikut gambar grafik sudut rotor generator yang telah diplot saat kondisi stabil dan kondisi tidak stabil.



Gambar 5. Respon sudut rotor pada bus W5 saat gangguan dihilangkan di waktu 0,41s

Dapat diamati dari Gambar 5 jika gangguan dihilangkan pada keadaan stabilnya yaitu 0,41s maka respon tiap generator dengan sistem akan kembali menuju keadaan stabilnya. Jika di lihat lebih lanjut maka respon pada generator STG 2-2 akan memiliki nilai sudut rotor paling besar dari pada generator lainnya. Sehingga ketika gangguan terjadi pada batas kritisnya akan mengakibatkan pergeseran sudut rotor sebesar (168.78°) setelah gangguan terjadi.



Gambar 6. Respon sudut rotor pada bus W5 saat gangguan dihilangkan di waktu 0,42s

Kemudian jika gangguan dihilangkan pada keadaan tidak stabilnya yaitu 0,42s maka respon seluruh generator akan kehilangan sinkronnya. Jika dilihat dari generator STG 2-2 yang memiliki perubahan sudut rotor paling besar pada waktu 0.41s sebelumnya maka pada waktu 0.42s akan mengalami perubahan dari (179.6°) kemudian berubah menjadi (-179.89°) yang menandakan bahwa generator tersebut step out dari sistem seperti Gambar 6.

B. Perbandingan Waktu Penghilangan Gangguan dengan CCT

Waktu pengaturan yang dibandingkan adalah hasil pengaturan waktu rele pengamanan pada PT Pertamina RU V Balikpapan menurut referensi Eko Purwanto W. H. [2]. Kemudian akan dibandingkan waktu pengaturan sistem PT Pertamina RU V Balikpapan dengan hasil CCT yang telah didapatkan. Untuk kasus yang pertama diamati ketika

gangguan terjadi pada bus yang dibawah generator. Waktu penghilangan gangguan yang diamati yaitu waktu rele pengamanan arus lebih pada saat sensing gangguan dengan tambahan waktu minimal operasi Circuit Breaker pada bus dibawah generator. Perbandingan waktu penghilangan gangguan PT Pertamina RU V Balikpapan sebelum mempertimbangkan Transient Stability Assessment dengan nilai CCT akan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan waktu waktu penghilangan gangguan di bus bawah generator sebelum memperhatikan Transient Stability Assessment dengan nilai CCT

No	Bus ID	Waktu Penghilangan Gangguan (Sec)	Hasil CCT (Sec)	Status
1	1HT	0.59	0.41-0.42	PERLU REKOMENDASI
2	3HT	0.58	0.93-0.94	AMAN
3	2AL-B(BUS D)	0.51	0.44-0.45	PERLU REKOMENDASI
4	2AL-A(BUS C)	0.51	0.46-0.47	PERLU REKOMENDASI
5	1AL-B(BUS B)	0.51	0.58-0.59	AMAN
6	1AL-A(BUS A)	0.51	0.40-0.41	PERLU REKOMENDASI

Selanjutnya pada kasus kedua akan diamati gangguan pada bus ring sistem kelistrikan PT Pertamina RU V Balikpapan. Menurut Jurnal Teknik Pomits Vol. 2 No. 1 (2004) milik Wildan Imanur Rahman berjudul “Setting Rele Diferensial Bus High Impedance pada Sistem Distribusi Ring 33kV di PT. Pertamina RU V Balikpapan” [3] rele yang digunakan pada bus ring merupakan rele diferensial Bus Diferensial Relay (rele diferensial). Pada rele jenis ini mampu memutuskan gangguan dengan waktu delay hingga 3 cycle atau sekitar 0.06 detik. Total waktu penghilangan gangguan sebesar 0.07 detik dengan waktu operasi minimal Circuit Breaker sebesar 0.01 detik. Secara umum cara kerja rele diferensial membandingkan arus masuk dan keluar pada bus gangguan. Pada Tabel 2 ditunjukkan saat terjadi gangguan pada bus ring tersebut masih aman ketika dibandingkan nilai CCT yang telah didapatkan sebelumnya.

Tabel 2. Perbandingan waktu waktu penghilangan gangguan di Bus Ring sebelum memperhatikan Transient Stability Assessment dengan nilai CCT

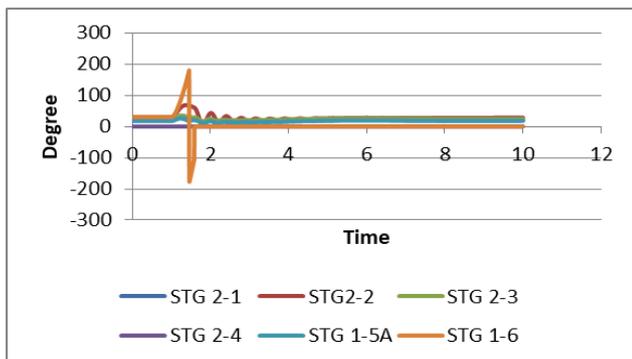
No	Bus ID	Waktu Penghilangan Gangguan (Sec)	Hasil CCT (Sec)	Status
1	W1	0.07	0.41-0.42	AMAN
2	W2	0.07	0.41-0.42	AMAN
3	W3	0.07	0.41-0.42	AMAN

4	W4	0.07	0.41-0.42	AMAN
5	W5	0.07	0.41-0.42	AMAN

C. Rekomendasi dengan mempertimbangkan *Transient Stability Assessment*

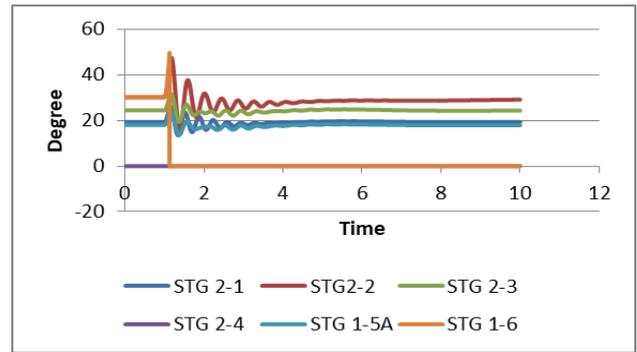
Terdapat pilihan rekomendasi untuk mengatasi permasalahan yang terjadi pada PT Pertamina RU V Balikpapan dengan mempertimbangkan *Transient Stability Assessment* yang disarankan oleh penulis. Rekomendasi yang dimaksud berupa penambahan rele diferensial bus untuk mengatasi permasalahan *Transient Stability Assessment*.

Rele pengaman jenis ini telah digunakan dalam bus ring untuk mengamankan bus saat terjadi gangguan hubung singkat. Rele diferensial ini mampu menghilangkan gangguan dengan waktu yang cepat dalam range 1 cycle hingga 3 cycle atau sekitar 0.02 hingga 0.06 detik. Waktu perbandingan dengan CCT juga harus memperhatikan waktu operasi *Circuit Breaker* untuk menghilangkan gangguan, dimana tiap *Circuit Breaker* memiliki waktu operasi minimal masing-masing. Alasan digunakan rele diferensial dengan waktu operasi yang cepat yaitu untuk menjaga koordinasi rele saat terjadi gangguan di sisi penyulang. Namun saat terjadi gangguan di bus yang tersambung dengan generator maka gangguan dapat dihilangkan dengan cepat sehingga kerusakan generator dapat diminimalisir.



Gambar 7. Respon sudut rotor pada bus 1HT sebelum dilakukan rekomendasi menggunakan rele diferensial.

Dari Gambar 7 saat gangguan dihilangkan pada waktu 0,59s maka respon generator STG 1-6 akan mengalami perubahan sudut rotor sebesar (179.19°) kemudian berubah (-179.89°) dengan waktu yang sangat singkat. Hal tersebut akan berpotensi mengakibatkan generator *step out* pada sistem bahkan dapat merusak rotor dari generator STG 1-6 .



Gambar 8. Respon sudut rotor pada bus 1HT sesudah dilakukan rekomendasi menggunakan rele diferensial.

Setelah dilakukan rekomendasi dengan penambahan rele diferensial maka pada Gambar 8 mampu menunjukkan respon generator STG 1-6 yang sebelumnya berpotensi mengalami hilang sinkron atau *step out* dapat kembali stabil dengan perubahan sudut rotor sebesar (46.61°). Sehingga dapat dibuat tabel perbandingan setelah penggunaan rele diferensial dengan nilai CCT yang ada ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan waktu waktu penghilangan gangguan setelah memperhatikan *Transient Stability Assessment*

No	Bus ID	Waktu Penghilangan Gangguan	Hasil CCT	Status
1	1HT	0.13s	0.46-0.47s	AMAN
2	2AL-B(BUS D)	0.07s	0.44-0.45s	AMAN
3	2AL-A(BUS C)	0.07s	0.46-0.47s	AMAN
4	1AL-A(BUS A)	0.07s	0.40-0.41s	AMAN

IV. KESIMPULAN

Dari apa yang telah penulis lakukan dalam evaluasi pengaturan waktu rele pengaman pada PT Pertamina RU V Balikpapan dengan mempertimbangkan *Transient Stability Assessment* dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dengan mempertimbangkan analisis *Transient Stability Assessment* seperti penentuan nilai range stabil dan tidak stabil sistem setelah gangguan dihilangkan dengan nilai CCT dapat meminimalisir kerusakan peralatan pada sistem kelistrikan PT Pertamina RU V Balikpapan.
2. Dari nilai CCT yang telah ditemukan dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* akan digunakan untuk rekomendasi pengaturan waktu rele pengaman PT Pertamina RU V Balikpapan agar kestabilan dan keandalan sistem dapat terjaga.

Penulis memberikan saran untuk dilakukan studi evaluasi kestabilan sistem tenaga pada PT Pertamina RU V Balikpapan

dimana tidak hanya memperhatikan respon sudut rotor namun juga memperhatikan respon frekuensi dan tegangan agar mampu memberikan rekomendasi yang lebih handal. Selain rekomendasi penambahan rele diferensial yang telah diberikan penulis untuk mengatasi permasalahan *Transient Stability Assessment* pada sistem kelistrikan PT Pertamina RU V Balikpapan sebenarnya masih terdapat beberapa rekomendasi lainnya seperti penggunaan *Voltage Restraint Relay*, *Agent Relay System* dan *Circuit Breaker Interlock* yang mampu bekerja saat terjadi gangguan hubung singkat dititik gangguan dengan masih mempertimbangkan koordinasi tiap rele pengaman.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE, Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems, IEEE Std 242-2001TM. 2001.
- [2] E. Purwanto W. H., "Evaluasi Pengaruh Distributed Generation (DG) Terhadap Proteksi Sistem Distribusi Menggunakan Protection Coordination Index (PCI) di PT Pertamina RU V Balikpapan," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [3] W. I. Rahman, M. Pujiantara, and R. Wahyudi, "Setting Rele Diferensial Bus High Impedance Pada Sistem distribusi Ring 33KV di Pertamina RU V Balikpapan," J. Tek. POMITS, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2014.
- [4] P. Kundur et al., "Definition and Classification of Power System Stability," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [5] P. Kundur, Power System Stability and Control. California: McGraw-Hill, Inc, 1993.
- [6] IEEE, Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants. IEEE Std C37.106TM-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987) IEEE, 2003.
- [7] IEEE, Recommended Practice for the Transfer of Power Quality Data. IEEE Std 1159.3TM-2003 IEEE, 2003.
- [8] J. C. Das, Transients in Electrical Systems Analysis, Recognition and Mitigation. The McGraw-Hill Companies, Inc, 2010.
- [9] Yudiestira, "Analisis Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di PT. Pertamina RU V Balikpapan Akibat Penambahan Generator 2x15MW dan Penambahan Beban 25 MW," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [10] J. J. Granger and W. D. Stevenson, Power System Analysis. Singapore: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [11] A. Priyadi, Buku Bahan Ajar Kestabilan Transient. Surabaya: Departemen Teknik Elektro, 2017.
- [12] S. Atmaja, M. E. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST, and I. T. Yuwono, "Perhitungan Critical Clearing Time dengan Menggunakan Metode Time Domain Simulation," pp. 1–6, 2012.