

Laporan Akhir



**ANALISA KESTABILAN TRANSIENT MENGGUNAKAN REDUKSI
KRON PADA SISTEM MULTIMESIN**

Oleh :

Dr. Irrine Budi Sulistiawati, ST.,MT (Ketua)

Dr. Eng I Komang Somawirata (Anggota 1)

Dr.Eng Ir. I Made Wartana, MT (Anggota 2)

**LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA
MASYARAKAT
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
2018**

**HALAMAN PENGESAHAN
LAPORAN AKHIR PENELITIAN HIBAH INTERNAL**

Judul : ANALISA KESTABILAN TRANSIENT MENGGUNAKAN
REDUKSI KRON PADA SISTEM MULTIMESIN

Peneliti/Pelaksana

Nama Lengkap & Gelar : Dr. Irrine Budi Sulistiawati , ST, MT
NIDN / NIP : 0015067701 / 197706152005012002
Fakultas / Program Studi : Fakultas Teknologi Industri / Teknik Elektro S-1
Alamat Surel (E-mail) : irrine_budi@yahoo.com
No. HP :
Jabatan Fungsional : Lektor

Anggota (1)

Nama Lengkap & Gelar : Dr. Eng. I Komang Somawirata, ST., MT.
NIDN / NIP : 0717067401 / P. 1030000361
Fakultas / Program Studi : Fakultas Teknologi Industri / Teknik Elektro S-1

Anggota (2)

Nama Lengkap & Gelar : Dr. Eng. Ir. I Made Wartana, MT
NIDN / NIP : 0003056101 / 196105031992021001
Fakultas / Program Studi : Fakultas Teknologi Industri / Teknik Elektro S-1

Institusi Mitra (jika ada)

Nama Institusi Mitra :

Alamat Institusi Mitra :

Penanggung Jawab :

Tahun Pelaksanaan : 2018

Biaya Keseluruhan : Rp. 10.000.000,00



Mengetahui,
Ketua LPPM ITN Malang

(Fourry Handoko, ST., SS., MT., Ph.D)
NIP. P. 1030100359

Malang, 18 Juli 2018
Ketua,

(Dr. Irrine Budi Sulistiawati , ST, MT)
NIP. 197706152005012002

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
Daftar Isi	iv
Daftar Tabel	iv
Daftar Gambar	iv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Manfaat	3
1.5. Target Luaran	3
1.6. Diskripsi Group Riset	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Kestabilan Transien	4
2.2. Critical Clearing Time	6
2.3. Reduksi Kron	8
2.4. Peta Jalan Penelitian	9
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	11
3.1. Roadmap Teknik Elektro	11
3.2. Peta Penelitian	11
3.3. Output Yang Ditargetkan	12
3.4. Road Map Penelitian	12
BAB 4 ANGGARAN BIAYA	13
4.1. Anggaran Biaya	13
4.2. Jadwal Penelitian	13
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Rencana Penelitian	10
2. Peta Penelitian	11
3. Anggaran Biaya	13
4. Jadwal Penelitian	13

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Respon sudut rotor terhadap gangguan	5
2. Kurva sudut daya	6
3. Road Map Target Penelitian	12

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keamanan dan keandalan operasi sistem tenaga listrik dapat kita ketahui dengan melakukan analisa kestabilan transien [1]. Analisa kestabilan transient biasanya dilakukan menggunakan simulasi numerik dengan proses integrasi numerik yang diselesaikan selangkah demi selangkah sehingga respon gangguan diperoleh dengan nilai keakuratan tinggi. Pola non linear dari perilaku sistem juga dapat diketahui dari assesmen stabilitas trasien. Namun metoda simulasi numerik memerlukan waktu yang lama untuk mendapatkan hasilnya. Sehingga untuk aplikasi analisa kestabilan transien secara real time kurang tepat untuk digunakan [2].

Metoda yang mampu memberikan hasil analisa kestabilan transien dengan cepat adalah metode yang berbasis pada fungsi energi, yaitu analisa kestabilan transien yang didasarkan pada fenomena energi potensial transien dan energi kinetik [3]. Proses perhitungan yang dihasilkan cepat dan tidak memakan waktu yang lama. Namun kepraktisan dari metode ini menjadikan metode ini kurang akurat dalam menentukan hasil kestabilan transien. Metode yang berbasis fungsi energi ini hanya dapat digunakan pada sistem yang sederhana.

Perkembangan metode ini akan sangat menjanjikan apabila direalisasikan dalam suatu plant kecil yang digunakan untuk menguji penemuan metode baru yang sudah diperoleh. Sehingga ke depannya untuk melakukan aplikasi real time assesmen stabilitas transien pada sistem tenaga listrik dapat terwujud [4-5].

Penilaian kestabilan transient pada sistem tenaga listrik berhubungan dengan terjadinya gangguan besar yang mengharuskan sistem mendapatkan waktu pemutusan kritis atau critical clearing time yaitu waktu yang aman untuk sistem kembali ke keadaan stabil. Nilai cct ini lah yang menjadi referensi untuk melakukan tindakan preventif dan korektif pada sistem yang sedang beroperasi.

Dalam assesment kestabilan transient, selalu dilakukan analisa aliran daya untuk melihat performansi sistem yang bekerja. Dari proses simulasi aliran daya akan diperoleh kondisi pada tiap bus sistem. Dalam sistem yang terdiri dari banyak mesin, perlu dilakukan reduksi matrik jaringan untuk menyederhanakan kompleksitas sistem sehingga mempermudah perhitungan dalam menentukan parameter parameter yang dapat digunakan dalam perhitungan critical clearing time. Penggunaan reduksi Kron dilakukan untuk mereduksi bus beban pada matrik admitansi, sehingga sistem yang ada lebih sederhana dan analisa kestabilan transient yang berkaitan dengan ayunan pada generator dapat diperoleh.

Reduksi kron banyak digunakan sebagai metode penyederhanaan untuk sistem tenaga linear dan non linear [5-6]. Metode ini berfokus pada beberapa bus yang dipilih, sehingga perlu dilakukan untuk melakukan penomoran bus sistem dengan selektif agar dapat diketahui bus yang ingin dipertahankan dan bus yang ingin dieliminasi [7].

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini, melakukan assesment kestabilan transient pada banyak mesin dimana untuk mempermudah akan dilakukan pemodelan sistem kelistrikan, dengan memodelkan beban nonlinear pada sistem

Selanjutnya reduksi kron digunakan untuk mengetahui performansi sistem dan dilakukan perhitungan waktu pemutusan kritis dari sistem. Lebih detailnya dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana proses reduksi kron pada sistem multi mesin yang digunakan?
2. Bagaimana assesment kestabilan transient pada sistem multimesin?

1.3 Tujuan

Dari rumusan diatas, diharapkan dapat dicapai tujuan penelitian disini yaitu memperoleh assesment stabilitas transient pada sistem tenaga listrik real yaitu pada sistem kelistrikan lombok. Pemilihan sistem kelistrikan lombok berdasarkan pemilihan bahwa sistem baru berkembang dan adanya penambahan pembangkit

baru maka diperlukan assesment ilmiah yang dapat digunakan sebagai referensi dan implementasi pada sistem kelistrikan lombok

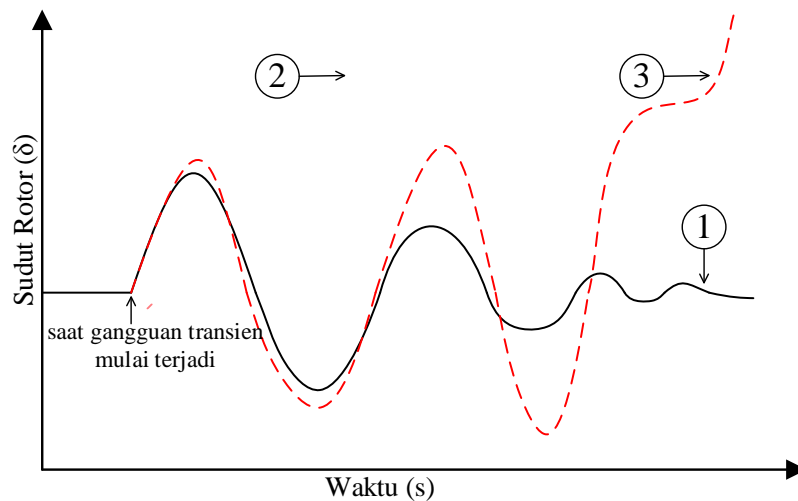
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kestabilan Transien

Kestabilan transient menurut (Kundur,P 1993) didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk mempertahankan sinkronisasinya ketika mengalami gangguan besar seperti gangguan hubung singkat tiga fasa yang terjadi pada saluran transmisi, hilangnya daya pembangkitan atau kehilangan beban besar pada sistem. Sistem akan merespon gangguan ditunjukkan dengan berubahnya sudut rotor generator, arus listrik, tegangan bus maupun variabel sistem lainnya. Sistem akan mempertahankan sinkronisasinya dalam waktu 2 hingga 3 detik dari awal terjadinya gangguan. Pada kondisi ini sudut rotor antara mesin di dalam sistem mengalami perbedaan dalam batas batas tertentu. Dalam kurun waktu tersebut, stabilitas transient dipelajari.

Kondisi awal dan besarnya gangguan yang terjadi sangat berpengaruh pada kemampuan kesetimbangan dari torsi mekanik dan torsi elektrik pada mesin-mesin sinkron. Gangguan yang terjadi akan mengakibatkan perbedaan antara torsi mekanik dan torsi elektrik yang mengakibatkan percepatan dan perlambatan putaran pada rotor. Semakin besar gangguan yang terjadi, akan memberi pengaruh yang besar pada pergeseran sudut rotor. Percepatan dan perlambatan putaran rotor ini berpengaruh pada pergeseran sudut rotor sehingga generator menjadi tidak sinkron lagi. Torsi sinkronisasi yang tidak cukup tadi muncul sebagai ketidakstabilan yang berbentuk arus non periodik dan dikenal dengan istilah stabilitas ayunan pertama. Namun, pada sistem multi mesin, tidak selalu ketidakstabilan transient terjadi pada ayunan pertama. Bisa juga timbul karena penyimpangan dari beberapa mode osilasi sudut rotor luar ayunan pertama.



Gambar 1. Respon sudut rotor terhadap gangguan (Prabha Kundur, 1994)

Akibat dari kondisi transien tersebut, sistem operasi dari sistem akan berubah, tidak sama seperti kondisi sistem sebelum gangguan.

Dari gambar 1. diatas, merupakan hasil plotting sudut rotor dalam merespon gangguan.

Respon 1 --- merupakan respon menuju stabil

Sudut rotor ketika gangguan terjadi bergeser hingga ke nilai maksimumnya serta berisolasi hingga sampai ke kondisi steady statenya.

Respon 2 --- merupakan respon kehilangan sinkronisasinya

Pada kondisi ini ketika gangguan terjadi, pada saat ayunan pertama sudut rotor bertambah semakin besar dan melampaui kemampuan maksimumnya hingga akhirnya kehilangan sinkronisasinya.

Respon 3 --- merupakan respon lepas sinkronisasinya

Ketika gangguan terjadi dan tidak dapat diatasi, rotor mengalami osilasi yang semakin lama semakin besar dengan terjadi banyak ayunan dan generator pada akhirnya mengalami lepas sinkronisasi.

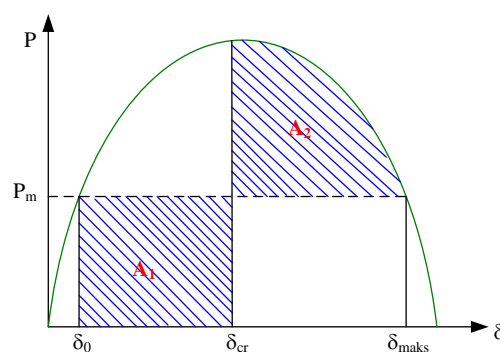
Penilaian kestabilan transient bertujuan untuk memperoleh pengoperasian yang aman pada sistem tenaga listrik. Dengan melakukan evaluasi

sistem dalam jangka waktu tertentu secara online, akan diperoleh berbagai data seperti akusisi data, perhitungan kestabilan, pemilihan pembangkit serta informasi pada saluran transmisi dan digunakan untuk kontrol kestabilan transien. Ketika gangguan terjadi, waktu yang diperlukan untuk mendeteksi *generator shedding* sekitar 150ms, sehingga perlu didapatkan metode yang dapat memperoleh *critical clearing time* dengan cepat dan akurat.

2.2. Critical Clearing Time

Waktu pemutusan kritis didefinisikan sebagai waktu yang digunakan untuk memutuskan sistem yang mengalami gangguan kembali ke kondisi stabil atau tidak. Skema yang dilakukan ketika gangguan terjadi adalah sistem akan melokalisir gangguan dengan cara memutuskan saluran yang terganggu menggunakan rele pengaman yang membuka pemutus atau *circuit breaker* (cb) saluran transmisi atau melepas *circuit breaker* generator sehingga generator terlepas dari sistem selama kurun waktu 0,2 – 0,3 sekon. Diharapkan dari skenario ini, peralatan pada sistem akan aman dari kerusakan. Namun skenario ini kadang tidak menjamin sistem dapat kembali ke kondisi stabilnya. Karena adanya waktu pemutusan kritis atau yang disebut dengan *critical clearing time* pada sistem tenaga listrik.

Waktu membukanya *circuit breaker* ini harus lebih cepat dari waktu pemutusan kritis atau disebut *critical clearing time* (cct) untuk memastikan sistem dapat kembali ke kondisi normalnya. Apabila gangguan terlepas lebih dari waktu kritisnya, maka sistem akan kehilangan kestabilannya.



Gambar 2. Kurva sudut daya

Penjelasan lebih detail dari critical clearing time atau waktu pemutusan kritis dapat dijelaskan sebagai berikut. Dengan mengacu pada gambar 4. kita perhatikan luasan area A_1 . Pada area A_1 waktu maksimum yang diperlukan untuk melepaskan gangguan dinyatakan pada sudut δ_{cr} . Apabila waktu pelepasan gangguan tidak mencapai waktu yang telah ditentukan, maka luasan area A_1 akan semakin membesar dan δ_{cr} akan semakin besar juga mendekati nilai δ_{maks} yang diijinkan. Akibat dari nilai δ yang mendekati bahkan melebihi δ_{maks} maka kecepatan rotor pada titik tersebut di dalam lengkung kurva sudut daya akan lebih besar dari kecepatan sinkronnya sehingga daya percepatan akan bernilai positif. Hal ini akan berpengaruh pada besar sudut δ yang terus meningkat tanpa batas hingga terjadi ketidakstabilan. Dari sini kita definisikan bahwa pemutusan gangguan pada sudut kritis disebut sebagai sudut pemutusan kritis δ_{cr} (critical clearing angle), sedangkan waktu yang diperlukan untuk memutuskan gangguan pada saat δ_{cr} disebut dengan pemutusan kritis t_{cr} (*critical clearing time*)

Sedangkan besar sudut pemutusan kritis dan waktu pemutusan kritis yang diperlukan berdasarkan luasan kurva diatas dapat dihitung sebagai berikut:

Luas area A_1 :

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m (\delta_{cr} - \delta_0) \quad (1)$$

Luas area A_2 :

$$\begin{aligned} A_2 &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{maks}} (P_m \sin \delta - P_m) d\delta \\ &= P_{maks} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{maks}) - P_m (\delta_{maks} - \delta_{cr}) \end{aligned} \quad (2)$$

Luasan $A_1 =$ Luasan A_2

$$P_m (\delta_{cr} - \delta_0) = P_{maks} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{maks}) - P_m (\delta_{maks} - \delta_{cr})$$

Atau

$$\cos \delta_{cr} = (P_m / P_{maks})(\delta_{maks} - \delta_0) + \cos \delta_{maks}$$

$$\delta_{maks} = \pi - \delta_0 \quad \text{rad - listrik}$$

$$P_m = P_{maks} \sin \delta_0$$

Sehingga dengan mensubstitusikan δ_m dan P_m maka

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}[(\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0]$$

Sehingga besar sudut pemutusan kritis atau δ_{cr}

$$\delta_{cr} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_{cr}^2 + \delta_0$$

Dan waktu pemutusan kritis yang diperlukan menjadi:

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}}$$

(3)

2.3. Reduksi Kron

Eliminasi variabel identik dengan reduksi jaringan karena mengarah pada urutan rangkaian orde pengurangan yang setara dengan eliminasi node pada setiap langkah. Dengan penomoran selektif pada bus sistem, kita dapat menerapkan eliminasi gaussian sehingga dapat mengurangi Y_{bus} (bus admitansi). Matriks koefisien dalam rangkaian persamaan reduced-order kemudian mewakili Y bus untuk jaringan ekuivalen yang hanya berisi bus yang harus dipertahankan. Semua bus lainnya dihilangkan dalam pengertian matematis bahwa tegangan pada bus dan suntikan arusnya tidak tampak secara eksplisit. Pengurangan ukuran seperangkat persamaan tersebut menyebabkan efisiensi perhitungan dan membantu untuk lebih fokus secara langsung pada porsi keseluruhan jaringan yang menjadi kepentingan utama [6]. Eliminasi Y_{bus} (matrik admitansi) :

$$\begin{array}{cccc}
 \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\
 \textcircled{1} & \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 0 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Dari matriks diatas akan mengeliminasi node 1, sehingga matriks admitansi menjadi 3x3.

$$\begin{array}{ccc}
 \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\
 \textcircled{2} & \begin{bmatrix} Y_{22}^{(1)} & Y_{23}^{(1)} & Y_{24}^{(1)} \\ Y_{32}^{(1)} & Y_{33}^{(1)} & Y_{34}^{(1)} \\ Y_{42}^{(1)} & Y_{43}^{(1)} & Y_{44}^{(1)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Untuk menghitung elemen elemen bus yang baru di reduksi dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Y_{jk(new)} = Y_{jk} - \frac{Y_{jp} Y_{pk}}{Y_{pp}}$$

j merupakan kolom, p merupakan jumlah bus, sedangkan pada k merupakan jumlah baris. Dalam menentukan reduksi matriks menggunakan kron reduksi tentu saja harus menentukan bus admitansis sistem awal terlebih dahulu.

BAB 3

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

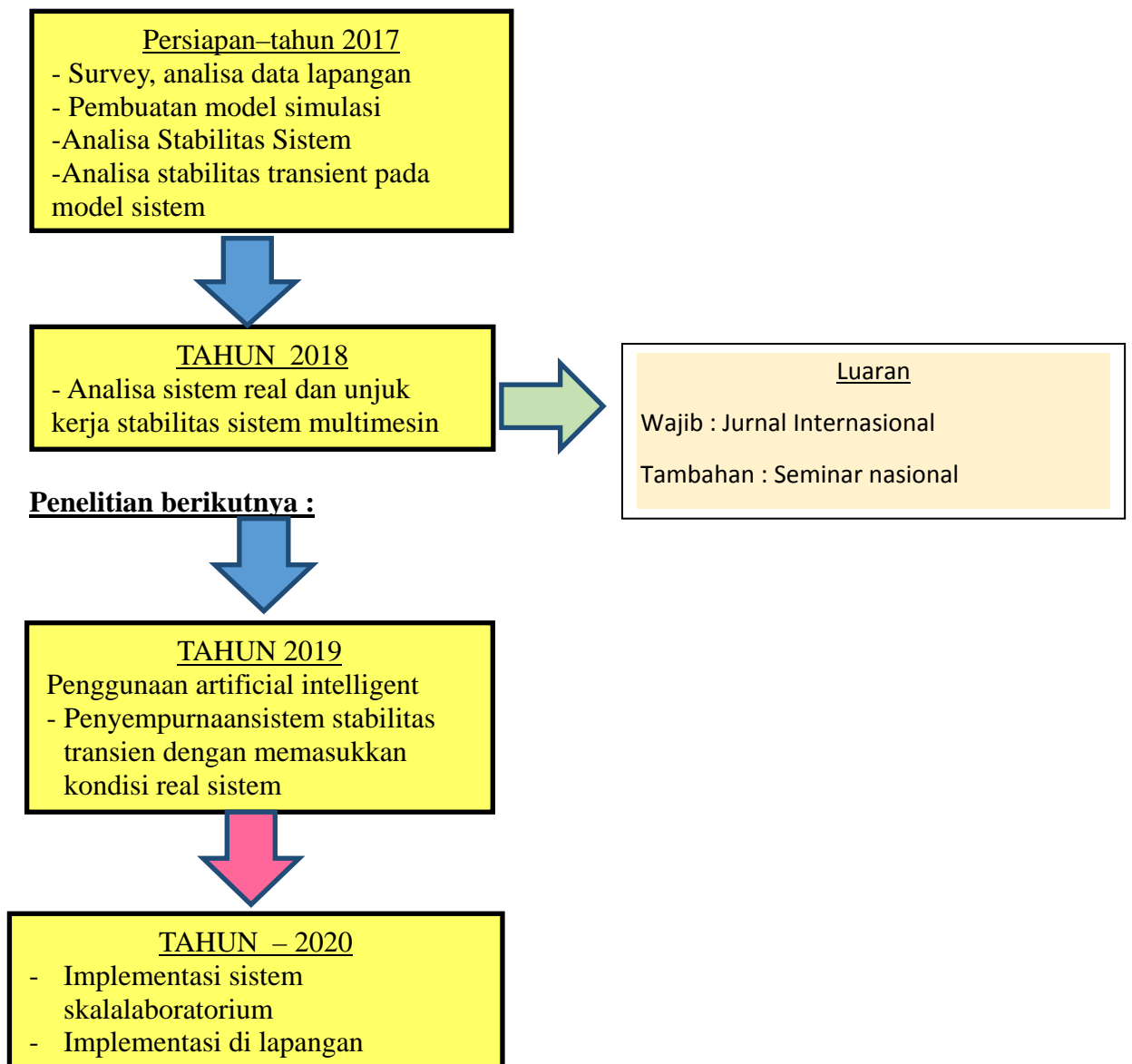
Tujuan penelitian disini yaitu memperoleh assesment stabilitas transient pada sistem tenaga listrik real yaitu pada sistem kelistrikan lombok. Pemilihan sistem kelistrikan lombok berdasarkan pemilihan bahwa sistem baru berkembang dan adanya penambahan pembangkit baru maka diperlukan assesment ilmiah yang dapat digunakan sebagai referensi dan implementasi pada sistem kelistrikan lombok

Manfaat

Belum adanya assesment kestabilan transien yang dilakukan pada sistem kelistrikan lombok menjadi salah satu kekuatan dari penelitian ini. Dengan menggunakan reduksi kron akan memudahkan assesment yang dilakukan apabila ada penambahan sistem baru di sistem kelistrikan yang digunakan. Sehingga hasil dari penelitian ini dapat dijadikan referensi bagi tindakan preventif control atau emergency yang dapat diambil apabila sistem mengalami gangguan. Selain itu dapat digunakan sebagai panduan untuk corectif control dalam tera ulang peralatan sistem

BAB 4 METODOLOGI PENELITIAN

Untuk mencapai apa yang sudah direncanakan pada penelitian ini, maka penelitian ini mengikuti langkah langkah sebagai berikut :



Gambar 3. Road Map Dan Target Penelitian

BAB 5
LUARAN YANG SUDAH DICAPAI

Luaran yang sudah dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Accepted paper dengan judul :

Calculation Analysis of Setting Relay for Study Underfrequency Load Shedding (UFLS) during Disturbance

Dikirim ke : International Journal of Smart Grid and Sustainable Energy Technologies

2. Luaran tambahan :

Seminar Nasional Fortei Regional 7 tahun 2018

Judul paper : Perhitungan Critical Clearing Time untuk Kestabilan Transien Menggunakan Metode Reduksi Kron

Link : <https://ejournal.fortei7.com/index.php/SinarFe7/article/view/45/25>

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kamdar R., Kumar M., Agnihotri G., 2014, “ Transient Stability Analysis and Endhancement of IEEE 9 Bus System”, Department of Electrical Engineering, MANIT, Bhopal, India.
- [2] Kundur, Prabha. 1994. Power System Stability and Control. New York : McGraw-Hill.
- [3] Chiang, H. D., Wu, F., and Varaiya, P.: “A BCU Method for Direct Analysis of Power System Transient Stability”, IEEE Trans. Power Systems, 1994, vol. 9, no. 3.
- [4] Athey, T., Podmore, R., and Virmani, S.: “A Practical Method for Direct Analysis of Transient Stability”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, 1979, vol. PAS-98, pp. 573-584.
- [5] Anderson, P. M., and Fouad, A. A. 1977: “Power System Control and Stability”, vol. 1, Ames, IA: The Iowa State University Press
- [6] Zhang X., Grijalva S., “Multi-Area ATC Evaluation Based on Kron Reduction”, electrical and computer engineering, Georgia Tech, Atlanta, USA.
- [7] Degeneff RC., Moises R., Gutierrez., Vakilian M., 1995 “Nonlinear, Lumped Parameter Transformer Model Reduction Technique”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10. No. 2, April
- [8] Ashraf SM., Rathore B., Chakrabarti S.,”Performance Analysis of Static Network Reduction Methods ” Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Kampur, India.
- [9] Grainger, J, j. And W.D. Stevenson, Jr. 1994. Power System Analysis. USA: McGraw-Hill Inc.
- [10] Kundur P.; Paserba J.; Ajjarapu V.; Andersson G.; Bose A.; Canizares C.; Hatziargyriou N.; Hill D.; Stankovic A.; Taylor C.; Van Cutsem T.; Vittal V.; 2004, “Definition and Classification of Power System Stability”, in IEEE Transaction on power systems, Vol.19, No.2, May.
- [11] IEEE, 1987 “Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants”, IEEE Std C37.106.

- [12] IEEE Power Engineering Society, 2002, "IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses" IEEE Std 1110.
- [13] Saadat hadi, "Power Sytem Alaysis", Milwaekee Schol of engineering, New York san Fransisco, Second edition 511.

LAMPIRAN

1. Bukti acceptance jurnal
2. Paper IJSGSET
3. Paper seminar nasional

IJSGSET

*International Journal of
Smart Grid and Sustainable Energy Technologies*

<http://ejournal.itn.ac.id>; e-mail: editor@ijsgset.itn.ac.id, ISSN: 2580-779X (online); ISSN: 2580-9121 (print)

October 01, 2018

Dr. Irrine Budi Sulistiawati
Department of Electrical Engineering
National Institute of Technology, Malang
Jl. Raya Karanglo, Km. 2, Malang, 65143
INDONESIA

ARTICLE ACCEPTANCE LETTER

Title of the Journal : International Journal of Smart Grid and Sustainable Energy Technologies (IJSGSET)
Article Title : **Calculation Analysis of Setting Relay for Study *Underfrequency Load Shedding (UFLS)* during Disturbance**
Article Reference Number : IJSGSET_03-05_2018
All Authors : Irrine Budi Sulistiawati, Angga Budi Prastyo, Abraham Lomi, and Ardyono Priyadi
Corresponding Author : Irrine Budi Sulistiawati
Article Type : Original Article

Dear Dr. Irrine

Thank you very much for your submission to our journal. We are pleased to inform you that your paper has been reviewed, and accepted for publication. In case you have not submitted copyright form, please send scanned copy shortly through e-mail.

Thank you for making the journal a vehicle for your research interests.

Best Wishes,
Editor-in-Chief

Calculation Analysis of Setting Relay for Study Underfrequency Load Shedding (UFLS) during Disturbance

, Irrine Budi Sulistiawati¹, Angga Budi Prastyo² Abraham Lomi³ Ardyono Priyadi⁴
^{1,2,3}Departement of Electrical Engineering, Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia

⁴ Departement of Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh November ITS, Keputih, Sukolilo 6011, Indonesia.
irrine@lecturer.itn.ac.id

Abstract –Load changes on the system will affect the system stability it self. Load demand that exceeds the generated power will cause the frequency decline. Load shedding used to correct the frequency. This research focus on how to made load shedding schemes with under frequency relay. To analyze, we used simulation with two scenarios which are loss power on line about 128 MVA and generator loss power about 192 MVA that will make frequency decrease as 47.48 Hz and 47.90 respectively. After load shedding scenario is performed, the frequency became increase in range 51,54 Hz and 49 Hz on few seconds.

Key Words: *load shedding, frequency, under frequency relay.*

I. INTRODUCTION

Power system must be able to suply good quality of electrical which is voltage and frequency must on the rules that have been regulation by government [4]. But in real condition, disturbance, short circuit, generator loss, load changes, and switching on transmission system have impact on frequency system. Frequency starts to fall when the power is unable to meet the power demand. Worse condition that is blackout will happen when condition is not resolved. To overcome this problem it can be done with load shedding [1-6]. Load shedding method using under frequency relay to determine base frequency and rate of frequency decrease and this take of with amount of load that has been released to overcome frequency decrease [1].

Using ETAP version 12.6 and IEEE 3 generator 9 bus system will analyze on this research. Respon system will be plotting to make sure that the load shedding can solving the problem.

II. METHODOLOGY

A. Load Shedding

Load shedding is the process to released some loads to compensate loss generation on electrical power system. If load on system reduced, then expected the frequency will return to normal and generator still work without interrupted by overload or frequency decrease. When loads succes to release, generator will work with new stability and the load amount lighter than before. Frequency will be back on normal condition. Load shedding must be done soon after frequency becoming decrease and done step by step. Or we can say that load shedding was gradually removed according with level or frequency decrease [6]. So, some relays like load shedding, under frequency relay installed on distribution network it's mean operator can disconnect line to avoid oveload easily.

B. Definition

a. Manually Load Shedding

This type done by operator, because the frequency decrease not fast. So, with considering that is safe for the system, the load shedding not to execute immediately.

b. Automatically Load Shedding

Automatically load shedding done by the relay without operator intervetion. Relay working when detect the frequency on frequency limit.

c. Frequency Decrease

Calculation of frequency decrease because generator trip to avoid blackout and system unstable

d. Frequency Decrease Rate

Frequency decrease rate it's mean number to count the process to calculate frequency decrease that efect on loads

must be release to get generator free from loading and get setting time for relay, which is

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{Ps}{2GH}\right) \times f_0 \quad (1)$$

Where,

df/dt : Frequency decrease rate

Ps : overload

G : The average of MVA generators

H : The average of generator inertia constanta

F0 : nominal frequency

The average of constanta inertia generators can be calculated by using equation below :

$$H = \frac{H1MVA1+H2MVA2+\dots+HnMVAn}{MVA1+MVA2+\dots+MVAn} \quad (2)$$

Total loads that must be release when frequency getting down can obtain by using equation as below :

$$S_1 = S_{g1} \times \left(\frac{f_0}{f_1}\right) \quad (3)$$

Where

S₁= Generator remain power (MVA)

f₁= Reference frequency

Then

Total loads load that will be released.

$$\Delta S_1 = S_0 - S_1 \quad (4)$$

S₀ = Total Generators Power

ΔS₁ = Total load that will be released

C. Under frequency Relay

Under frequency relay work when frequency system drops until limit frequency setting [5]. When frequency back to normal, relay will stop working. Setting frequency in relay determination by frequency decrease rate and time operation of relay. Frequency decrease rate obtain with equation

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{Ss}{2GH}\right) f_0 \quad (5)$$

Where

$\frac{df}{dt}$ = Frequency Decrease Rate

Ss= Deviation between Load ang Power generator (MVA)

G = Rating Generators (MVA) rating

H = Inertia Constanta (MJ/MVA)

f₀= Nominal Frequency (Hz)

Time on relay must to know when loads released and the frequency while trip detected.

$$t_{pick-up} = \frac{f_0 - f_1}{\frac{df}{dt}} \quad (6)$$

$$t_{trip} = t_{pick-up} + t_{CB} + t_{relay} \quad (7)$$

Where

f₁ is reference frequency load shedding.

After frequency decrease rate and time trip of previous step were obtained, then frequency system when load is released will be :

$$f_{load\ shedding} = f_0 - \left(\frac{df}{dt}\right) \times t_{trip} \quad (8)$$

Where:

f_{load shedding} = Frequency Load Shedding

$\frac{df}{dt}$ = Frequency Decrease Rate

f₀ = Frequency Nominal (Hz)

III. SIMULATION

Simulation load shedding in this research has be done using ETAP 12.6.0. Using IEEE 3 generator 9 bus system, simulation load shedding will be testing

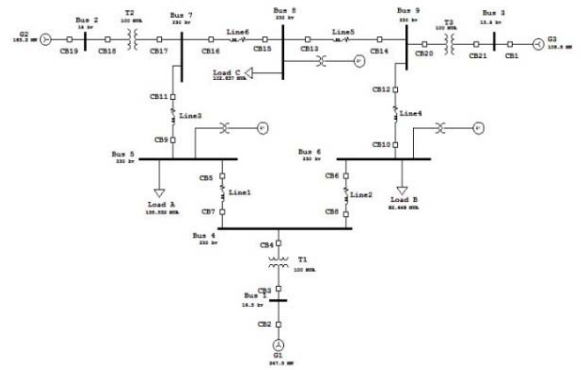


Figure 1. IEEE 3 generator 9 bus system

Table 1. Generator Data

Generator	MW	MVA	Frequency	Inertia Moment
G1	247,5 MW	247,5 MVA	50 HZ	6,632
G2	163,2 MW	192 MVA		2,312
G3	108,8 MW	128 MVA		1,632

From table 1 we get total power 567.5 MVA and average power generator and constant inertia as 189.16 MVA and 4.04 respectively. Total load on system 330.618 MVA on table 2.

Table 2. Load Data

Loads	Power
Load A	135,532 MVA
Load B	92,449 MVA
Load C	102,637 MVA
Total	330,618 MVA

Initial simulation have been done, and we get result as on table 3. On the table we get informationa about frequency decrease rate and time for relay trip. We also get information about total load that has been released when frequency became down.

Table 3. Analysis Result

Interference	Frequency Decline Rate (hz)	Relay trip time (s)	LoadShedding Frequency (hz)		Load that is released (MV A)
			Calculation	Simulation	
Line	3,55	0.7	47,48	47,14	92,84
Generator	1,46	1,5	47,9	44,72	161,96

A. Disturbance Simulation

a. Line Loss (CB 13 , 14 and CB 10 , 12)

In this case, disturbance indicated with CB 13 and CB 14 open, and CB 10 and CB 12 open too. This disturbance will affect lossing power on generator G3

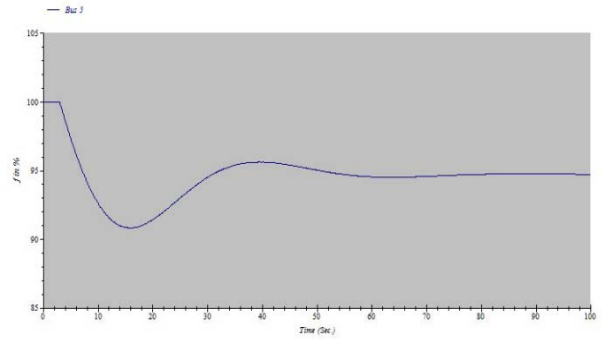


Figure 2. Respond Frequency during of two CB open

From figure 2 we know that frequency decrease when line was open. To bring system back to normal, some loads has to released and process load shedding will made the frequency back to normal.

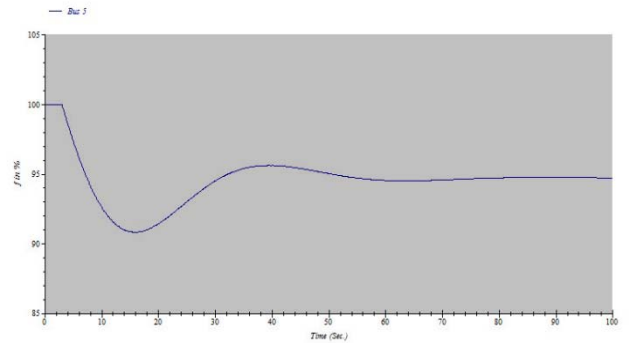


Figure 3. Respond Frequency after Load Shedding

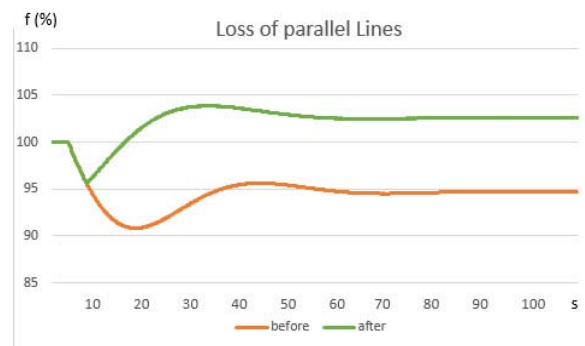


Figure 4. Respond Frequency after and before load shedding

Figure 4 we try to compare frequency system before and after load shedding. Disturbance simulation occurs during the

third to sixth seconds and frequency getting down 47.84 Hz. Load shedding simulations occur the 6.5 seconds and frequency rises to 50 Hz for 13.7 seconds.

b. Generator Loss (G2)

Disturbance in this simulation is done by removing the generator G2. The frequency response of the system can be seen in the figure 4.

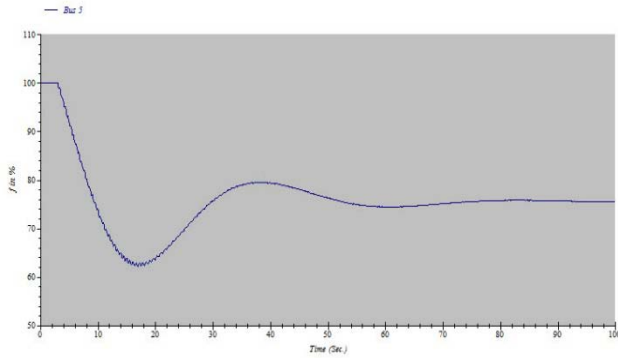


Figure 4. Frequency Response when generator G2 removed from the system

Figure 5 shows the frequency response after load shedding. The system tries to return to normal frequency, but it does not reach an absolute normal state; the frequency oscillates around the normal frequency. This is acceptable as long as the frequency remains within the range.

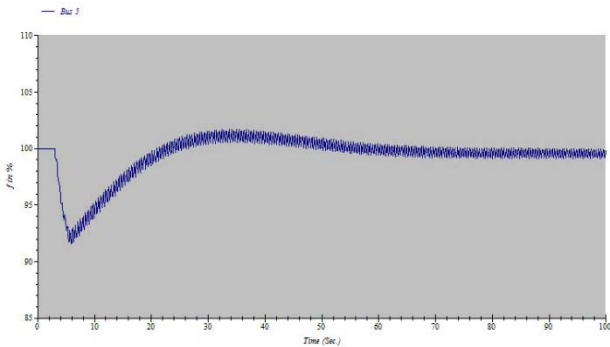


Figure 5. Frequency Response after Load Shedding



Figure 5. Frequency Response before and after Load Shedding

On figure 5 we compare frequency before and after load shedding. Disturbance occurs during third to fifth seconds and frequency becomes 44.72 Hz. And frequency returns to 49.83 Hz when load shedding occurs at 5.6 seconds, and reaches a steady state at 49 Hz.

IV. CONCLUSION

This research shows that load shedding can help frequency return to normal. With two simulation conditions, we can bring back frequency if we remove loads or remove a generator from the system. Simulation shows that frequency stabilizes at 49 Hz and 50 Hz after disturbance.

REFERENCES

- [1] Y.R Omar I.Z, Abidin S. Yunus, H.A. Abdul Rasyid, *Under Frequency Load Shedding (UFLS): Principles and Implementation*, IEEE International Conference on Power and Energy, Dec 1. 2010.
- [2] Nugraheni, Ari, *Load Shedding Simulation by using Frequency Relay at Electricity Power System CNOOC SES LTD*, Final Report, Electrical Engineering, Indonesia University, 2011
- [3] Pradepti Lakra, Mukesh Kirar, *A Comparison of Under Frequency Relay based and Frequency Response Model based Load shedding Scheme*, Electrical Engineering Department, IEEE INDICON, 2015
- [4] Parohon, *Transient Stability Analysis with Generation/Load Shedding at Distribution Network System at Tragi Sibolga 150/20 KV (Case Study at Tragi Sibolga Feeder, North Sumatra)*, Final Report, Electrical Engineering, Diponegoro University, 2009
- [5] H.E Lokay, V.Burtnyk, *Application of Under frequency Relay for Automatic Load Shedding*, IEEE Transaction on Power Apparatus and System.
- [6] Syarif Mahmud, M. Toni Prasetyo, Achmad Solichan, *Load Shedding Simulation with Frequency Relay at Electricity Power System CNOOS SES Ltd North Business*, Muhammadiyah University, Semarang.
- [7] Frida Ceja Gomez, *Setting Under frequency Relay in Power System Via Integer Programming*, department Electrical Engineering, McGill University, 2011

PERHITUNGAN *CRITICAL CLEARING TIME* UNTUK KESTABILAN TRANSIEN MENGUNAKAN METODE REDUKSI KRON

¹*Sunnu Wahyu Setiawan*, ²*Irrine Budi Sulistiawati*

Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Malang

Raya Karanglo Km 2 Malang

[¹*Sunnuwahyusetiawan@gmail.com*](mailto:Sunnuwahyusetiawan@gmail.com) [²*Irrine@lecturer.itn.ac.id*](mailto:Irrine@lecturer.itn.ac.id)

Abstrak— Analisis kestabilan transien berperan penting untuk keamanan dan keandalan pada operasi sistem tenaga listrik. Kestabilan transien erat kaitannya dengan *critical clearing time* karena pada waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*) dapat dilihat bagaimana sistem kembali pada keadaan stabil atau tidak stabil setelah mengalami gangguan. Tahapan dalam melakukan analisis kestabilan transien dibutuhkan proses reduksi matrik. Untuk tahapan tersebut agar memudahkan analisis kestabilan transien digunakan metode reduksi kron dalam mereduksi matrik pada sistem yang akan dianalisis. Simulasi dilakukan pada sistem multi-machine Fouad Anderson 3 generator 9 bus dengan gangguan yang terjadi pada bus 5 dan yang memutuskan gangguan yaitu pada saluran 5-7. Dari hasil simulasi menunjukkan metode reduksi kron dapat mereduksi matrik admitansi pada sistem dan menunjukkan nilai susceptansi agar memudahkan dalam melakukan perhitungan *critical clearing time*. Didapatkan nilai *critical clearing time* pada bus 5 adalah 0.569 sec.

Kata Kunci—*Kestabilan transien, Critical Clearing Time, Reduksi Kron*

Abstrac— The analysis of transient stability plays an important role for the safety and reliability of electric power system operation. The transient stability is closely related to critical clearing time because at the time of critical clearing time it can be seen how the system returns to a stable or unstable state after an interruption. Stages in performing transient stability analysis requires matrix reduction process. For these stages to facilitate the analysis of transient stability then used kron reduction method in reducing the matrix on the system to be analyzed. The simulation was carried out on a multi-machine Fouad Anderson 3 generator 9 bus system with interference that occurs in bus 5 and the one that clears the interruption was on bus 5-7. From the simulation results showed that the kron reduction method can reduce the admittance matrix in the system and showed the susceptance value to make it easier to perform critical clearing time calculation. The critical clearing time of bus 5 is 0.569 sec.

Keywords- *Transien Stability, Critical Clearing Time, Kron Reduction*

I. Pendahuluan

Analisa stabilitas sistem tenaga listrik telah diakui sebagai hal yang penting dalam mengatasi masalah pengoperasian system yang aman [1]. Banyak pemadaman listrik yang disebabkan oleh ketidak stabilan sistem tenaga mengilustrasikan pentingnya kestabilan sistem. Secara historis, ketidakstabilan transien telah menjadi masalah stabilitas yang dominan pada kebanyakan sistem, dan telah menjadi perhatian sebagian besar industry tentang stabilitas sistem [2].

Sistem tenaga listrik pada umumnya terhubung interkoneksi satu dengan yang lainnya. Hal ini mengakibatkan sistem tidak bisa bebas dari gangguan. Usaha untuk mengamankan sistem dari gangguan adalah dengan pemasangan rele pengaman pada sistem. Ketika timbul gangguan, rele akan mendeteksi gangguan dan mentrigger *circuit breaker (cb)* untuk terbuka. Akan tetapi rele pengaman ini tidak menjamin sistem aman dari gangguan yang sudah terjadi dan sistem dapat kembali ke kondisi stabilnya [3]. Tahapan dalam melakukan analisis kestabilan transien dibutuhkan reduksi matrik jaringan untuk mempermudah perhitungan dalam menentukan parameter parameter yang dapat digunakan dalam perhitungan *critical clearing time*.

Analisa kestabilan transien pada sistem tenaga listrik erat kaitannya dengan waktu pemutusan kritis atau yang dikenal dengan *critical clearing time* (waktu pemutusan kritis). Nilai *critical clering time* digunakan untuk acuan di dalam menentukan setting rele pengaman pada sebuah sistem. Ketika gangguan terjadi, apabila *circuit breaker* berhasil memutus gangguan sebelum *critical clearing time* bekerja, maka sistem akan kembali stabil. Sebaliknya, ketika *circuit breaker* tidak berhasil melepas

gangguan sehingga critical clearing time bekerja, maka sistem akan berada pada kondisi tidak stabil.

Reduksi kron banyak digunakan sebagai metode penyederhanaan untuk sistem tenaga linear dan non linear[4][5]. Metode ini berfokus pada beberapa bus yang dipilih, sehingga perlu dilakukan untuk melakukan penomoran bus sistem dengan selektif agar dapat diketahui bus yang ingin dipertahankan dan bus yang ingin dieliminasi [6].

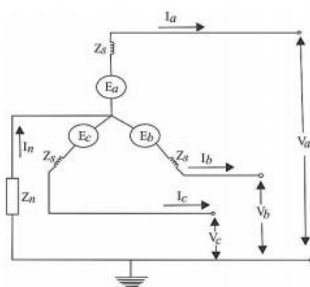
II. Metode Penelitian

1. Kestabilan Transien

kestabilan transien adalah suatu kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkron ketika sistem mengalami gangguan transien. Gangguan transien merupakan gangguan besar yang bersifat tiba-tiba selama periode satu ayunan pertama. Ketabilan transien terjadi saat pegatur tegangan otomatis (AVR) dan pengatur frekuensi (governor) belum bekerja. Sistem dikatakan stabil ketika adanya keseimbangan antara daya mekanik pada *prime mover* dengan daya elektrik yang disalurkan ke beban. Apabila kondisi sistem yang tidak stabil tidak dipulihkan dengan segera, maka percepatan dan perlambatan putaran motor akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem. Apabila sistem mengalami kelebihan daya elektrik maka akan terjadi perlambatan pada rotor generator, hal ini disebabkan semakin terbebani generator. [7]

2. Gangguan 3 Fasa Simetris

Tipe gangguan ini didefinisikan sebagai gangguan hubung singkat tiga fasa, dimana gangguan itu jarang terjadi, tetapi merupakan tipe gangguan yang paling parah karena pada setaip saluran arus gangguan sama besarnya. [8]



Gambar 1. Sumber dan impedansi 3 fasa seimbang

Mesin sinkron membangkitkan tegangan internal tiga fasa dan direpresentasikan sebagai kelompok fasor urutan positif berikut :

$$E_{abc} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$a = 1 \angle 120^\circ = e^{j 120^\circ} \quad a^2 = 1 \angle 240^\circ = e^{j 240^\circ}$$

Mesin menyuplai beban seimbang tiga fasa. Penerapan hukum *kirchoff* untuk tegangan pada setiap fasa menghasilkan :

$$\begin{aligned} V_a &= E_a - Z_s I_a - Z_n I_n \\ V_b &= E_b - Z_s I_b - Z_n I_n \\ V_c &= E_c - Z_s I_c - Z_n I_n \end{aligned} \quad (2)$$

Substitusi untuk $I_n = I_a + I_b + I_c$ dan penulisan persamaan (2) dalam bentuk matriks adalah :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_{a0} &= 0 - Z_0 I_{a0} \\ V_{a1} &= E_a - Z_1 I_{a1} \\ V_{a2} &= 0 - Z_2 I_{a2} \end{aligned} \quad (4)$$

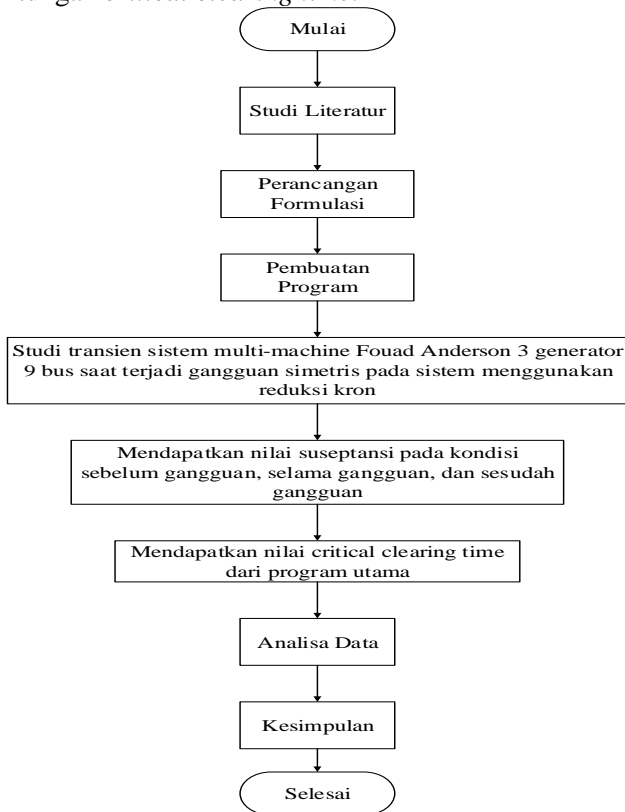
Maka arus saluran :

$$I_a = \frac{E_a}{Z_n} \quad (5)$$

3. Critical Clearing Time

Critical clearing time atau waktu pemutusan kritis merupakan waktu yang menentukan apakah sistem dapat kembali stabil atau tidak setelah mengalami gangguan. Jika suatu sistem tenaga listrik mengalami gangguan besar maupun gangguan kecil maka area yang terjadi gangguan harus dilakukan pengisolasian dengan cara pemutusan gangguan melalui *circuit breaker* (cb) saluran maupun pelepasan generator dari *circuit breaker* generator. Pemutusan yang dilakukan harus kurang dari waktu pemutusan kritis untuk memastikan sistem berada pada kondisi stabil setelah mengalami gangguan. [9] Studi transien yang dilakukan pada *multi-machine* Fouad Anderson 3 generator 9 bus dilakukan dengan memberi gangguan pada sistem, simulasi gangguan 3 fasa menggunakan metode reduksi kron untuk menampilkan nilai suseptansi pada kondisi sebelum, selama, dan setelah

gangguan untuk memudahkan dalam melakukan perhitungan *critical clearing time*.



Gambar 2. Diagram alir perhitungan *critical clearing time*

4. Reduksi Kron [6]

Eliminasi variabel identik dengan reduksi jaringan karena mengarah pada urutan rangkaian orde pengurangan yang setara dengan eliminasi node pada setiap langkah. Dengan penomoran selektif pada bus sistem, kita dapat menerapkan eliminasi gaussian sehingga dapat mengurangi Y_{bus} (bus admitansi). Matriks koefisien dalam rangkaian persamaan *reduced-order* kemudian mewakili Y_{bus} untuk jaringan ekuivalen yang hanya berisi bus yang harus dipertahankan. Semua bus lainnya dihilangkan dalam pengertian matematis bahwa tegangan pada bus dan suntikan arusnya tidak tampak secara eksplisit. Pengurangan ukuran seperangkat persamaan tersebut menyebabkan efisiensi perhitungan dan membantu untuk lebih fokus secara langsung pada porsi keseluruhan jaringan yang menjadi kepentingan utama[4]. Berikut adalah contoh dari eliminasi Y_{bus} (matrik admitansi) :

$$\begin{matrix} \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\ \textcircled{1} & \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 0 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Gambar 3. matriks admitansi sistem[4]

Dari matriks diatas akan mengeliminasi node 1, sehingga matriks admitansi menjadi 3×3 .

$$\begin{matrix} \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\ \textcircled{2} & \begin{bmatrix} Y_{22}^{(1)} & Y_{23}^{(1)} & Y_{24}^{(1)} \\ Y_{32}^{(1)} & Y_{33}^{(1)} & Y_{34}^{(1)} \\ Y_{42}^{(1)} & Y_{43}^{(1)} & Y_{44}^{(1)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Gambar 4. matriks admitansi setelah direduksi[4]

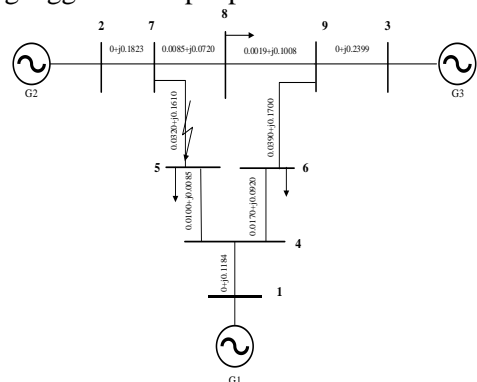
Untuk menghitung elemen elemen bus yang baru di reduksi dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Y_{jk(new)} = Y_{jk} - \frac{Y_{jp}Y_{pk}}{Y_{pp}} \quad (6)$$

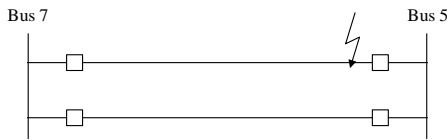
j merupakan kolom, p merupakan jumlah bus, sedangkan pada k merupakan jumlah baris. Dalam menentukan reduksi matriks menggunakan kron reduksi tentu saja harus menentukan bus admitansis sistem awal terlebih dahulu.

III. Hasil dan Pembahasan

Data yang digunakan pada penelitian yang dilakukan adalah sistem *multi-machine* Fouad Anderson 3 generator 9 bus yang ditunjukkan pada gambar 5. Dengan gangguan terjadi pada bus 5 dan saluran yang terbuka untuk memutus gangguan terdapat pada bus 5 dan bus 7.



Gambar 5. Single Line diagram IEEE 3 generator 9 bus dan gangguan berada pada bus 5



Gambar 6. Saluran pada bus 5 dan 7

Dari Simulasi yang dilakukan didapatkan hasil berikut

1. Hasil perhitungan nilai suseptansi berdasarkan matrik admitansi pada sistem pada kondisi

$X_1 =$

17.3611	0	0	17.3611	0	0	0	0	0	0
0	16.0000	0	0	0	0	0	16.0000	0	0
0	0	17.0648	0	0	0	0	0	0	17.0648
17.3611	0	0	39.4478	11.6841	10.6886	0	0	0	0
0	0	0	11.6841	17.5252	0	6.0920	0	0	0
0	0	0	10.6886	0	16.1657	0	0	0	5.7334
0	16.0000	0	0	6.0920	0	35.5564	13.7931	0	0
0	0	0	0	0	0	13.7931	23.4676	9.8522	0
0	0	17.0648	0	0	5.7334	0	9.8522	32.2461	0

Gambar 7. Nilai Suseptansi jaringan pada kondisi sebelum gangguan

$X_2 =$

17.3611	0	0	17.3611	0	0	0	0	0	0
0	16.0000	0	0	0	16.0000	0	0	0	0
0	0	17.0648	0	0	0	0	0	17.0648	0
17.3611	0	0	31.6580	10.6886	4.0616	0	0	0	0
0	0	0	10.6886	16.1657	0	0	0	5.7334	0
0	16.0000	0	4.0616	0	33.4701	13.7931	0	0	0
0	0	0	0	0	13.7931	23.4676	9.8522	0	0
0	0	17.0648	0	5.7334	0	9.8522	32.2461	0	0

Gambar 8. Nilai Suseptansi jaringan pada kondisi selama gangguan

$X_3 =$

17.3611	0	0	17.3611	0	0	0	0	0	0
0	16.0000	0	0	0	16.0000	0	0	0	0
0	0	17.0648	0	0	0	0	0	17.0648	0
17.3611	0	0	32.2380	10.6886	0	0	0	0	0
0	0	0	10.6886	16.1657	0	0	0	5.7334	0
0	16.0000	0	0	0	36.9733	13.7931	0	0	0
0	0	0	0	0	13.7931	23.4676	9.8522	0	0
0	0	17.0648	0	5.7334	0	9.8522	32.2461	0	0

Gambar 9. Nilai Suseptansi jaringan pada kondisi setelah gangguan

Pada kondisi awal sistem sebelum gangguan terdiri dari 9 bus sistem. Untuk melakukan simulasi gangguan 3 fasa menggunakan reduksi kron dengan menghapus salah satu bus beban dengan menggunakan persamaan (6)

sebelum gangguan, selama gangguan, dan sesudah gangguan

Simulasi yang dilakukan adalah menentukan nilai suseptansi berdasarkan matrik admitansi pada sistem saat kondisi sebelum gangguan, selama gangguan, dan sesudah gangguan. Berikut pada gambar 7, gambar 8, dan gambar 9 menunjukkan nilai suseptansi pada masing-masing kondisi.

sehingga bus yang terganggu dieliminasi yang tadinya bus sistem ada 9 karena dieliminasi menjadi 8 bus dan membentuk matrik admitansi baru.

2. Nilai *critical clearing time* pada bus 5 (mengalami gangguan).

Untuk menentukan nilai *critical clearing time* tentu tidak hanya membutuhkan nilai suseptansi pada berbagai macam kondisi, namun membutuhkan nilai pada tegangan pada bus sistem, generator output, momen inersia yang sudah didapatkan pada simulasi aliran daya. Setelah semua data yang di butuhkan telah didapatkan maka nilai tersebut di masukan pada program utama yang telah dirancang menggunakan software MATLAB. Berikut adalah hasil simulasi perhitungan nilai *critical clearing time*.

```
>> CCT
Generator output power in p.u. Pm = 1.6300
Generator e.m.f. in p.u. E = 1.0624
bus-bar voltage in p.u. V = 0.9937
Reactance before Fault in p.u. X1 = 17.5252
Reactance during Fault in p.u. X2 = 33.4701
Reactance after Fault in p.u. X3 = 36.9733
Momen Inertia = 6.4
Critical clearing time = 0.569 sec.
```

Gambar 10. Nilai cct pada program utama yang dibuat pada software MATLAB.

iv. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa perhitungan *critical clearing time* dengan menggunakan metode reduksi kron mampu menunjukkan waktu pemutusan kritis = 0.569 sec pada bus 5 yang mengalami gangguan dan saluran yang memutus gangguan tersebut terdapat pada bus 5 dan bus 7.

v. Daftar Pustaka

[1] Kamdar R., Kumar M., Agnihotri G., “ Transient Stability Analysis and Endhancement of IEEE 9 Bus System”, Department of Electrical Engineering, MANIT, Bhopal, India, 2014.
[2] Kundur, Prabha. 1994. Power System Stability and Control. New York : McGraw- Hill.
[3] Sulistiawati, IB., Priyadi, A., Hafidz I., Ashari MI., “Analisa Critical Clearing Time Pada Kestabilan Transien Sistem Tenaga Listrik Akibat Kondisi Gangguan Tidak Seimbang ” Seminar Nasional Inovasi Dan Aplikasi Teknologi Di Industri, Malang, 2017.

[4] Degeneff RC., Moises R., Gutierrez., Vakilian M., “Nonlinear, Lumped Parameter Transformer Model Reduction Technique”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10. No. 2, April 1995.
[5] Ashraf SM., Rathore B., Chakrabarti S.,”Performance Analysis of Static Network Reduction Methods ” Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Kampur, India.
[6] Grainger, J, j. And W.D. Stevenson, Jr. 1994. Power System Analysis. USA: McGraw-Hill Inc.
[7] IEEE, “Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants”, 1987. IEEE Std C37.106-1987.
[8] Saadat hadi, “Power Sytem Alaysis”, Milwaekee Schol of engineering, New York san Fransisco, Second edition 511.
[9] Eviningsih R.P., Priyadi A., Soedibjo, “Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) Berbasis *Trajectory* Kritis Menggunakan Persamaan Simultan Pada Sistem Yang Terhubung dengan Smart Grid”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.