

Analisa Kestabilan Dinamik Sistem Akibat Injeksi PLTP Ulumbu (Ulumbu Energy Dynamic) Pada Sistem Kelistrikan Manggarai

Suryadi Amra Putra
14.12.005
putrasuryadiamra@gmail.com

Dr. Irrine Budi Sulistiawati, ST.,MT.
Pembimbing

Abstract — Adanya injeksi daya baru pada sistem dapat mempengaruhi kestabilan sistem yang sudah ada sebelumnya, oleh karena itu perlu dilakukan analisa kestabilan untuk mengetahui kestabilan sistem sebelum dan setelah injeksi daya baru dan juga untuk mengetahui performansi sistem setelah terjadi gangguan dengan memperhatikan perubahan besar yang terjadi pada tegangan, frekuensi dan sudut rotor. Hasil analisa dinamik sistem menunjukkan bahwa injeksi daya PLTP Ulumbu pada sistem kelistrikan Manggarai dapat membantu pasokan daya pada sistem dan memperbaiki profil tegangan pada bus 10 (20 kv) dengan memperhatikan perubahan tegangan sebesar 0.9831 pu dan frekuensi 50 Hz berada pada tegangan nominalnya dari kondisi normal. Pada saat terjadi gangguan 3 phasa pada deti ke 1 – 1.3 kestabilan tegangan mengalami penurunan tegangan sampai 0.8085 pu dan kestabilan frekuensi mengalami kenaikan sampai 50.6 Hz pada bus 10. Sedangkan sudut rotor mengalami perubahan sudut dan beroperasi pada titik kerja barunya. Setelah diinjeksikan PLTP Ulumbu 10 MW pada detik ke 2, kestabilan tegangan mengalami kenaikan sampai 0.9541 pu, kestabilan frekuensi mengalami penurunan dari kondisi saat terjadi gangguan sampai 50.1 Hz dan sudut rotor mengalami perubahan sudut beroperasi pada titik kerja barunya dan akan stabil dalam jangka waktu yang cukup lama pada titik kinerja barunya.

Kata Kunci — *Kestabilan dinamik sistem, Injeksi daya, Kestabilan tegangan, Kestabilan frekuensi, Kestabilan sudut rotor.*

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kestabilan sistem tenaga listrik yang sudah ada mendorong munculnya berbagai riset untuk mengoptimalkan sistem yang sudah ada. Analisa kestabilan tegangan dengan penambahan daya baru untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat. Berbagai studi yang telah di pelajari tentang injeksi daya banyak dilakukan. Tapi kebanyakan studi yang dilakukan pada sistem atau saluran yang sudah ada.

Penelitian ini difokuskan pada injeksi daya pada pusat pembangkit dengan melakukan penambahan pembangkit baru pada sistem yang sudah ada. Perubahan tegangan, frekuensi dan sudut rotor akan dibahas pada penelitian ini dengan Sistem Kelistrikan Manggarai sebagai studi yang akan disimulasikan untuk menguji performansi sistem yang sudah ada.

B. Rumusan Masalah

Berdasar latar belakang dari masalah diatas dapat dirumuskan masalah – masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana kestabilan sistem kelistrikan sebelum dan sesudah injeksi daya baru?
2. Bagaimana perubahan besar tegangan, frekuensi, dan sudut rotor?

C. Tujuan

Menganalisis kestabilan sistem kelistrikan sebelum dan sesudah injeksi daya baru dengan memperhatikan perubahan besar sudut rotor, tegangan, dan frekuensi ketika terjadi gangguan 3 phasa pada sistem.

D. Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas pada penelitian ini tidak meluas, maka ruang lingkup pembahasan penelitian ini dibatasi dengan batasan adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis kestabilan dinamik sistem.
2. Metode yang digunakan dalam aliran daya adalah *Newton-Raphson*.
3. *Software* yang digunakan untuk analisis stabilitas sistem adalah *Software ETAP Power station*. Dengan mode *Load Flow* dan *Transient Stability Analysis*.
4. Jenis gangguan 3 fasa

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Aliran Daya

Studi Aliran daya adalah studi yang sangat penting dalam merencanakan dan membangun sebuah sistem listrik untuk masa depan seperti halnya dalam menentukan operasi terbaik dari sistem yang ada. Studi aliran daya dapat memberikan informasi berupa besaran tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif dan faktor daya yang ada pada sistem. Berdasarkan informasi tersebut dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkitan ataupun pembebanan.

B. Stabilitas Sistem Daya

Stabilitas sistem daya adalah kemampuan dari sistem itu untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan. Ketidak-stabilan suatu sistem akan menyebabkan kehilangan sinkron dari sistem itu. Maka masalah stabilitas berkaitan dengan penilaian mesin sinkron setelah terjadi gangguan. Masalah stabilitas secara umum dibagi dalam dua kategori utama yaitu stabilitas *steady state* (keadaan tunak) dan stabilitas *transient*. Perluasan dari stabilitas *steady state* dikenal dengan stabilitas dinamik.

C. Stabilitas Dinamik Sistem

Stabilitas Dinamik adalah kemampuan dari sistem itu untuk kembali bekerja secara normal yang difokuskan setelah terjadi gangguan dengan memasukkan komponen kontrol otomatis untuk melihat performansi sistem. Adapun yang dianalisis pada kestabilan dinamik sistem adalah kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi dan kestabilan sudut rotor.

1) Kestabilan Tegangan

Stabilitas tegangan mengacu pada kemampuan suatu sistem untuk menjaga tegangan tetap stabil pada kisaran nominalnya di setiap bus sebelum dan setelah mengalami gangguan. Kestidakstabilan dapat mengakibatkan penurunan atau kenaikan tegangan di bus. Kestidakstabilan tegangan dapat mengakibatkan hilangnya integritas sistem seperti hilangnya beban atau terputusnya saluran transmisi di daerah tegangan yang mencapai nilai rendah. Faktor utama yang menyebabkannya ketidakstabilan tegangan yaitu ketika aliran daya aktif dan daya reaktif yang melewati reaktansi induktif pada saluran transmisi.

2) Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi mengacu pada kemampuan sistem untuk mempertahankan nilai frekuensi tetap stabil dalam kisaran nominalnya setelah terjadi gangguan besar pada sistem sehingga mengakibatkan ketidakseimbangan yang signifikan antara generator dan beban. Hal itu tergantung pada kemampuan sistem untuk mengembalikan keseimbangan generator dan beban. Gangguan sistem yang besar biasanya mengakibatkan perubahan besar terhadap frekuensi, tegangan, aliran daya, dan variabel sistem lainnya. Umumnya, masalah stabilitas frekuensi berkaitan dengan ketidakmampuan tanggap peralatan, koordinasi yang buruk dalam kontrol.

3) Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan Sudut Rotor dalam sebuah mesin sinkron mengacu pada kemampuan sebuah mesin sinkron yang saling berhubungan untuk tetap sinkron setelah mengalami gangguan. Ketidakstabilan sudut rotor dapat mengakibatkan peningkatan sudut ayunan beberapa generator sehingga kehilangan sinkron dengan generator lain. Pengerak utama memberikan sebuah torsi mekanis (T_m) pada poros mesin dan mesin menghasilkan suatu torsi elektromagnetik (T_e). Pada saat terjadi gangguan, torsi mekanis lebih besar dari torsi elektromagnetik, dan menghasilkan torsi percepatan (T_a). Persamaannya sebagai berikut:

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

Dimana:

T_a = Torsi percepatan

T_m = Torsi mekanis

T_e = Torsi elektromagnetik

Adanya perubahan torsi elektromagnetik (T_e) dari mesin sinkron akibat gangguan dapat diselesaikan dengan 2 cara, yaitu :

- Sinkronisasi komponen torsi, dalam fasa dengan sudut rotor deviasi.

- Damping komponen torsi, dalam fasa dengan kecepatan deviasi.
- Kestabilan sistem tergantung pada kedua komponen torsi untuk masing-masing mesin sinkron .

III. METODOLOGI PENELITIAN

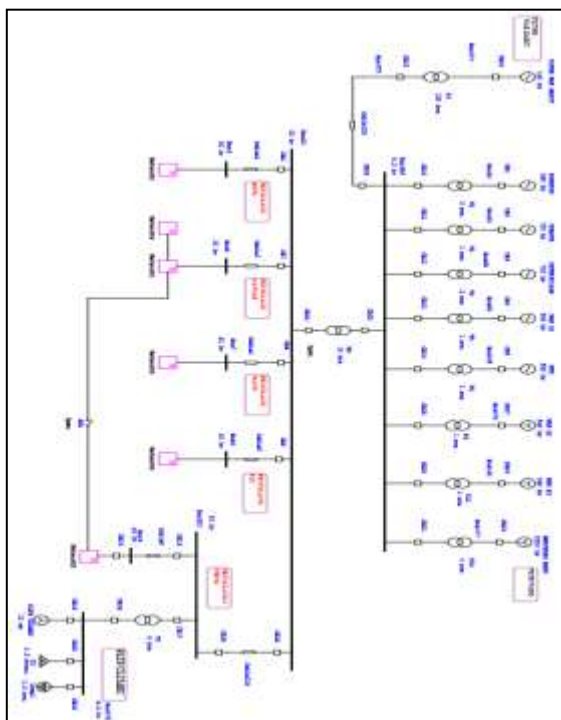
Pengujian dan penelitian ini dimulai dengan survei data di PT. PLN (Persero) Wilayah Manggarai. Simulasi kestabilan dinamik pada sistem kelistrikan Manggarai tersebut menggunakan *software ETAP Power Station*.

Untuk survei data, PT. PLN (Persero) Wilayah Manggarai mengarahkan pengambilan data yang dibutuhkan seperti data generator, transformator, saluran dan beban.

A. Pemodelan Simulasi

Setelah mendapatkan data sistem, langkah selanjutnya adalah membuat program untuk mensimulasikan sistem tersebut dengan menggunakan *Software ETAP Power Station*. Untuk sistem *example IEEE 9 Bus* kita tidak perlu membuat program, karna program tersebut adalah *example* dari *Software ETAP* itu sendiri. Selanjutnya menggambar single line diagram, kemudian menginput data hasil survey seperti yang ditunjukkan Gambar 3.1.

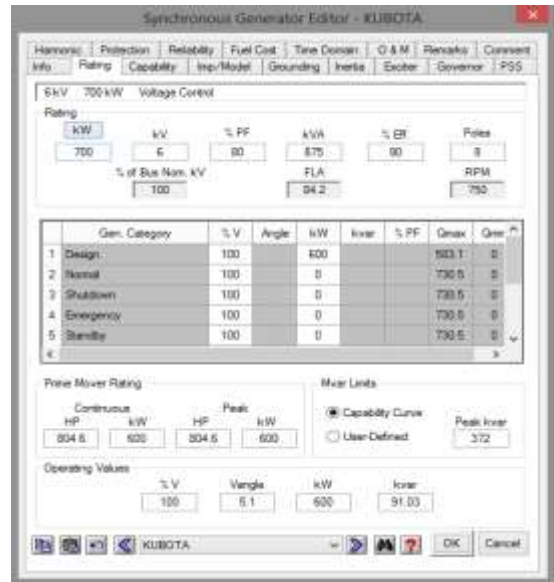
3.1 Single Line Diagram Sistem Kelistrikan Manggarai



Gambar 3.1 Single Diagram Sistem Kelistrikan PT. PLN Rayon Manggarai

B. Input Data Penelitian

Setelah menggambar single line diagram , maka selanjutnya dilakukan penginputan data – data seperti data pembangkit , data transformator , data saluran, dan data beban yang telah diperoleh dari PT. PLN (Persero) Rayon Manggarai. Gambar -gambar berikut menunjuka inputan setiap data.



Gambar 3.2 Tampilan Input Data Pembangkit

Gambar 3.2 menunjukkan tampilan inputan rating dari pembangkit dengan data – data yang diinputkan diantaranya daya, tegangan nominal, faktor daya rpm, efisiensi dan jumlah kutub dari generator.



Gambar 3.3 Tampilan Input Data Transformator

Gambar 3.3 menunjukkan tampilan inputan rating transformator. Seperti data tegangan primer dan skunder dan daya dari transformator tersebut.



Gambar 3.4 Tampilan Input Data Saluran

Gambar 3.4 menunjukkan tampilan inputan data saluran dalam mode info data. Data – data yang diinputkan data seperti data jenis saluran, panjang saluran, ID dan lain sebagainya.



Gambar 3.5 Tampilan Input Data Beban

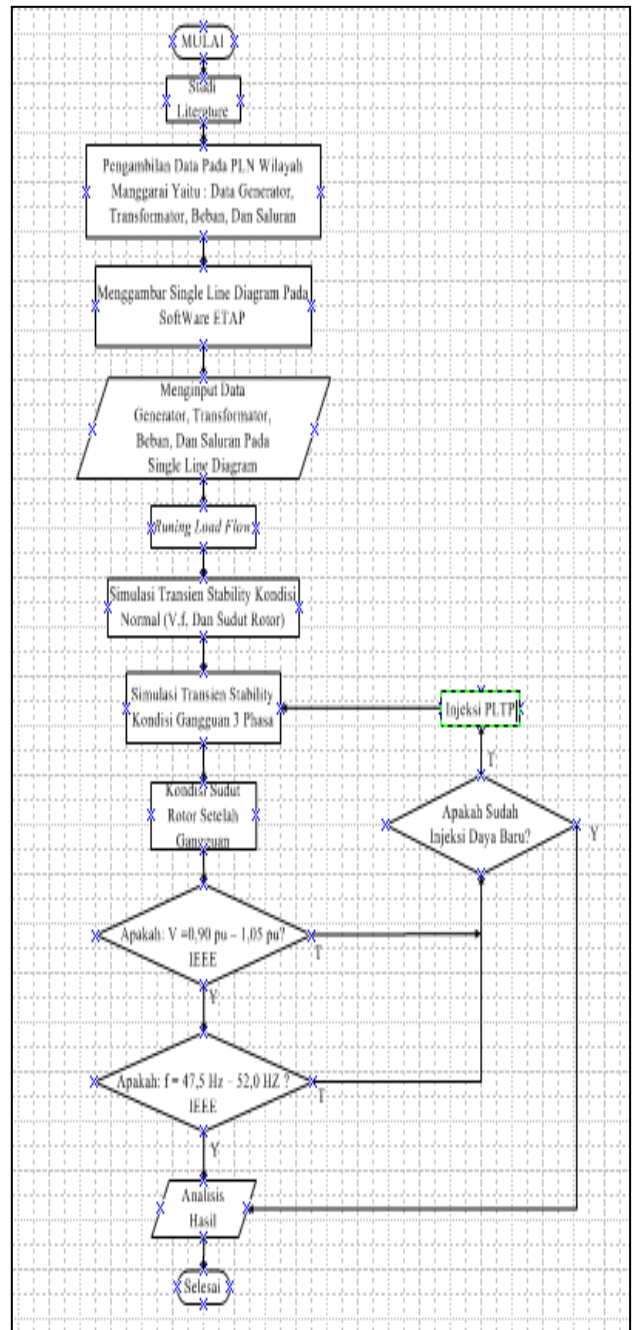
Gambar 3.5 merupakan tampilan dari mode nameplate dari data beabn. Data – data yang diinputkan seperti rating daya maupun tegangan nominalnya.

C. Software ETAP Power Station

Software ETAP merupakan aplikasi yang berfungsi untuk melakukan analisis yang bersangkutan dengan sistem tenaga listrik. Program ini mampu menangani sistem dengan lebih dari 2000 Bus, 2000 saluran, dan 500 buah transformator serta terdapat beberapa Study Case yang mendukung simulasi. Aplikasi ini dapat mengembangkan sistem yang lebih besar asalkan mempunyai data yang lebih

lengkap. Simulasi kestabilan sistem dapat dilakukan menggunakan aplikasi ini. Fitur yang dapat digunakan mensimulasikan kestabilan sistem adalah *Transient Stability Analysis*.

D. Diagram Alir



Gambar 3.6 Diagram Alir

IV. ANALISA HASIL

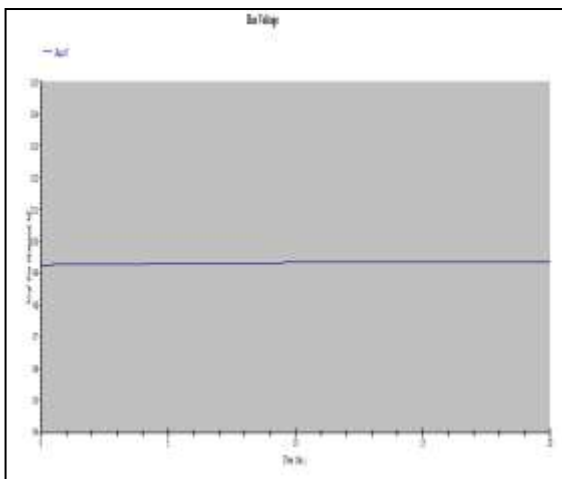
Pada sistem kelistrikan PT. PLN (Persero) Wilayah Manggarai akan dilakukan simulasi kestabilan dinamik pada sistem kelistrikan manggarai, maka akan dilakukan analisa terhadap tiga kondisi yaitu:

- A. Kondisi Normal (Steady state)
- B. Kondisi Gangguan 3 phasa
- C. Kondisi Setelah Injeksi

Dimana gangguan yang terjadi adalah gangguan 3 phasa pada bus 1 penyulang Iteng akan disimulasikan pada detik ke 1 sampai detik 1.3 setelah itu akan diinjeksikan PLTP Ulumbu pada detik ke 2 di bus 1 penyulang Iteng dengan memperhatikan perubahan tegangan, frekuensi dan sudut rotor. Bus yang akan ditinjau tegangan dan frekuensinya adalah bus 10 (20 kV). Sedangkan generator yang akan ditinjau sudut rotornya adalah PLTMH Wea Garit, Komatsu, Kubota, Caterpillar, Man 1, Mtu, Man 2, Man 3, Mercedes Benz dan PLTP Ulumbu.

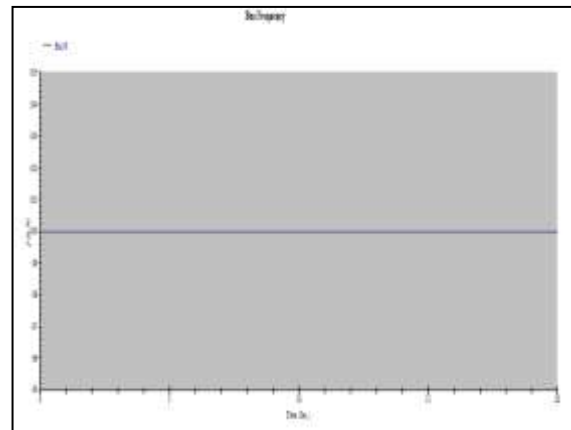
A. Kondisi Normal (Steady State)

Hasil simulasi yang akan ditunjukkan pada gambar 4.1, gambar 4.2 dan gambar 4.3 adalah kondisi sebelum terjadi gangguan 3 phasa.



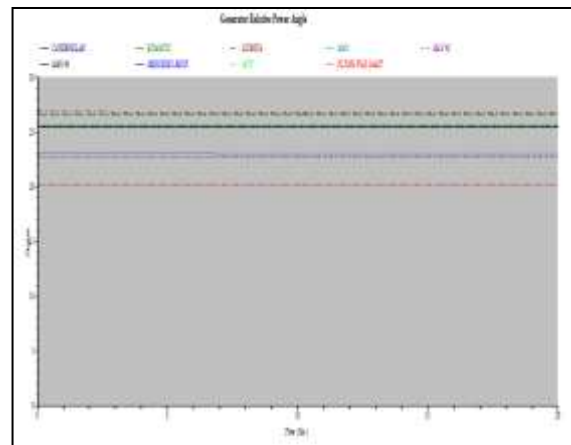
Gambar 4.1 Kestabilan Tegangan Kondisi Normal

Pada gambar 4.1 adalah hasil simulasi kestabilan tegangan kondisi normal pada bus 10 sebesar 0.9831 pu berdasarkan tegangan nominalnya.



4.2 Gambar Kestabilan Frekuensi Kondisi Normal

Pada gambar 4.2 adalah hasil simulasi kestabilan frekuensi kondisi normal pada bus 10 sebesar 50 Hz.



4.3 Gambar Kestabilan Sudut Rotor Kondisi Normal

Pada gambar 4.3 adalah hasil simulasi kestabilan sudut rotor PLTMH Wea Garit, Komatsu, Kubota, Caterpillar, Man 1, Mtu, Man 2, Man 3, Mercedes Benz dan PLTP Ulumbu.

Berdasarkan nilai kestabilan tegangan dan frekuensi akan ditampilkan pada tabel 4.1 sedangkan nilai kestabilan sudut rotor akan ditampilkan dalam tabel 4.2

Tabel 4.1 Kestabilan Tegangan dan Frekuensi Kondisi Normal

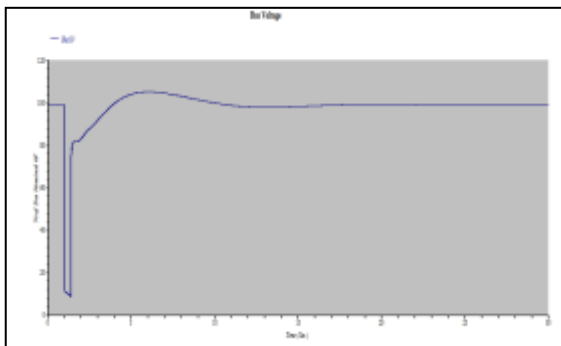
ID Bus	Kondisi Normal	
	V(pu)	f(Hz)
Bus 10	0.9831	50

Tabel 4.2 Kestabilan Sudut Rotor Kondisi Normal

ID Generator	Kondisi Normal
	Sudut Rotor
PLTMH Wae Garit	13.99
Komatsu	18.03
Kubota	22.63
Caterpillar	14.64
Man 1	15.99
Mtu	19.36
Man 2	35.22
Man 3	16.56
Mercedes Benz	0.0
PLTP Ulumbu	-

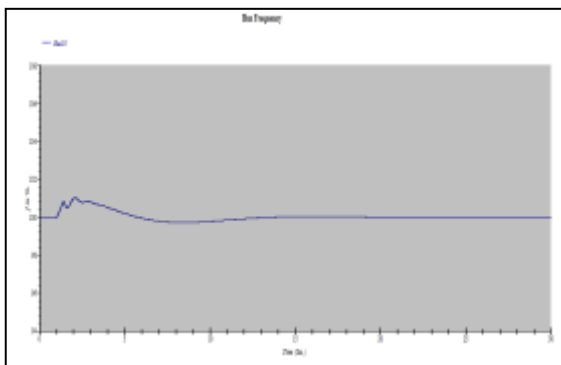
B. Kondisi Gangguan 3 Phasa

Hasil simulasi yang akan ditunjukkan pada gambar 4.4, gambar 4.5 dan gambar 4.6 adalah kondisi kestabilan sistem saat terjadi gangguan 3 phasa pada detik ke -1 sampai detik ke 1.3 pada penyulang Iteng.



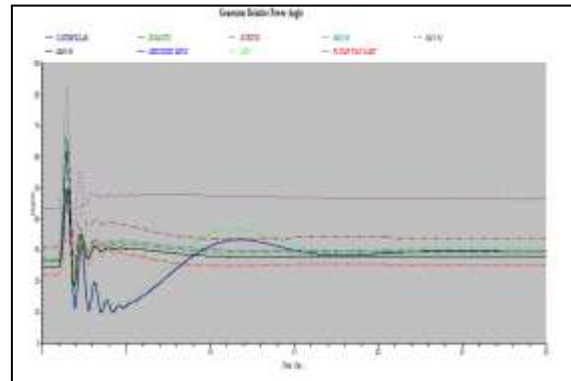
Gambar 4.4 Kestabilan Tegangan Kondisi Gangguan 3 Phasa

Pada Gambar 4.4 adalah hasil simulasi kestabilan tegangan kondisi gangguan 3 phasa pada detik ke -1 sampai detik 1.3 mengalami penurunan pada bus 10 sebesar 0.8085 pu berdasarkan tegangan nominalnya.



Gambar 4.5 Kestabilan Frekuensi Kondisi Gangguan 3 Phasa

Pada Gambar 4.5 adalah hasil simulasi kestabilan frekuensi kondisi gangguan 3 phasa pada detik ke -1 sampai detik ke -1.3 mengalami kenaikan pada bus 10 yaitu sebesar 50.6 Hz.



Gambar 4.6 Kestabilan Sudut Rotor Kondisi Gangguan 3 Phasa

Pada Gambar 4.6 adalah hasil simulasi kestabilan sudut rotor kondisi gangguan 3 phasa pada detik ke -1 sampai detik ke -1.3 mengalami perubahan sudut rotor pada PLTMH Wae Garit, Komatsu, Kubota, Caterpillar, Man 1, Mtu, Man 2, Man 3, Mercedes Benz dan PLTP Ulumbu.

Data hasil simulasi kestabilan tegangan dan frekuensi yang akan ditampilkan pada tabel 4.3 sedangkan kestabilan sudut rotor akan ditampilkan pada tabel 4.4.

Tabel 4.3 Kestabilan Tegangan dan Frekuensi Kondisi Gangguan 3 Phasa

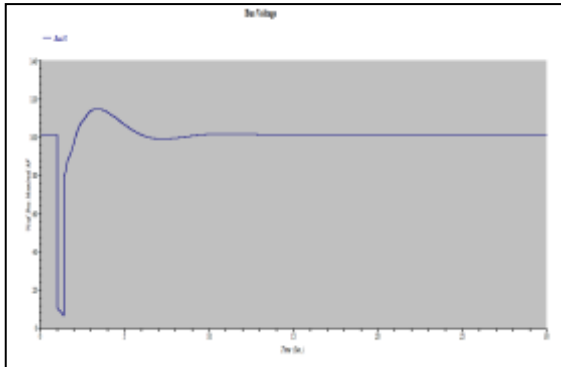
ID Bus	Kondisi Gangguan 3 Phasa	
	V(pu)	f(Hz)
Bus 10	0.8085	50.6

Tabel 4.4 Kestabilan Sudut Rotor Kondisi Gangguan 3 Phasa

ID Generator	Kondisi Gangguan 3Phasa
	Sudut Rotor
PLTMH Wae Garit	23.5
Komatsu	49.04
Kubota	49.45
Caterpillar	42.36
Man 1	47.01
Mtu	55.71
Man 2	66.15
Man 3	35.77
Mercedes Benz	0.0
PLTP Ulumbu	-

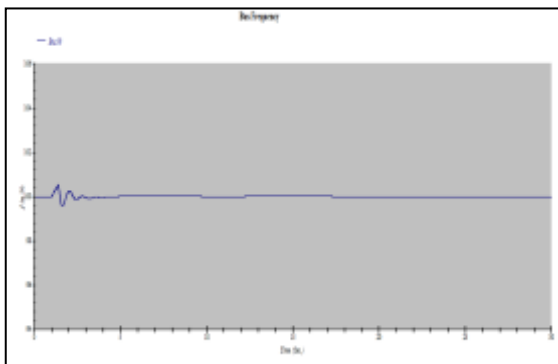
C. Kondisi Setelah Injeksi PLTP Ulumbu

Hasil simulasi yang diperhatikan pada Gambar 4.7, Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 adalah kestabilan kondisi sistem setelah injeksi PLTP Ulumbu dengan daya sebesar 10 MW pada detik – 2.



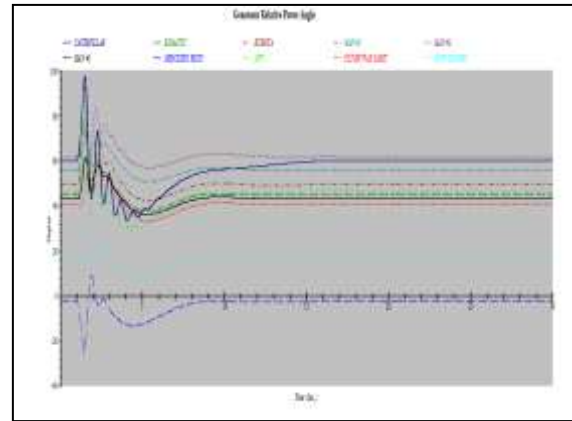
Gambar 4.7 Kestabilan Tegangan Kondisi Setelah Injeksi PLTP Ulumbu

Gambar 4.7 adalah hasil simulasi kestabilan tegangan setelah injeksi PLTP Ulumbu pada detik ke – 2 mengalami kenaikan pada bus 10 sebesar 0.9541 pu berdasarkan tegangan nominalnya.



Gambar 4.8 Kestabilan Frekuensi Kondisi Setelah Injeksi PLTP Ulumbu

Gambar 4.8 adalah hasil simulasi kestabilan frekuensi setelah injeksi PLTP Ulumbu dengan daya sebesar 10 MW pada detik ke- 2 mengalami penurunan dari kondisi terjadi gangguan yaitu sebesar 50.1 Hz .



Gambar 4.8 Kestabilan Sudut Rotor Kondisi Setelah Injeksi PLTP Ulumbu

Gambar 4.8 adalah hasil simulasi kestabilan sudut rotor setelah injeksi PLTP Ulumbu dengan daya 10 MW pada detik ke – 2 mengalami perubahan kondisi sudut pada PLTMH Wae Garit, Komatsu, Kubota, Caterpillar, Man#1, Mtu, Man#2, Man#3, Mercedes Benz dan PLTP Ulumbu.

Berdasarkan hasil simulasi kestabilan tegangan dan frekuensi setelah injeksi PLTP Ulumbu yang akan ditampilkan pada tabel 4.4, sedangkan kestabilan sudut rotor setelah injeksi PLTP Ulumbu akan ditampilkan pada tabel 4.5.

Tabel 4.4 Kestabilan Tegangan dan Frekuensi Setelah Injeksi PLTP Ulumbu

ID Bus	Kondisi Injeksi	
	V(pu)	f(Hz)
Bus 10	0.9541	50.1

Tabel 4.5 Kestabilan Sudut Rotor Setelah Injeksi PLTP Ulumbu

ID Generator	Kondisi Injeksi
	Sudut Rotor
PLTMH Wae Garit	-2.91
Komatsu	9.74
Kubota	8.79
Caterpillar	10.41
Man 1	20.36
Mtu	11.48
Man 2	34.8
Man 3	6.26
Mercedes Benz	-46.03
PLTP Ulumbu	24.67

D. Perbandingan Kestabilan Setiap Kondisi

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan pada setiap kondisi dapat disimpulkan sebuah perbandingan yang akan dituangkan dalam bentuk tabel dibawah ini. Tabel 4.6 kestabilan tegangan, tabel 4.7 frekuensi dan tabel 4.8 sudut rotor.

Tabel 4.6 Perbandingan Kestabilan Tegangan Pada Setiap Kondisi

ID Bus	Tegangan (V)		
	Kondisi Normal	Kondisi Gangguan 3 Phasa	Kondisi Injeksi
Bus 10	0.9831	0.8085	0.9541

Berdasarkan hasil perbandingan simulasi kestabilan tegangan kondisi normal, kondisi gangguan, dan kondisi setelah PLTP Ulumbu pada sistem kelistrikan Manggarai, profil tegangan pada bus 10 mengalami penurunan drastis setelah terjadi gangguan dari 0.9831 pu menjadi 0.8085 pu dari keadaan normalnya. Setelah PLTP Ulumbu diinjeksikan pada Bus 10 maka profil tegangan pada bus 10 mengalami kenaikan kembali dari 0.8085 pu menjadi 0.9541 dari kondisi keadaan setelah gangguan.

Tabel 4.7 Perbandingan Kestabilan Frekuensi Pada Setiap Kondisi

ID Bus	Frekuensi (Hz)		
	Kondisi Normal	Kondisi Gangguan 3 Phasa	Kondisi Injeksi
Bus 10	50	50.6	50.1

Untuk perubahan kestabilan frekuensi setelah gangguan pada bus 10 mengalami kenaikan dari keadaan normal dan setelah adanya injeksi PLTP Ulumbu kestabilan frekuensi pada bus 10 mengalami penurunan dan hampir mendekati keadaan normalnya.

Tabel 4.8 Perbandingan Kestabilan Sudut Rotor Pada Setiap Kondisi

ID Generator	Kondisi Normal	Kondisi Gangguan	Kondisi Injeksi
	Sudut Rotor		
PLTMH Wae Garit	13.99	18.44	47.99
Komatsu	18.03	23.5	-2.91
Kubota	22.63	49.04	9.74
Caterpillar	14.64	49.45	8.79
Man 1	15.99	42.26	10.41
Mtu	19.36	47.01	20.36
Man 2	35.22	55.71	11.48
Man 3	16.56	35.77	34.8
Mercedes Benz	0.0	0.0	-46.03
PLTP Ulumbu	-	-	24.67

Kestabilan sudut rotor mengalami osilasi dan perubahan sudut setelah mengalami gangguan 3 fasa maupun setelah injeksi dan kembali menemukan titik kerjanya yang baru dalam waktu yang cukup lama.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan Hasil dari simulasi kestabilan dinamik menggunakan sistem kelistrikan Manggrai akibat injeksi dari PLTP Ulumbu, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dengan adanya penambahan pembangkit baru yaitu PLTP Ulumbu pada sistem kelistrikan Manggarai selain menambah kekurangan daya juga dapat memperbaiki profil tegangan .
2. Pada saat terjadi gangguan 3 phasa selama detik 1-1.3 kestabilan tegangan mengalami penurunan dan kestabilan frekuensi mengalami kenaikan disetiap bus. sedangkan sudut rotor mengalami perubahan sudut dan beroperasi pada titik kerja barunya dan akan kembali stabil dalam jangka waktu yang cukup lama.
3. Setelah diinjeksikan PLTP Ulumbu 10 MW pada detik ke 2 kestabilan tegangan mengalami kenaikan dan Kestabilan frekuensi sistem mengalami penurunan dari kondisi terjadi gangguan. sedangkan kestabilan sudut mengalami perubahan sudut yaitu berkerja pada titik oprasi baru dan akan stabil dalam jangka waktu yang cukup lama.

REFERENSI

- [1] ETAP Power Station. “Example IEEE 9 Bus”
- [2] Lomi, Abraham. “Materi Kuliah Analisa Sistem Tenaga Elektrik - Power Flow Analysis
- [3] Arnold J. Kastanja , Wijono Wijono, Hadi Suyono (2014)analisis-stabilitas-sistem-daya-interkoneksi-pltu-waai-pada-sistem-kelistrikan-ambon
- [4] Kundur, P. 1994. Power System Stability and Design. USA : McGraw-Hill, Inc.
- [5] Oluwafemi E. Oni, Kamati N. I. Mbangula, and Innocent E. Davidson, “Dynamic Voltage Stability using Modified IEEE 30-Bus System,” 978-1-5090-2320-2/16/\$31.00 ©2016 IEEE.
- [6] Khaikal Mudatsir Rosidin Jurnal (2017)analisa - stabilitas-dinamik-akibat-injeksi-PLTU-LED - kelistrikan-Lombok.
- [7] Basil M. Nomikos and Yannis Kabouris, “A Dynamic Stability and Security Assessment Study For The Interconnection of Crete with The Hellenic Mainland System via 150kV/AC Network”, Power Generation:IET, 2017.
- [8] Grainger, J, J. And W.D. Stevenson, Jr. 1994. Power System Analysis. USA: McGraw-Hill Inc.