

ANALISIS KONDISI STEADY-STATE DAN DINAMIK PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. BADAK NGL BONTANG, KALIMANTAN TIMUR

Dwi Indra Kusumah¹, Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D.,² Mahfudz Shidiq, Ir., MT.,³

¹Mahasiswa Teknik Elektro, ^{2,3}Dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167 Malang, 65145, Indonesia

Email: dwimalang@gmail.com

Abstrak-Pada penelitian ini dilakukan analisis stabilitas sistem daya pada sistem kelistrikan di PT Badak NGL saat kondisi *captive* maupun kondisi interkoneksi terhadap gangguan 3 fasa pada bus generator. Analisis stabilitas ini bertujuan untuk mengetahui performa sudut rotor dan frekuensi generator sebelum, selama, dan setelah terjadi gangguan. Selain itu dilakukan juga analisis mengenai pengaruh penggunaan *Turbine Governor* dan kontrol *Automatic Voltage Regulator* (AVR) terhadap stabilitas sistem daya dan penentuan waktu pemutusan kritis generator. Setelah melakukan penelitian dan simulasi, didapatkan bahwa sistem daya pada saat kondisi awal maupun kondisi interkoneksi adalah stabil untuk kondisi dimana gangguan tiga (3) fasa ke tanah diterapkan pada sistem. Selain itu, sistem interkoneksi memiliki performa yang lebih baik dibandingkan sistem *captive*, hal ini dapat diketahui dari lebih cepatnya waktu pemulihan yang dibutuhkan setelah mengalami gangguan. *Turbine governor* juga memiliki pengaruh terhadap waktu pemulihan yang lebih cepat setelah terjadi gangguan.

Kata kunci - power generator (PG), interkoneksi, frekuensi, tegangan, *module*, sistem NGL Bontang

I. LATAR BELAKANG

PT Badak NGL merupakan salah satu industri di bidang pengolahan gas alam cair terbesar di dunia yang tidak lepas dari penggunaan energi listrik dalam menjalankan mesin-mesin industriya yang mencapai ribuan unit. Energi listrik yang digunakan perusahaan ini berasal dari 15 unit generator yang bekerja pada level tegangan 13.8 kV, mulai dari generator PG-01 hingga PG-15 (1 x 5,5 MW dan 14 x 12,5 MW) dan menghasilkan daya total sebesar 180 MW. Energi listrik yang dihasilkan digunakan sebagai pendukung pengoperasian kilang maupun ke kompleks perumahan PT Badak NGL seperti *cooling water, process plant, airport, central office, community, water pump*, dan beban lainnya.

Dalam memudahkan pengoperasian, maka sistem di perusahaan ini dibagi atas dua (2) bagian yang saling berhubungan yaitu *module-1* yang membawahi unit pencairan gas yaitu *Train A/B/C/D*, 11 unit *boiler*, dan *utilities-1* yang terdiri atas 8 unit *power generation* yaitu generator unit PG1-PG8 (1x5,5 MW dan 7x12,5 MW) serta beberapa komponen pendukung lainnya, sedangkan pada *module-2* terdiri atas unit pencairan gas yaitu *Train E/F/G/H*, 10 unit *boiler*, dan *utilities-2* yang terdiri atas 7 unit *power generation* yaitu generator unit PG9-PG15 (7x12,5 MW) serta beberapa komponen pendukung lainnya.

Saat interkoneksi, seluruh generator (generator ke-1 hingga 15) dalam keadaan bekerja, sedangkan untuk menghubungkan kedua *module* tersebut digunakan sistem jaringan *ring bus* dengan menaikkan tegangan

hingga 34,5 kV menggunakan transformator tiga-fasa tiga-bilatan. Sistem jaringan ini berfungsi untuk menyalurkan kelebihan daya pada bus satu untuk disalurkan ke bus lainnya yang membutuhkan daya.

Saat ini masih terdapat beberapa kendala pada sistem kelistrikan di PT Badak NGL salah satunya adalah belum adanya analisis khusus untuk mengetahui performa sistem tersebut saat kondisi *steady-state* maupun *transient* (peralihan) sehingga apabila terjadi gangguan maka dapat dengan cepat diketahui. Penelitian ini akan menganalisis kinerja sistem saat kondisi *captive* maupun interkoneksi antara *module-1* dan *module-2* serta dalam kondisi *steady-state* maupun dinamik. Diagram sistem daya yang telah ada dimodelkan kedalam perangkat lunak, lalu disimulasikan dan dianalisis hasilnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

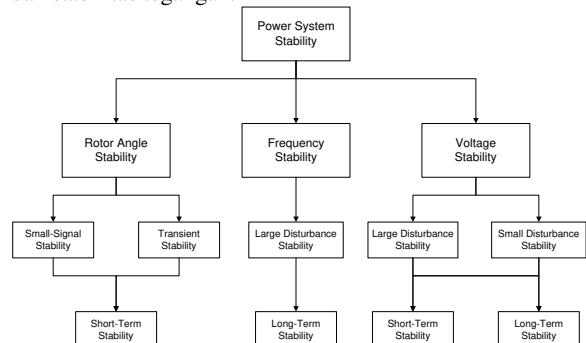
2.1 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan studi yang berguna untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya atau tegangan sistem dalam kondisi operasi tunak (*steady-state*). Informasi ini sangat berguna dalam mengevaluasi unjuk kerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkitan maupun pembebaran. Representasi fasa tunggal selalu dilakukan karena sistem dianggap seimbang. Didalam studi aliran daya, bus-bus dibagi dalam tiga (3) macam, yaitu:

1. *Slack bus* atau *swing bus* atau bus referensi
2. *Voltage controlled bus* atau bus generator (*P-V bus*)
3. *Load bus* atau bus beban (*P-Q bus*)

2.3 Klasifikasi Stabilitas Sistem Daya

Klasifikasi stabilitas secara lengkap dapat dilihat pada gambar 2.1. Disana terlampir macam-macam stabilitas yaitu stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi, dan stabilitas tegangan.



Gambar 2.1 Klasifikasi stabilitas sistem daya

Sumber : Kundur (1994 : 36)

2.2 Dinamika Sistem Tenaga Listrik

Masalah kestabilan biasanya diklasifikasikan menjadi tiga (3) tipe bergantung pada sifat alami dan *magnitude* gangguan, yaitu :

1. Stabilitas *steady state*
2. Stabilitas *transient*
3. Stabilitas dinamis

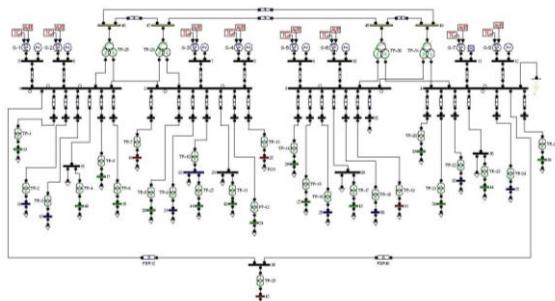
III. SIMULASI DAN ANALISIS

Pelaksanaan simulasi dan pemodelan sistem daya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *PSAT (Power System Analysis Toolbox)* versi 2.1.6 yang berfungsi untuk memodelkan kondisi sistem daya yang ada untuk analisis sistem pada keadaan tunak dan dinamik. Pada simulasi ini dilakukan dua jenis simulasi yaitu: Simulasi kondisi awal sebelum maupun sesudah interkoneksi dan simulasi stabilitas sebelum maupun sesudah interkoneksi saat kondisi *steady-state* dan dinamik pada sistem di PT Badak NGL.

Pada simulasi ini menggunakan frekuensi 50 Hz, daya dasar 15.625 MVA dengan tegangan dasar 13,8 kV. Waktu gangguan dimulai dari detik ke-1 dengan durasi simulasi selama 20 detik, dan waktu gangguan 0,1 detik. Gangguan yang diberikan ialah gangguan hubung singkat 3 fasa seperti yang telah disebutkan dalam batasan masalah. Selain itu, saat gangguan, batas frekuensi yang dianjuran tidak lebih tinggi dari 51,25 Hz dan lebih rendah dari 48,75 Hz ($\pm 2,5\%$ dari frekuensi nominal)

Dalam simulasi ini, gangguan pada *module-1* terjadi pada bus generator yaitu bus-4, sedangkan gangguan pada *module-2* terjadi pada bus generator yaitu bus-53. Sedangkan setelah interkoneksi, gangguan terjadi pada bus generator yaitu bus-53. Penentuan bus generator ini dikarenakan bus ini yang paling krusial dan paling memberikan dampak dinamik terhadap tegangan maupun frekuensi.

Single-line diagram *module-1* dan *module-2* ditampilkan pada gambar 3.1 dan 3.2 sedangkan *single-line diagram* interkoneksi ditampilkan pada gambar 3.3. Pada diagram interkoneksi, titik penghubung interkoneksi antara *module-1* dan *module-2* berada pada bus 92 dan bus-93.



B. Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan di PT Badak NGL. Adapun data yang didapat berupa data *single-line diagram*, data dinamik generator, data saluran penghantar, data beban, data *governor control system*, dan data *automatic voltage regulator (AVR)* dan data pendukung lainnya.

C. Perhitungan dan Simulasi

Setelah mendapatkan data yang dibutuhkan, langkah selanjutnya ialah melakukan perhitungan dan simulasi, adapun langkah-langkahnya ialah:

1. Penentuan jumlah bus yang akan disimulasikan.
2. Menentukan nilai tegangan dasar (kV_{base}) dan daya dasar (MVA_{base}).
3. Menghitung nilai Impedansi dasar sistem PT Badak NGL.
4. Menghitung nilai impedansi dan reaktansi saluran lalu menkonversikan kedalam per unit.
5. Memodelkan sistem sesuai *single-line diagram*.
6. Memberikan nilai tiap komponen sesuai data.
7. Menentukan metode penyelesaian aliran daya yang diinginkan.
8. Melakukan simulasi aliran daya pada model awal sistem daya.
9. Mencatat data aliran daya sebagai bahan evaluasi studi stabilitas.
10. Melakukan interkoneksi pada dua (2) *module* pada sistem kelistrikan PT Badak NGL
11. Melakukan langkah 4 sampai 5 pada kondisi interkoneksi.
12. Memberikan gangguan pada *bus*.
13. Melakukan simulasi stabilitas kondisi *captive*
14. Melakukan analisis terhadap hasil simulasi.
15. Melakukan langkah 5 sampai 10 pada kondisi interkoneksi.
16. Pengambilan kesimpulan dan saran.

IV. DATA DAN ANALISIS HASIL PENELITIAN

A. Kondisi Kelistrikan di PT Badak NGL

Energi listrik yang digunakan perusahaan ini berasal dari 15 unit generator yang bekerja pada level tegangan 13.8 kV, mulai dari generator *PG-01* hingga *PG-15* ($1 \times 5,5$ MW dan $14 \times 12,5$ MW) dan menghasilkan daya total sebesar 180 MW. Frekuensi yang digunakan pada sistem ini ialah 50 Hz. Selain itu, dalam memudahkan pengoperasian, maka sistem di perusahaan ini dibagi atas dua (2) yaitu *module-1* dan *module-2*. Pada *module-1* terdapat 8 unit generator ($1 \times 5,5$ MW dan $7 \times 12,5$ MW), sedangkan pada *module-2* terdapat 7 generator ($7 \times 12,5$ MW).

Pada penelitian ini diketahui bahwa beban pada *module-1* ialah 73,9 MW dan 48,27 MVAR sedangkan beban pada *module-2* ialah 66,65 MW dan 41,38 MVAR. Beban pada kedua *module* terdiri atas beban induktif, beban motor, lampu, dan beban lainnya.

B. Simulasi Aliran Daya

1. Simulasi Aliran Daya *Captive Module-1*

Pada simulasi aliran daya captive *module-1* ini ditentukan bahwa bus-11 adalah *slack bus* dengan tegangan $1 \text{ p.u} \angle 0^\circ$ sedangkan bus-5 s.d. bus-12 merupakan *PV bus* dengan daya keluaran bervariasi.

Dari hasil simulasi maka diketahui bahwa data aliran daya pada *module-1* ditampilkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Simulasi *Module-1*

No.	Bus	V [p.u.]	phase $[^\circ]$	P (gen) [p.u.]	Q (gen) [p.u.]	P (beban) [p.u.]	Q (beban) [p.u.]
				[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
1	1	0.99999	0.00301	0	0	0	0
2	10	1	0.00115	0.8	0.4736	0	0
3	11	1	0	0.6127	0.5487	0	0
4	12	1	0.00011	0.8	0.5481	0	0
5	13	0.98642	0.00123	0	0	0.0295	0.1830
6	14	0.99756	-0.16408	0	0	0.0574	0.0356
7	15	0.99262	-0.50156	0	0	0.1649	0.1022
8	16	0.99967	-0.02655	0	0	0.4224	0.2618
9	17	0.99948	-0.03081	0	0	0.0091	0.0056
10	18	0.98910	-0.71574	0	0	0.1911	0.1185
11	19	0.99925	-0.04806	0	0	0.0136	0.0084
12	2	0.99999	0.00289	0	0	0	0
13	20	0.99498	-0.32802	0	0	0.0909	0.0563
14	21	0.99606	-0.26647	0	0	0.0924	0.0573
15	22	0.96773	-2.15829	0	0	0.2387	0.1480
16	23	0.99966	-0.02616	0	0	0.4224	0.2618
17	24	0.99540	-0.22235	0	0	0.0641	0.0545
18	25	0.99504	-0.33882	0	0	0.0906	0.0562
19	26	0.99592	-0.26866	0	0	0.0727	0.0451
20	27	0.99881	-0.07996	0	0	0.0273	0.0169
21	28	0.99249	-0.51275	0	0	0.1652	0.1024
22	29	0.99969	-0.02729	0	0	0.4224	0.2618
23	3	0.99999	0.00067	0	0	0	0
24	30	0.99554	-0.30327	0	0	0.0982	0.0612
25	31	0.98550	-0.99331	0	0	0.2610	0.1618
26	32	0.99972	-0.02454	0	0	0.4224	0.2618
27	33	0.99701	-0.19739	0	0	0.0545	0.0338
28	34	0.99839	-0.10927	0	0	0.0364	0.0225
29	35	0.99308	-0.47327	0	0	0.1533	0.0950
30	36	0.99936	-0.05698	0	0	0.6337	0.3927
31	37	0.98555	-0.98388	0	0	0.3127	0.1938
32	38	0.95630	-3.70771	0	0	0	0
33	39	0.99776	-0.10517	0	0	0.0409	0.0253
34	4	0.99999	-0.00036	0	0	0	0
35	40	0.99642	-0.24042	0	0	0.0726	0.0450
36	41	0.92780	-2.36852	0	0	0.4224	0.2618
37	42	0.99601	-0.20414	0	0	0.0641	0.0545
37	42	0.99601	-0.20414	0	0	0.0641	0.0545
38	43	0.99719	-0.19155	0	0	0.0460	0.0285
39	44	0.98198	-1.19261	0	0	0.3127	0.1938
40	45	0.94477	-4.53280	0	0	0.2019	0.1251
41	46	0.99999	0.00213	0	0	0	0
42	46(twt)	0.99999	0.00268	0	0	0	0
43	47	0.99999	0.00207	0	0	0	0
44	47(twt)	0.99999	0.00266	0	0	0	0
45	48	0.99999	0.00101	0	0	0	0
46	48(twt)	0.99999	0.00044	0	0	0	0
47	49	0.99999	0.00099	0	0	0	0
48	49(twt)	0.99999	0.00043	0	0	0	0
49	5	1	0.00320	0.325	0.40460	0	0
50	6	1	0.00349	0.8	0.40309	0	0
51	7	1	0.00337	0.8	0.50157	0	0
52	8	1	0.00337	0.8	0.50157	0	0
53	9	1	0.00115	0.8	0.47369	0	0

Sumber: hasil simulasi

Dari simulasi diatas diketahui bahwa besar rugi-rugi pada *module-1* adalah 0,02998 p.u atau 0,4684 MW dengan rugi reaktif sebesar 0,12311 p.u atau 1,9235 MVAR. Selain itu, tegangan yang ditampilkan pada simulasi tersebut memiliki rentang mulai dari 0.920 - 1 p.u. dan tidak melebihi batas yang ditentukan seperti pada penjelasan sebelumnya yaitu +5 % (1.05 p.u.) dan -10% (0.90 p.u.) dari tegangan nominal yaitu 1 p.u. Selain itu, dari tabel diatas dapat diketahui bahwa tegangan pada bus 41 bernilai kurang dari 0.95 p.u atau dibawah -5%, Hal ini disebabkan oleh adanya beban berupa 2 unit *Motor Cooling Water Pump* yang menyerap daya cukup besar yaitu 3,3 MW/unit.

Pada analisis diatas dapat kita ketahui besar aliran daya yang mengalir pada sistem *module-1* seperti yang tercantum pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data aliran daya *module-1*

	Total Pembangkit	Total Beban	Total Rugi-Rugi
P (pu)	5.7377	5.7077	0.02998
Q (pu)	3.855	3.7319	0.12311

Sumber: hasil simulasi

2. Simulasi Aliran Daya *Captive Module-2*

Pada simulasi aliran daya captive *module-2* ini ditentukan bahwa bus-59 adalah *slack bus* dengan tegangan $1 \text{ p.u} \angle 0^\circ$ sedangkan bus-54 s.d. bus-60 merupakan *PV bus* dengan daya keluaran bervariasi.

Dari hasil simulasi maka diketahui bahwa data aliran daya pada *module-2* ditampilkan pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Data Simulasi *Module-2*

No.	Bus	V	phase	P gen	Q gen	P (beban)	Q (beban)
		[p.u.]	[°]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
1	50	0.99999	-0.00225	0	0	0	0
2	51	1	-0.00097	0	0	0	0
3	52	1	-0.00014	0	0	0	0
4	53	1	-0.00045	0	0	0	0
5	54	1	-0.00177	0.8	0.6742	0	0
6	55	1	-0.00050	0.8	0.4597	0	0
7	56	1	-0.00050	0.8	0.4597	0	0
8	57	1	0.00034	0.8	0.4671	0	0
9	58	1	0.00034	0.8	0.4671	0	0
10	59	1	0.00000	0.7518	0.4892	0	0
11	60	1	0.00003	0.8	0.4890	0	0
12	61	0.99776	-0.15534	0	0	0.036350	0.022530
13	62	0.98967	-0.70615	0	0	0.237820	0.147390
14	63	0.99900	-0.09331	0	0	0.211200	0.130890
15	64	0.98868	-0.78236	0	0	0.254350	0.157630
16	65	0.98823	-0.80273	0	0	0.268900	0.166700
17	66	0.99792	-0.10657	0	0	0.026726	0.022710
18	67	0.99457	-0.37196	0	0	0.125900	0.078060
19	68	0.99843	-0.14452	0	0	0.422400	0.261800
20	69	0.99375	-0.43362	0	0	0.141800	0.087880
21	70	0.97665	-1.59264	0	0	0.502300	0.311350
22	71	0.99236	-0.52256	0	0	0.174010	0.107840
23	72	0.99198	-0.54808	0	0	0.188270	0.116680
24	73	0.99446	-0.38223	0	0	0.123840	0.076750
25	74	0.99611	-0.26643	0	0	0.090300	0.055960
26	75	0.99970	-0.02764	0	0	0.844800	0.523500
27	76	0.99112	-0.60501	0	0	0.179200	0.111090
28	77	0.99808	-0.13650	0	0	0.040890	0.025340
29	78	0.99446	-0.37927	0	0	0.130490	0.080870
30	79	0.98990	-0.69553	0	0	0.232890	0.144330
31	80	0.99712	-0.19716	0	0	0.068090	0.042200
32	81	0.99969	-0.02819	0	0	0.844800	0.523500
33	82	0.98944	-0.71979	0	0	0.216060	0.133900
34	83	0.99872	-0.09130	0	0	0.027260	0.016890
35	84	0.99647	-0.26498	0	0	0.058290	0.036128
36	85	0.99726	-0.22366	0	0	0.026880	0.016660
37	86	0.99839	-0.11470	0	0	0.030900	0.019150
38	87	0.99806	-0.13710	0	0	0.038640	0.023930
39	88	0.99999	-0.00122	0	0	0	0
40	88(twt)	0.99999	-0.00148	0	0	0	0
41	89	0.99999	-0.00120	0	0	0	0
42	89(twt)	0.99999	-0.00147	0	0	0	0
43	90	0.99999	-0.00070	0	0	0	0
44	90(twt)	0.99999	-0.00043	0	0	0	0
45	91	0.99999	-0.00069	0	0	0	0
46	91(twt)	0.99999	-0.00042	0	0	0	0
24	73	0.99446	-0.38223	0	0	0.123840	0.076750
25	74	0.99611	-0.26643	0	0	0.090300	0.055960
26	75	0.99970	-0.02764	0	0	0.844800	0.523500

Sumber: hasil simulasi

Dari simulasi diatas diketahui bahwa besar rugi-rugi pada *module-2* adalah 0,00849 p.u atau 0,1326 MW dengan rugi reaktif sebesar 0,06719 p.u atau 1,049 MVAR. Selain itu, tegangan yang ditampilkan pada simulasi tersebut memiliki rentang mulai dari 0.970 - 1 p.u. dan tidak melebihi batas yang ditentukan seperti pada penjelasan sebelumnya yaitu +5 % (1.05 p.u.) dan -10% (0.90 p.u.) dari tegangan nominal yaitu 13,8 kV (1 p.u.).

Pada analisis diatas dapat kita ketahui besar aliran daya yang mengalir pada sistem *module-1* seperti yang tercantum pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data aliran daya *module-2*

	Total Pembangkit	Total Beban	Total Rugi-Rugi
P (pu)	5.5521	5.5436	0.00849
Q (pu)	3.5091	3.4419	0.06719

3. Simulasi Aliran Daya Interkoneksi

Pada simulasi aliran daya interkoneksi ini, *module-1* dan *module-2* dihubungkan. Bus-11 adalah *slack bus* dengan tegangan 1 p.u $\angle 0^\circ$ sedangkan bus 5 s.d. 12 dan 54 s.d. 60 merupakan *PV bus* dengan daya keluaran bervariasi.

Dari hasil simulasi maka didapatkan data aliran daya pada saluran interkoneksi ditampilkan pada table 4.5.

Tabel 4.5 Data Simulasi *Interkoneksi*

No.	Bus	V	phase	P gen	Q gen	P (beban)	Q (beban)
		[p.u.]	[°]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
1	1	0.999996	0.003449	0	0	0	0
2	10	1	0.001325	0.8	0.4738	0	0
3	11	1	0	0.5645	0.5507	0	0

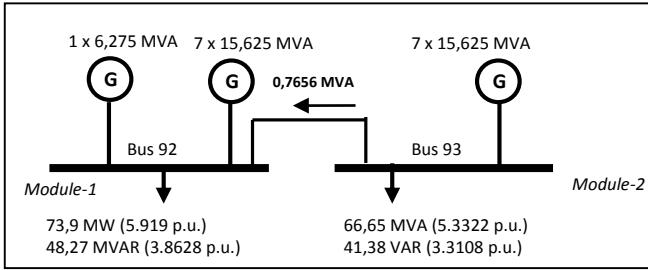
No.	Bus	V	phase	P gen	Q gen	P (beban)	Q (beban)
		[p.u.]	[°]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
4	12	1	0.000141	0.8	0.5500	0	0
5	13	0.986422	0.001668	0	0	0.02953	0.1832
6	14	0.997563	-0.16365	0	0	0.05742	0.03558
7	15	0.992624	-0.50113	0	0	0.1649	0.1022
8	16	0.999673	-0.02611	0	0	0.42244	0.2618
9	17	0.999487	-0.03037	0	0	0.00909	0.00563
10	18	0.989109	-0.71530	0	0	0.19114	0.11846
11	19	0.999259	-0.04762	0	0	0.01357	0.00841
12	2	0.99995	0.003332	0	0	0	0
13	20	0.994988	-0.32759	0	0	0.09087	0.05632
14	21	0.99607	-0.26604	0	0	0.09242	0.05728
15	22	0.967737	-2.15786	0	0	0.23872	0.14795
16	23	0.999662	-0.02572	0	0	0.42244	0.2618
17	24	0.995047	-0.22192	0	0	0.06414	0.05452
18	25	0.995047	-0.33838	0	0	0.09061	0.05615
19	26	0.995924	-0.26849	0	0	0.0727	0.04505
20	27	0.998813	-0.07980	0	0	0.02726	0.01689
21	28	0.992495	-0.51259	0	0	0.16523	0.1024
22	29	0.99969	-0.02712	0	0	0.42244	0.2618
23	3	0.999995	0.000847	0	0	0	0
24	30	0.995542	-0.30311	0	0	0.09817	0.06118
25	31	0.985503	-0.99314	0	0	0.26103	0.16177
26	32	0.99972	-0.02437	0	0	0.42244	0.2618
27	33	0.997018	-0.19736	0	0	0.05452	0.03379
28	34	0.998397	-0.10924	0	0	0.03635	0.02253
29	35	0.993088	-0.47324	0	0	0.1533	0.09501
30	36	0.999368	-0.05695	0	0	0.63366	0.39271
31	37	0.985553	-0.98385	0	0	0.31272	0.19381
32	38	0.956306	-3.70757	0	0	0	0
33	39	0.997765	-0.10515	0	0	0.04089	0.02534
34	4	0.999994	-0.00033	0	0	0	0
35	40	0.996428	-0.23998	0	0	0.07264	0.04502
36	41	0.927802	-2.36808	0	0	0.42244	0.2618
37	42	0.996018	-0.20370	0	0	0.06414	0.05452
38	43	0.997198	-0.19138	0	0	0.04595	0.02848
39	44	0.981981	-1.19258	0	0	0.3127	0.19381
40	45	0.944776	-4.53266	0	0	0.20186	0.12511
41	46	0.999995	0.002605	0	0	0	0
42	46(twt)	0.999995	0.003129	0	0	0	0
43	47	0.999995	0.002479	0	0	0	0
44	47(twt)	0.999995	0.003087	0	0	0	0
45	48	0.999995	0.001307	0	0	0	0
46	48(twt)	0.999995	0.000606	0	0	0	0
47	49	0.999995	0.001318	0	0	0	0
48	49(twt)	0.999995	0.00061	0	0	0	0
49	5	1	0.003643	0.325	0.4048	0	0
50	50	0.999993	0.000275	0	0	0	0
51	51	0.999995	0.001549	0	0	0	0
52	52	0.999995	0.002608	0	0	0	0
53	53	0.999995	0.002435	0	0	0	0
54	54	1	0.000752	0.8	0.6738	0	0
55	55	1	0.002026	0.8	0.4595	0	0
56	56	1	0.002026	0.8	0.4595	0	0
57	57	1	0.003085	0.8	0.4668	0	0
58	58	1	0.003085	0.8	0.4668	0	0
59	59	1	0.002912	0.8	0.4871	0	0
60	6	1	0.003927	0.8	0.4033	0	0
61	60	1	0.002912	0.8	0.4871	0	0
62	61	0.997757	-0.15282	0	0	0.03635	0.02253
63	62	0.989669	-0.70362	0	0	0.23782	0.14739
64	63	0.998998	-0.09079	0	0	0.2112	0.13089
65	64	0.988677	-0.77983	0	0	0.25435	0.15763
66	65	0.988235	-0.80021	0	0	0.2689	0.1667
67	66	0.997917	-0.10404	0	0	0.02673	0.02271
68	67	0.994571	-0.36943	0	0	0.1259	0.07806
69	68	0.998428	-0.1				

0,600 MW dengan rugi reaktif sebesar 0,1876 p.u. atau 2,9312 MVAR. Selain itu, tegangan yang ditampilkan pada simulasi tersebut memiliki rentang mulai dari 0,944 - 1 p.u. dan tidak melebihi batas yang ditentukan seperti pada penjelasan sebelumnya yaitu +5 % (1,05 p.u.) dan -10% (0,90 p.u.) dari tegangan nominal yaitu 1 p.u.

Dari hasil analisis juga diperoleh data mengenai aliran daya pada saluran interkoneksi yang tercantum pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Data aliran daya Interkoneksi

	Total Pembangkit	Total Beban	Total Rugi-Rugi
P (pu)	11,2898	11,2512	0,03847
Q (pu)	7,3641	7,1738	0,19032



Gambar 4.1 Aliran Daya Pada Saluran Interkoneksi
(Sumber : hasil simulas)

Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa aliran daya mengalir dari *module-2* ke *module-1* dengan daya sebesar 0,7656 MVA.

C. Simulasi Sistem Daya

1. Simulasi Stabilitas Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Interkoneksi

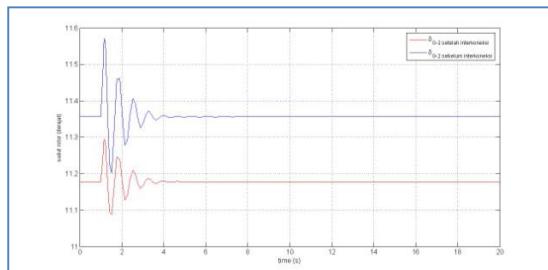
Sebelum interkoneksi, Pada *module-1* gangguan terjadi pada bus 4, sedangkan pada *module-2*, gangguan terjadi pada bus 53. Data yang ditampilkan merupakan data grafik sudut rotor.

Tabel 4.7 Tabel Stabilitas Sudut Rotor

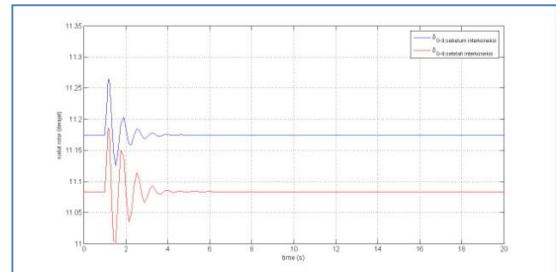
Generator	Sebelum interkoneksi		Setelah interkoneksi	
	δ (°)	$t_{pemulih}$ (detik)	δ (°)	$t_{pemulih}$ (detik)
G-02	11,36	4,9	11,18	3,9
G-08	10,97	5,1	11,36	4,5
G-09	11,18	4,9	11,09	4,7
G-14	10,63	4,8	10,63	4,4

(sumber: hasil simulas)

Dari tabel 4.7 diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat 0,2-1 detik dibandingkan sebelum interkoneksi. Selain itu dari gambar 4.2 dan 4.3 diketahui bahwa sudut rotor dapat kembali ke posisi *steady-state*.



Gambar 4.2 Perbandingan grafik sudut rotor = $f(t)$ pada generator G-02 sebelum dan setelah interkoneksi
(Sumber : Hasil simulas)



Gambar 4.3 Perbandingan grafik sudut rotor = $f(t)$ pada generator G-09 sebelum dan setelah interkoneksi
(Sumber : Hasil simulas)

2. Simulasi Stabilitas Frekuensi Sebelum dan Sesudah Interkoneksi

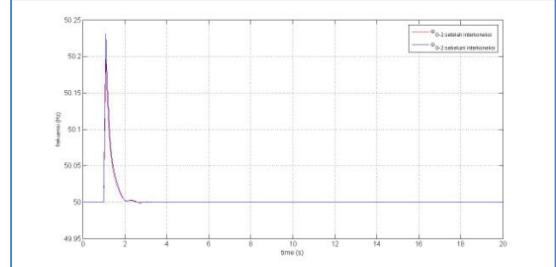
Sebelum interkoneksi, Pada *module-1* gangguan terjadi pada bus 4, sedangkan pada *module-2*, gangguan terjadi pada bus 53. Data yang ditampilkan merupakan data grafik frekuensi.

Tabel 4.8 Stabilitas Frekuensi

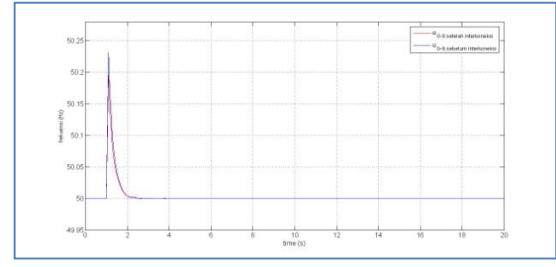
Generator	Sebelum interkoneksi		Setelah interkoneksi	
	f_{max} (Hz)	$t_{pemulih}$ (detik)	f_{max} (Hz)	$t_{pemulih}$ (detik)
G-02	50,23	2,9	50,18	2,3
G-08	50,23	2,9	50,19	2,4
G-09	50,23	1,7	50,19	1,6
G-14	50,23	1,7	50,18	1,3

(sumber: hasil simulas)

Dari tabel 4.8 diketahui bahwa frekuensi tidak melebihi dari batas yang ditentukan yaitu 51,25 Hz dan lebih rendah dari 48,75 Hz ($\pm 2,5\%$ dari frekuensi nominal).



Gambar 4.4 Perbandingan grafik frekuensi = $f(t)$ pada generator G-02 sebelum dan setelah interkoneksi
(Sumber : Hasil simulas)



Gambar 4.5 Perbandingan grafik frekuensi = $f(t)$ pada generator G-09 sebelum dan setelah interkoneksi
(Sumber : Hasil simulas)

D. Simulasi Sistem Daya Kondisi Dinamik Dengan Pengaruh Governor dan AVR

1. Simulasi Stabilitas Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Interkoneksi

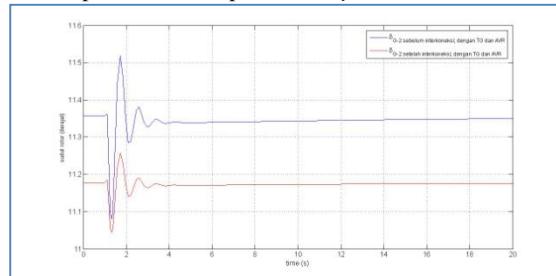
Sebelum interkoneksi, Pada *module-1* gangguan terjadi pada bus 4, sedangkan pada *module-2*, gangguan terjadi pada bus 53. Data yang ditampilkan merupakan data grafik sudut rotor.

Tabel 4.9 Tabel Stabilitas Sudut Rotor

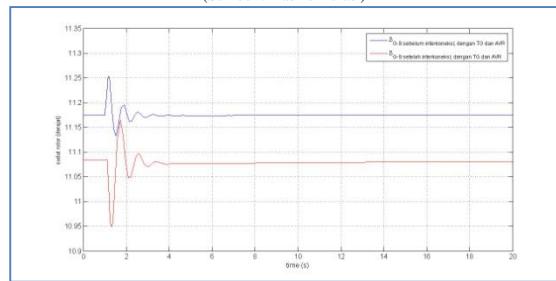
Generator	Sebelum interkoneksi		Setelah interkoneksi	
	δ (°)	t pemulihan (detik)	δ (°)	t pemulihan (detik)
G-02	11,34	13,5	11,17	3,7
G-08	10,94	4,6	11,35	3,5
G-09	11,18	4,5	11,08	4,2
G-14	10,63	18,1	10,63	5,8

(sumber: hasil simulasi)

Dari tabel 4.9 diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat 0,3-10,1 detik dibandingkan sebelum interkoneksi. Selain itu dari gambar 4.6 dan 4.7 diketahui bahwa sudut rotor dapat kembali ke posisi *steady-state*.



Gambar 4.6 Perbandingan grafik sudut rotor = $f(t)$ pada generator G-02 sebelum dan setelah interkoneksi
(Sumber : Hasil simulasi)



Gambar 4.7 Perbandingan grafik sudut rotor = $f(t)$ pada generator G-09 sebelum dan setelah interkoneksi
(Sumber : Hasil simulasi)

2. Simulasi Stabilitas Frekuensi Sebelum dan Sesudah Interkoneksi

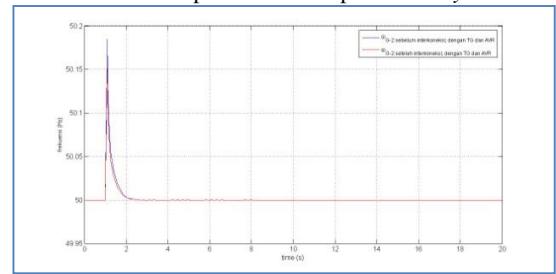
Sebelum interkoneksi, Pada *module-1* gangguan terjadi pada bus 4, sedangkan pada *module-2*, gangguan terjadi pada bus 53. Data yang ditampilkan merupakan data grafik frekuensi.

Tabel 4.10 Tabel Stabilitas Sudut Rotor

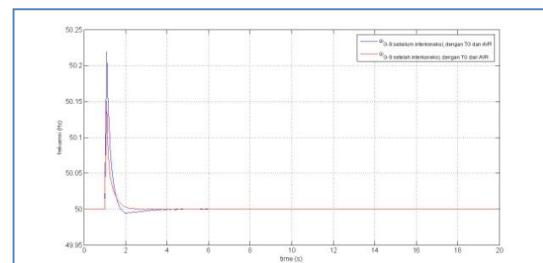
Generator	Sebelum interkoneksi		Setelah interkoneksi	
	f (Hz)	t pemulihan (detik)	f (Hz)	t pemulihan (detik)
G-02	50,18	2,3	50,15	1,7
G-08	50,18	2,2	50,15	1,8
G-09	50,22	3,5	50,15	1,8
G-14	50,22	3,5	50,15	1,8

(sumber: hasil simulasi)

Dari tabel 4.10 diketahui bahwa frekuensi tidak melebihi dari batas yang ditentukan yaitu 51,25 Hz dan lebih rendah dari 48,75 Hz ($\pm 2,5\%$ dari frekuensi nominal). Selain itu, dari gambar 4.8 dan 4.9 diketahui bahwa frekuensi dapat kembali ke posisi *steady-state*.



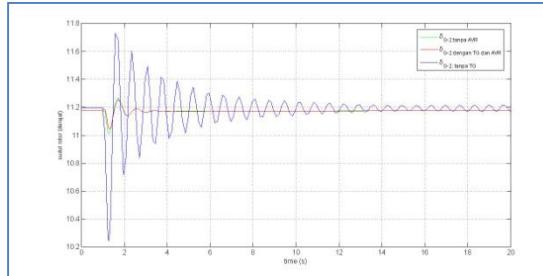
Gambar 4.8 Perbandingan grafik frekuensi = $f(t)$ pada generator G-02 sebelum dan setelah interkoneksi
(Sumber : Hasil simulasi)



Gambar 4.9 Perbandingan grafik frekuensi = $f(t)$ pada generator G-09 sebelum dan setelah interkoneksi
(Sumber : Hasil simulasi)

E. Simulasi Pengaruh Turbin Governor (TG) dan Kontrol AVR pada Stabilitas Sistem Daya Interkoneksi

1. Simulasi Pengaruh TG dan AVR terhadap Stabilitas Sudut Rotor Pada Generator G-2

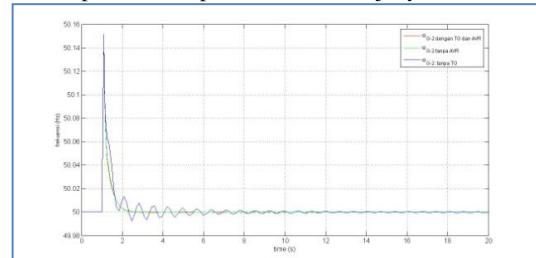


Gambar 4.10 Grafik sudut rotor = $f(t)$ pada generator G-2
(Sumber : Hasil simulasi)

Berdasarkan uraian dari gambar 4.10 dijelaskan bahwa AVR sangat berpengaruh pada pengaturan putaran generator setelah terjadi gangguan, sedangkan TG tidak berpengaruh terhadap stabilitas sudut rotor generator.

2. Simulasi Pengaruh TG dan AVR terhadap Stabilitas Frekuensi Pada Generator G-2

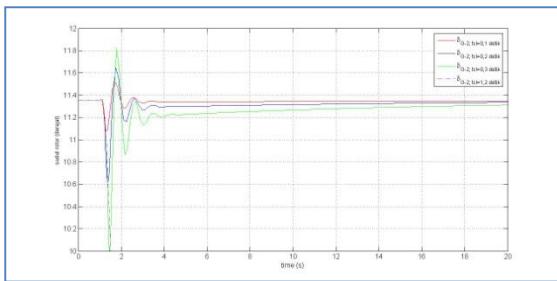
Berdasarkan penjelasan gambar 4.11, dapat diketahui bahwa TG sangat berpengaruh pada pengaturan frekuensi generator setelah terjadi gangguan, sedangkan AVR tidak berpengaruh pada frekuensi generator. Hal tersebut ditunjukkan melalui waktu yang diperlukan generator untuk dapat kembali pada frekuensi kerjanya.



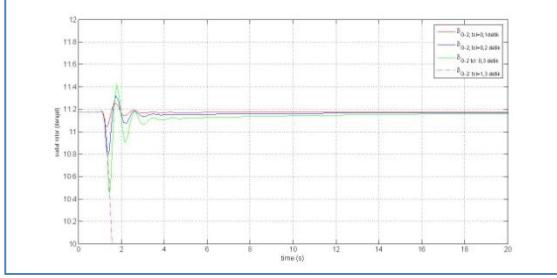
Gambar 4.11 Grafik frekuensi = $f(t)$ pada generator G-2
(Sumber : Hasil simulasi)

F. Waktu Pemutusan Kritis

Dari gambar 4.12 dapat dilihat bahwa generator G-02 sebelum interkoneksi, mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 1,2 detik. Sedangkan pada kondisi setelah interkoneksi, sudut rotor generator ditunjukkan pada Gambar 4.13. Dari gambar tersebut diperoleh hasil bahwa pada kondisi interkoneksi G-02 mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 1,3 detik.



Gambar 4.12 Grafik sudut rotor = $f(t)$ generator G-02 dengan 4 waktu gangguan pada kondisi sebelum interkoneksi
(Sumber : Hasil simulasi)



Gambar 4.13 Grafik sudut rotor = $f(t)$ generator G-02 dengan 4 waktu gangguan pada kondisi setelah interkoneksi
(Sumber : Hasil simulasi)

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan simulasi yang telah dibahas diatas, maka pada penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu:

1. Sistem daya di PT Badak NGL saat kondisi sebelum interkoneksi masih dalam kondisi stabil. Hal tersebut dapat dilihat dari kondisi sudut rotor dan frekuensi generator yang dapat kembali pada operasi normalnya setelah mengalami gangguan yang terjadi sesuai dengan waktu gangguan pada analisis stabilitas tersebut.
2. Saat kondisi interkoneksi, waktu pemulihan sudut rotor (misal generator G-2) yang dibutuhkan sebesar 3,9 detik atau lebih cepat 1 detik dibandingkan sebelum interkoneksi yaitu sebesar 4,9 detik. Sedangkan waktu pemulihan frekuensi saat kondisi interkoneksi lebih cepat 0,6 detik dibandingkan sebelum interkoneksi.
3. Sesuai dari analisis diatas diketahui bahwa pembangkit atau generator yang dilengkapi dengan *Turbine Governor* dapat kembali ke kondisi sinkron lebih cepat dibandingkan generator yang tidak dilengkapi dengan *Turbine Governor*. Sedangkan Kontrol Automatic Voltage Regulator (AVR) tidak berpengaruh terhadap stabilitas sudut rotor generator.

5.2 Saran

Sesuai analisis diatas, maka perlu dilakukan kajian yang lebih mendalam oleh perusahaan apabila akan menerapkan sistem interkoneksi sistem daya di PT Badak NGL.

IV. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arrilaga, J. & Arnold, C.P. 1990. *Computer Analysis of Power Systems*. Chichester : John Wiley & Sons Ltd.
- [2] Cekdin, Cekmas. 2006. *Sistem Tenaga Listrik Contoh Soal & Penyelesaian Dengan Menggunakan Matlab*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- [3] Grainger, John J. & Stevenson, William D. 1994. *Power System Analysis*. Singapore: McGraw-Hill.
- [5] Grigsby, Leonard L. 2007. *Power System Stability and Control*. New York: Taylor & Francis Group, LLC.
- [6] Kadir, Abdul . 1981. *Mesin Tak Serempak*. Jakarta: Penerbit Djambatan.
- [7] Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill.
- [8] Machowski, Jan. 1997. *Power System Dynamic: Stability And Control*. Poland: John Wiley& Sons
- [9] Milano, Federico. 2010. *Power System Modelling and Scripting*. London : Springer.
- [10] Natarajan, Ramasamy. 2002. *Computer-Aided Power System Analysis*. New York : Marcel Dekker, Inc.
- [11] Robandi, Imam, 2006. *Desain Sistem Tenaga Modern*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- [12] Sheldrake, Alan. L. 2003. *Handbook of Electrical Engineering (For Practitioners in the Oil, Gas, and Petrochemical Industry)*. Chichester : John Wiley & Sons Ltd.
- [13] Sujiono, Alex. 2007. "Module Electrical (modul 1 s/d 5) Distribution PT Badak NGL," Bontang: PT Badak NGL.
- [14] IEEE Standard 421.5-1992."Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", August, 1992.

