



TUGAS AKHIR - EE184801

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA SISTEM
HYBRID PLTS-BATERAI-PLTD PADA SISTEM
KELISTRIKAN PULAU TOMIA**

Nabella Setya Yuliani
NRP. 07111745000085

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D
Ir. Sjamsjul Anam, MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan



TUGAS AKHIR - EE184801

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA SISTEM
HYBRID PLTS-BATERAI-PLTD PADA SISTEM
KELISTRIKAN PULAU TOMIA**

Nabella Setya Yuliani
NRP. 07111745000085

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - EE184801

**TRANSIENT STABILITY ANALYSIS OF HYBRID SYSTEM
PLTS-BATTERY-PLTD FOR GRID SYSTEM TOMIA
ISLAND**

Nabella Setya Yuliani
NRP. 07111745000085

Supervisors
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Analisis Kestabilan Transien pada Sistem Hybrid PLTS-Baterai-PLTD pada Sistem Kelistrikan Pulau Tomia**” adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 11 Juli 2019



Nabella Setya Yuliani
NRP. 07111745000085

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA SISTEM *HYBRID*
PLTS-BATERAI-PLTD PADA SISTEM KELISTRIKAN
PULAU TOMIA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui

Dosen Pembimbing I



Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197311192000031001

Dosen Pembimbing II,



Ir. Sjamsjul Anam, MT.
NIP. 196307251990031002



Halaman ini sengaja dikosongkan

Analisis Kestabilan Transien pada Sistem *Hybrid* PLTS-Baterai-PLTD pada Sistem Kelistrikan Pulau Tomia

Nama : Nabella Setya Yuliani
NRP : 07111745000085
Dosen Pembimbing I : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRAK

Pada sistem kelistrikan di Pulau Tomia, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dikoneksikan dengan baterai dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sehingga membentuk suatu sistem hybrid. Kinerja PLTS sangat bergantung pada radiasi matahari dan cuaca. Hal tersebut menyebabkan daya keluaran PLTS selalu fluktuatif. Fluktuasi PLTS akan diredam oleh baterai agar tidak terlalu memengaruhi kinerja PLTD. Namun, dalam kenyataannya baterai masih belum mampu meredam fluktuasi PLTS sehingga menghasilkan daya ekspor yang fluktuatif. Dengan adanya hal tersebut maka dilakukan analisis kestabilan transien untuk mengetahui respon PLTD terhadap sistem saat terjadi fluktuasi. Setelah simulasi dilakukan, terdapat tiga kasus yang tidak boleh terjadi. Pertama, saat PLTS mengeluarkan daya 100% dari kapasitasnya tanpa adanya baterai yang beroperasi menyebabkan hilangnya sinkronisme PLTD terhadap sistem dan terjadinya reverse power pada PLTD. Kedua, saat PLTS beroperasi sebesar 100% dengan adanya baterai menyebabkan PLTD bekerja 24% dari kapasitasnya. Hal tersebut tidak sesuai dengan kapasitas minimum yang dianjurkan, yaitu 30%. Ketiga, saat baterai discharging sebesar 100% dari kapasitasnya, PLTD menyalurkan daya sebesar 26%.

Kata Kunci : Transien, *Hybrid*, PLTS, PLTD, Baterai

Halaman ini sengaja dikosongkan

***Transient Stability Analysis of Hybrid System PLTS-Battery-PLTD for
Grid System Tomia Island***

Name : Nabella Setya Yuliani
ID Number : 07111745000085
Supervisor I : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Supervisor II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRACT

In the grid system of Tomia Island, Solar Power Plant (PLTS) are connected with battery and Diesel Power Plant (PLTD) to form a hybrid system. The performance of PLTS is very dependent on solar radiation and weather. So that, the power output always fluctuates. PLTS fluctuations will be damped by the battery so as not to affect the performance of PLTD too much. However, in fact the battery still not able to reduce the fluctuatuions in the PLTS so that produce fluctuations export power. Cause of that, transient stability is needed to determine the PLTD response to the system when fluctuations occur. After the simulation is done, there are three cases that may occur. First, when solar power plants emit 100% of their capacity without the existence of a battery that operates it causes PLTD loss synchronism to the system and reverse power in the PLTD. Second, when PLTS operates at 100% with presence of batteries, PLTD works 24% of its capacity. This is not in accordance with the recommended capacity, which is 30%. Third, when the battery discharging is 100% of its capacity, PLTD delivers 26% of the power.

Keywords : Transient, Hybrid, PLTS, PLTD, Battery

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Analisis Kestabilan Transien pada Sistem Hybrid PLTS-Baterai-PLTD pada Sistem Kelistrikan Pulau Tomia**. Tugas Akhir ini dibuat untuk memenuhi persyaratan kelulusan di Teknik Elektro FTE-ITS bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang selalu memberikan kemudahan dan kelancaran pada penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir
2. Mama Niah, Ayah Adi, Mbak Nadia dan Mas Paul yang senantiasa memberi dukungan kepada penulis baik berupa moril maupun materil.
3. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. dan Ir. Sjamsjul Anam, MT. yang dengan sabar membimbing penulis.
4. Albab yang dengan baik hati meminjamkan laptopnya dan Arba yang membantu penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
5. Gita dan Farida yang tanpa henti memberi semangat dan cerita penyegaran kalbu kepada penulis.
6. Derry, Catur, Adhestian, Abraham, Bade dan Faisal Azmi yang selalu mau direpotkan oleh penulis.
7. Teman-teman Lintas Jalur 2017 yang berjuang bersama penulis.

Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan penelitian selanjutnya.

Surabaya, 11 Juli 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
Kata Pengantar.....	xv
Daftar Isi	xvii
Daftar Gambar	xxi
Daftar Tabel	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Maksud dan Tujuan.....	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Laporan.....	3
1.7 Relevansi	4
BAB II Sistem <i>hybrid</i> PLTS-Baterai-PLTD.....	5
2.1 Sistem <i>Hybrid</i> PLTS-Baterai-PLTD	5
2.2 <i>Ramp Rate</i>	6
2.3 Klasifikasi Kestabilan.....	7
2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor [4]	7
2.3.2 Kestabilan Frekuensi [5].....	10
2.4 Standar-standar yang Digunakan.....	10
2.4.1. ANSI/IEEE Std 399-1997 [6].....	10
2.4.2. IEEE Std C37.106-2003 [7]	11

BAB III SISTEM KELISTRIKAN PULAU TOMIA DAN PERMODELAN SISTEM	13
3.1 Sistem Kelistrikan Pulau Tomia.....	13
3.2 Spesifikasi PLTD	15
3.3 Permodelan PLTS dan Baterai pada ETAP.....	16
BAB IV Simulasi dan Analisis	19
4.1 Kasus Satu : Daya Keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100%.....	20
4.2 Kasus Dua : Daya Keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100% dan Baterai dalam Keadaan Tidak Beroperasi di Semua Lokasi	25
4.3 Kasus Tiga : Daya Keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 20%.....	30
4.4 Kasus Empat : Daya Keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 20% dan Baterai dalam Keadaan Tidak Beroperasi di Semua Lokasi.....	35
4.5 Kasus Lima : PLTS dalam Keadaan Tidak Beroperasi dan Daya Keluaran Baterai Meningkat dari 10% Menjadi 100%.....	40
4.6 Kasus Enam : PLTS dalam Keadaan Tidak Beroperasi dan Daya Keluaran Baterai Menurun dari 10% Menjadi 0%	45
4.7 Kasus Tujuh : Daya Keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100% dalam Keadaan Beban Meningkat Hingga 923 kW	49
4.8 Kasus Delapan : Daya Keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 20% dalam Keadaan Beban Puncak Meningkat Hingga 923 kW.....	54
4.9 Hasil Rekapitulasi Analisis	59
BAB V PENUTUP.....	61
5.1 Kesimpulan	61

5.2	Saran.....	61
	DAFTAR PUSTAKA.....	63
	LAMPIRAN.....	65
	BIOGRAFI.....	69

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Blok diagram sistem hybrid PLTS-Baterai-PLTD	5
Gambar 2.2 Perbandingan daya keluaran PV terhadap perubahan iradiasi [3].....	7
Gambar 2.3 <i>Single Line Diagram</i> sederhana dari generator dan motor ..	8
Gambar 2.4 Diagram impedansi generator dan motor	8
Gambar 2.5 Diagram Fasor	9
Gambar 2.6 Kurva Daya-Sudut.....	9
Gambar 3.1 Single Line Sistem Kelistrikan di Pulau Tomia	14
Gambar 3.2 Diagram interkoneksi PLTS dan Baterai, Contoh di Kahianga.....	15
Gambar 3.3 Hasil simulasi permodelan lumped load contoh di Dete ...	16
Gambar 3.4 Hasil simulasi saat PV dan baterai ramp down	17
Gambar 3.5 Hasil simulasi saat PV dan baterai ramp up	18
Gambar 4.1 Diagram Aliran Daya	19
Gambar 4.2 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 1	21
Gambar 4.3 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 1	22
Gambar 4.4 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 1	22
Gambar 4.5 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 1	23
Gambar 4.6 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 1	24
Gambar 4.7 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 1	24
Gambar 4.8 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 2	26
Gambar 4.9 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 2	26
Gambar 4.10 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 2.....	27
Gambar 4.11 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 2.....	28
Gambar 4.12 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 2.....	29
Gambar 4.13 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 2.....	29
Gambar 4.14 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 3	31
Gambar 4.15 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 3	31
Gambar 4.16 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 3.....	32
Gambar 4.17 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 3	33
Gambar 4.18 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 3.....	34
Gambar 4.19 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 3.....	34
Gambar 4.20 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 4	36
Gambar 4.21 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 4	36

Gambar 4.22 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 4.....	37
Gambar 4.23 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 4.....	38
Gambar 4.24 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 4.....	39
Gambar 4.25 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 4.....	39
Gambar 4.26 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 5	41
Gambar 4.27 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 5	41
Gambar 4.28 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 5.....	42
Gambar 4.29 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 5.....	43
Gambar 4.30 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 5.....	44
Gambar 4.31 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 5.....	44
Gambar 4.32 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 6	46
Gambar 4.33 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 6	46
Gambar 4.34 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 6.....	47
Gambar 4.35 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 6.....	47
Gambar 4.36 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 6.....	48
Gambar 4.37 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 6.....	49
Gambar 4.38 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 7	50
Gambar 4.39 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 7	51
Gambar 4.40 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 7.....	51
Gambar 4.41 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 7.....	52
Gambar 4.42 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 7.....	53
Gambar 4.43 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 7.....	54
Gambar 4.44 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 8	55
Gambar 4.45 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 8	55
Gambar 4.46 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 8.....	56
Gambar 4.47 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 8.....	57
Gambar 4.48 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 8.....	58
Gambar 4.49 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 8.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Batas Frekuensi dan Waktu Minimum.....	11
Tabel 3.1 Spesifikasi PLTS.....	13
Tabel 3.2 Spesifikasi Baterai.....	13
Tabel 3.3 Spesifikasi PLTD.....	15
Tabel 4.1 Kasus yang akan dianalisis.....	20
Tabel 4.2 Hasil Rekapitulasi Analisis.....	59

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya kebutuhan listrik, kebijakan lingkungan, kenaikan harga BBM, menipisnya bahan bakar fosil serta permintaan pelanggan untuk memiliki kualitas daya dan keandalan yang lebih baik memaksa industri tenaga listrik memanfaatkan energi baru terbarukan sebagai opsi energi alternatif sebagai pusat sistem daya [1]. Salah satu energi baru terbarukan yang dimanfaatkan adalah energi surya. Banyak keuntungan yang didapatkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) antara lain produksi energi bersih, ramah lingkungan, mudah didapatkan dan tidak memiliki biaya bahan bakar. Namun, kinerja PLTS sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari yang menyebabkan PLTS tidak dapat diandalkan. Oleh sebab itu, PLTS dapat dihubungkan ke sumber daya pembangkit konvensional agar pasokan listrik tetap dapat memenuhi permintaan beban [1].

PLTS yang telah diintegrasikan dengan pembangkit konvensional atau biasa disebut dengan sistem *hybrid* telah diaplikasikan di Pulau Tomia, Sulawesi Tenggara. Sistem *hybrid* di Pulau Tomia terdiri dari PLTS, Baterai dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Terdapat empat PLTS yang terbagi dalam empat lokasi yaitu Kahianga, Kulati, Dete dan Lamanggau dengan kapasitas total PLTS sebesar 800 kW. PLTS tersebut dihubungkan dengan PLTD berkapasitas 1400 kW.

Setiap lokasi PLTS memiliki variasi radiasi matahari yang berbeda pada tiap waktu sehingga menyebabkan terjadinya fluktuasi pada daya keluaran dari PLTS tersebut. Fluktuasi yang ada mempengaruhi daya keluaran yang harus dihasilkan oleh PLTD. Ketika PLTS menghasilkan daya keluaran kecil maka PLTD harus bekerja lebih keras untuk menghasilkan daya keluaran yang besar agar tetap dapat memenuhi permintaan beban. Ketika PLTS menghasilkan daya keluaran besar maka daya keluaran PLTD dapat disesuaikan. Kerja PLTD yang tidak stagnan dapat menyebabkan umur PLTD menjadi lebih pendek. Untuk meredam fluktuasi yang ada maka diperlukan adanya baterai. Baterai akan mem-*back up* PLTS, saat daya keluaran PLTS bernilai kecil maka baterai akan *discharging*, sehingga PLTD tidak perlu berusaha keras untuk memenuhi

permintaan beban. Namun, terkadang saat *discharging*, tegangan akan berjalan balik menuju pembangkit atau biasa disebut dengan *reverse power*.

Untuk itu, dibutuhkan analisis kestabilan transien sistem untuk mengetahui respon PLTD saat terjadi fluktuasi baik dari segi sudut rotor maupun kecepatan. Sehingga dapat dilakukan antisipasi jika terjadi hal yang tidak diharapkan seperti halnya hilangnya sinkronisme dan frekuensi yang melebihi batas. Juga agar dapat mengetahui bagaimana aliran daya di sistem kelistrikan Pulau Tomia.

1.2 Perumusan Masalah

Kerja PLTS sangat bergantung pada radiasi matahari, sedangkan radiasi matahari tidak pernah stabil sehingga daya keluaran PLTS menjadi fluktuatif. Instabilitas tersebut menyebabkan PLTD harus bekerja lebih keras saat daya keluaran PLTS bernilai kecil. Agar fluktuasi PLTS tidak terlalu berpengaruh pada PLTD maka dibutuhkan baterai. Baterai akan mendukung PLTS saat daya keluaran yang dihasilkan terlalu kecil. PLTD yang bekerja sesuai dengan pengaruh PLTS juga berakibat buruk pada *lifetime* PLTD tersebut. Untuk itu, sangat penting untuk mengetahui kinerja PLTD saat fluktuasi berlangsung. Dan mengetahui arah aliran daya pada sistem kelistrikan Pulau Tomia.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan permasalahan dalam Tugas Akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut :

1. *Software* yang digunakan adalah ETAP 7.0.
2. Analisis dilakukan pada sistem kelistrikan *hybrid* di Pulau Tomia.
3. Simulasi yang dilaksanakan mengenai sudut rotor dan frekuensi.

1.4 Maksud dan Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah untuk mendapatkan simulasi fluktuasi pada PLTS sehingga dapat mengetahui respon PLTD dalam sistem. Sehingga dapat mengetahui antisipasi yang benar saat terjadi kesalahan.

1.5 Metodologi

Metodologi yang dilakukan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur
Studi literatur yang dilakukan adalah dengan mempelajari materi dan literatur yang ada berkaitan dengan sistem *hybrid*, analisis kestabilan transien dan sistem kelistrikan di Pulau Tomia.
2. Permodelan Sistem
Dalam tahap ini akan ditentukan permodelan jaringan, pembangkit dan perubahan sistem. Memperhitungkan distribusi Iradian matahari, permodelan pembangkit dan gangguan yang ada. Digunakan untuk menganalisis kestabilan transien.
3. Simulasi dan Pengambilan Data
Menyimulasikan keseluruhan sistem untuk menganalisis kestabilan transien. Dengan menggunakan *software* ETAP 7.0
4. Evaluasi dan Analisis Data
Menganalisis data yang telah disimulasi untuk mengetahui kestabilan transien pada sistem kelistrikan di Pulau Tomia. Mengevaluasi respon PLTD saat terjadi fluktuasi pada PLTS. Menganalisis aliran daya pada sistem.
5. Kesimpulan
Menyimpulkan analisis data yang didapatkan. Kesimpulan yang telah didapatkan tertuang dalam buku Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Laporan

Pembahasan Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan

Pada bab pendahuluan, menjelaskan mengenai latar belakang pemilihan topik, perumusan masalah dan batasannya. Juga membahas tentang tujuan, metodologi, sistematika laporan dan relevansi dari hasil penelitian yang dilakukan.

Bab II Dasar Teori

Pada bab ini akan menjelaskan mengenai sistem kestabilan, kestabilan transien dan sistem *hybrid* PLTS-Baterai-PLTD.

- Bab III Sistem Kelistrikan Pulau Tomia**
Menjelaskan mengenai data kelistrikan di Pulau Tomia antara lain : *Single Line Diagram* (SLD), kapasitas dan pembangkitan dan data beban.
- Bab IV Simulasi dan Analisis**
Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil simulasi dan analisis data yang dilaksanakan. Simulasi dilaksanakan dengan menggunakan *software* ETAP 7.0.
- Bab V Penutup**
Bab ini akan menjelaskan mengenai kesimpulan yang didapatkan dari hasil analisis kestabilan transien. Dan juga saran diperuntukkan yang diperlukan dalam pengerjaan.

1.7 Relevansi

Relevansi Tugas Akhir ini antara lain sebagai berikut :

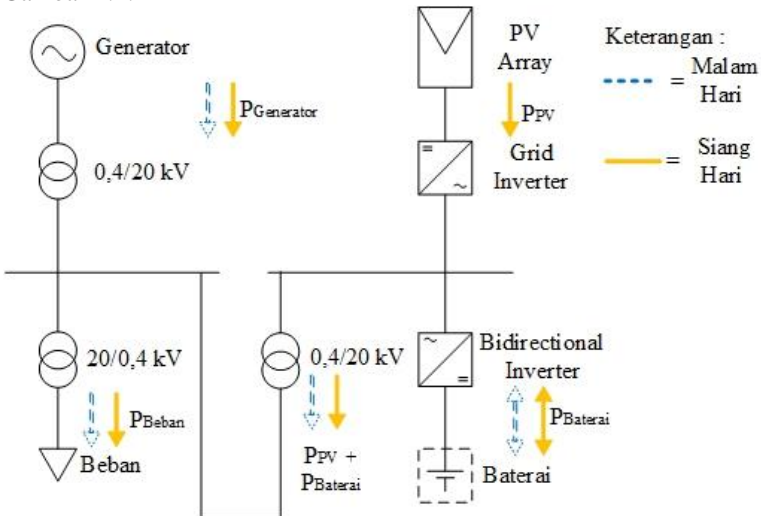
1. Dapat menjadi referensi penunjang untuk pengerjaan sistem kelistrikan di Pulau Tomia.
2. Dapat menjadi referensi penunjang untuk analisis kestabilan transien sistem.
3. Dapat menjadi referensi penunjang untuk penelitian berikutnya.

BAB II

SISTEM *HYBRID* PLTS-BATERAI-PLTD

2.1 Sistem *Hybrid* PLTS-Baterai-PLTD

Istilah *hybrid* dapat digunakan secara luas untuk menunjukkan sistem PV yang digunakan bersama satu atau lebih sumber daya tambahan. Secara tradisional ini berarti sumber kedua seperti turbin angin atau hidroelektrik, bagaimanapun banyak sistem PV modern menggunakan sumber daya tambahan yang dapat dilepas (sesuai permintaan) seperti generator berbahan bakar fosil [2]. Blok diagram sistem *hybrid* PLTS-Baterai-PLTD yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Blok diagram sistem hybrid PLTS-Baterai-PLTD

Di dalam sebuah sistem *hybrid* PLTS-baterai-PLTD terdiri dari modul PV, *Grid* Inverter, Bidirectional Inverter, baterai dan PLTD. Hal tersebut dimaksudkan agar energi dapat tersedia secara terus-menerus sepanjang hari.

PV Array merupakan bagian dari PLTS yang berfungsi sebagai pengonversi energi dari energi panas radiasi matahari menjadi energi listrik. Keluaran dari PV Array adalah listrik arus searah atau DC (*Direct*

Current). Nantinya, keluaran dari inverter akan dikonversikan oleh *Grid Inverter*. *Grid Inverter* akan mengubah listrik DC menjadi bentuk sinusoidal arus bolak-balik atau AC (*Alternating Current*). *Grid Inverter* hanya akan mengonversi daya dari PV menuju ke *grid*. Dan tidak berlaku sebaliknya.

Baterai digunakan sebagai tempat penyimpanan energi. Ketika PV dalam keadaan beroperasi maka, baterai akan menyerap daya dari PV atau bisa dikatakan baterai dalam kondisi *charging*. Selain menyerap daya, baterai juga dapat menyuplai daya pada *grid*. Oleh sebab itu, inverter yang digunakan pada baterai adalah *bidirectional inverter*. *Bidirectional inverter* memiliki kerja ganda yaitu mengonversi AC menjadi DC saat baterai dalam kondisi *charging* dan mengonversi DC menjadi AC saat baterai dalam kondisi *discharging*. Inverter yang digunakan memiliki *power factor* 100% baik untuk *grid inverter* maupun *bidirectional inverter*.

Gambar panah pada Gambar 2.1 menunjukkan aliran daya. Warna oranye terjadi saat siang hari sedangkan warna biru menunjukkan terjadi saat malam hari. Sesuai dengan aliran daya yang ada, bahwa daya *output* PV dapat dialirkan ke beban dan ke baterai, sedangkan daya *output* Generator PLTD hanya disalurkan ke beban. Sehingga dapat dirumuskan bahwa :

- a. Saat siang hari

$$P_{Beban} = P_{Generator} + P_{PV} + P_{Baterai} \quad (2.1)$$

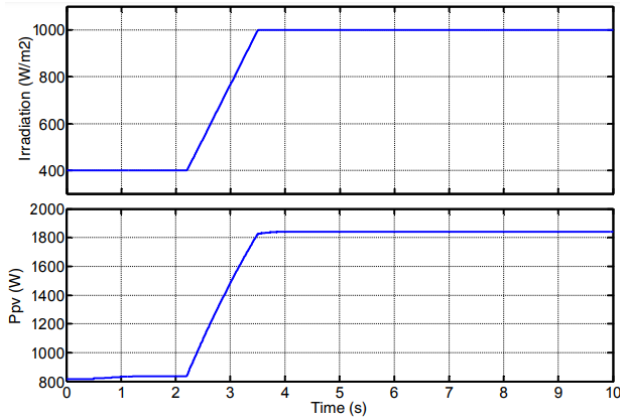
- b. Saat malam hari

$$P_{Beban} = P_{PLTD} + P_{Baterai} \quad (2.2)$$

Pada sistem *hybrid* PLTS-Baterai-PLTD daya *output* PLTD dipertahankan selalu sesuai dengan 30% sampai dengan 40% dari daya *rating*. Untuk mempertahankan *lifetime* dari PLTD tersebut.

2.2 Ramp Rate

Setiap pembangkit memiliki batas dari laju perubahan daya keluaran atau biasa disebut dengan *ramp rate*. Pada pembangkit PLTD, waktu *ramp rate* bergantung pada bahan bakar yang ada. Diesel memiliki waktu *ramping* yang cepat karena proses pembakarannya pun cukup cepat. Sedangkan PLTS memiliki waktu *ramping* yang bergantung pada *irradiance* matahari seperti yang tertera pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Perbandingan daya keluaran PV terhadap perubahan iradiasi [3]

Seperti yang tertera pada Gambar 2.2 daya keluaran PV berbanding lurus dengan iradiasi matahari. Perubahan iradiasi matahari memiliki waktu yang nantinya merupakan waktu *ramping* bagi PV.

2.3 Klasifikasi Kestabilan

Klasifikasi kestabilan dapat dibagi menjadi tiga yaitu :

- a. Kestabilan sudut rotor
- b. Kestabilan frekuensi
- c. Kestabilan tegangan

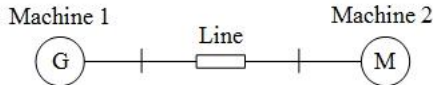
Namun, dalam Tugas Akhir ini yang menjadi pokok bahasan adalah mengenai kestabilan sudut rotor dan kestabilan frekuensi. Sehingga pada Bab II hanya akan dibahas mengenai kestabilan sudut rotor dan kestabilan frekuensi.

2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor [4]

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan mesin sinkron yang terinterkoneksi dengan sistem tenaga untuk mempertahankan kesinkronannya. Faktor utama dalam permasalahan ini adalah pada

saat daya keluaran dari mesin sinkron yang bervariasi menyebabkan rotor berosilasi.

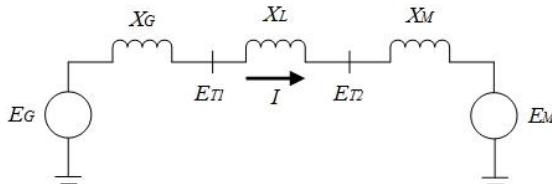
Karakteristik terpenting dalam kestabilan sistem tenaga adalah hubungan antara daya keluaran dan posisi sudut rotor dari mesin sinkron. Untuk mengilustrasikan dapat dilihat pada sistem sederhana yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Single Line Diagram sederhana dari generator dan motor

Pada Gambar 2.3 generator dan motor terhubung melewati saluran. Karena nilai kapasitansi dan reaktansi terlalu kecil, maka dapat diabaikan. Daya yang ditransfer dari generator ke motor merupakan fungsi dari sudut pemisah (δ) antara rotor dari dua mesin. Sudut pemisah disebabkan oleh tiga komponen yaitu sudut internal generator, perbedaan sudut antara terminal tegangan generator dan motor dan sudut internal motor.

Pada kondisi medan putar stator didahului oleh rotor generator disebut dengan sudut generator internal δ_G . Sudut tegangan motor yang didahului oleh tegangan generator dinyatakan sebagai δ_L . Dan δ_M adalah sudut motor internal yang terjadi ketika medan putar stator mendahului rotor. Untuk menentukan hubungan antara daya terhadap sudut maka dibentuklah suatu model sederhana sebagai diagram impedansi. Diagram impedansi tertera pada Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Diagram impedansi generator dan motor

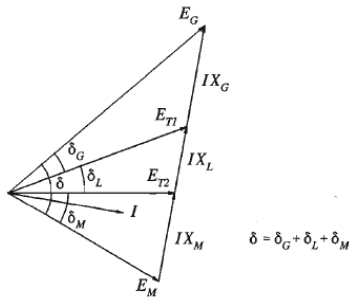
Diagram fasor untuk mengidentifikasi hubungan antara tegangan generator E_G dan motor E_M ditunjukkan pada Gambar 2.5.

Sesuai dengan diagram fasor maka daya yang ditransfer dari generator ke motor dapat dituliskan dengan persamaan seperti berikut :

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (2.8)$$

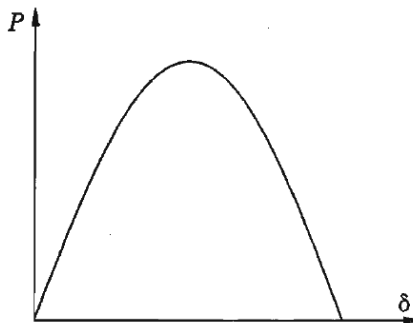
Dengan nilai X_T adalah reaktansi total dengan persamaan

$$X_T = X_G + X_M + X_L \quad (2.9)$$



Gambar 2.5 Diagram Fasor

Hubungan antara daya terhadap sudut rotor, dapat digambarkan dalam grafik pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kurva Daya-Sudut

Berdasarkan Gambar 2.6, terlihat hubungan non linier antara daya dan sudut. Ketika sudutnya nol, maka tidak ada daya yang dikirim. Saat sudutnya meningkat, daya yang dikirim akan

meningkat pula. Titik maksimum berlangsung hingga 90° . Peningkatan sudut daya di atas 90° menghasilkan penurunan daya yang dapat dikirim. Besarnya daya maksimum berbanding lurus dengan tegangan internal mesin dan berbanding terbalik dengan reaktansi terhadap nilai tegangan.

2.3.2 Kestabilan Frekuensi [5]

Kestabilan frekuensi adalah kemampuan suatu sistem tenaga untuk mempertahankan nilai frekuensi ketika terjadi gangguan besar akibat ketidakseimbangan antara suplai daya dan beban. Gangguan yang dapat menyebabkan instabilitas frekuensi adalah perubahan pembangkit atau beban yang signifikan. Titik keseimbangan antara suplai daya sistem dan beban harus dipertahankan untuk menjaga sistem dari generator *outage*.

Klasifikasi kestabilan frekuensi dibagi menjadi dua yaitu jangka panjang dan pendek. Kestabilan frekuensi jangka panjang disebabkan oleh kontrol *governor* tidak bekerja terhadap gangguan. Kestabilan frekuensi jangka pendek adalah terjadinya perubahan beban yang besar sehingga generator tidak mampu untuk memenuhi kebutuhan daya pada sistem.

2.4 Standar-standar yang Digunakan

Terdapat standar-standar yang digunakan untuk melakukan analisis kestabilan transien. Antara lain adalah standar ANSI/IEEE Std 399-1997 yang digunakan sebagai acuan untuk menganalisis kestabilan sudut rotor dan IEEE Std C37.106-2003 untuk menganalisis kestabilan frekuensi.

2.4.1. ANSI/IEEE Std 399-1997 [6]

Stabilitas transien berarti kemampuan sistem tenaga untuk mengalami perubahan tiba-tiba dalam pembangkitan, beban atau karakteristik sistem tanpa kehilangan sinkronisasi yang berkepanjangan. Pada generator, peningkatan torsi *input* hingga sudut rotor melebihi 90° , akan menyebabkan *slip pole* dan akan kehilangan sinkronisasi terhadap sistem dengan asumsi beban elektrik konstan. Ketika terjadi gangguan, sudut rotor dapat berhenti dengan sudut rotor melewati 90° . Atau pada saat keadaan transien

ayunan sudut rotor dapat melebihi 180°. Jika gangguan yang terjadi tidak segera diatasi, maka akan terus terjadi *slipping pole* dan dalam waktu dekat akan kehilangan sinkronisasi terhadap sistem.

Jika *overshoot* transien dari sudut rotor tidak melebihi 180°, atau jika gangguan yang menyebabkan ayunan rotor dilepas dnegan segera, mesin dapat tetap sinkron dengan sistem. Sudut rotor kemudian beresilasi dengan ayunan yang menurun hingga stabil pada nilai akhirnya (kurang dari 90°). Osilasi diredam oleh beban listrik dan kerugian mekanis dan listrik di mesin dan sistem, terutama di belitan peredam mesin.

2.4.2. IEEE Std C37.106-2003 [7]

WECC (*Western Elevation Coordinating Council*) menyaratkan bahwa perlindungan frekuensi generator yang terhubung ke grid harus memiliki jangka waktu minimum yang ditentukan dan disediakan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Batas Frekuensi dan Waktu Minimum

Batas <i>Underfrequency</i>	Batas <i>Overfrequency</i>	Waktu Minimum
60,0 – 59,5 Hz	60,0 – 60,5 Hz	N/A
59,4 – 58,5 Hz	60,6 – 61,5 Hz	3 menit
58,4 – 57,9 Hz	61,6 – 61,7 Hz	30 detik
57,8 – 57,4 Hz		7,5 detik
57,3 – 56,9 Hz		45 cycles
56,8 – 56,5 Hz		7,2 cycles
Kurang dari 56,4 Hz	Lebih dari 61,7 Hz	<i>Instantaneous Trip</i>

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PULAU TOMIA DAN PERMODELAN SISTEM

3.1 Sistem Kelistrikan Pulau Tomia

Pada sistem kelistrikan Pulau Tomia terpasang sistem *hybrid* PLTS-Baterai-PLTD. Dengan empat PLTS tersebar di empat lokasi yaitu Kahianga, Kulati, Dete dan Lamanggau. PLTS tersebut terhubung dengan PLTD dengan sistem interkoneksi AC. Sehingga diharapkan dapat memenuhi kebutuhan energi di Pulau Tomia.

PLTS-Baterai-PLTD yang telah diinterkoneksi melalui empat lokasi yang berbeda-beda. Pembagian lokasi keempat PLTS dan PLD digambarkan dalam suatu *single line diagram* yang tertera pada Gambar 3.1. Untuk lebih detailnya, pembagian lokasi PLTS beserta kapasitasnya akan tertera pada Tabel 3.1.

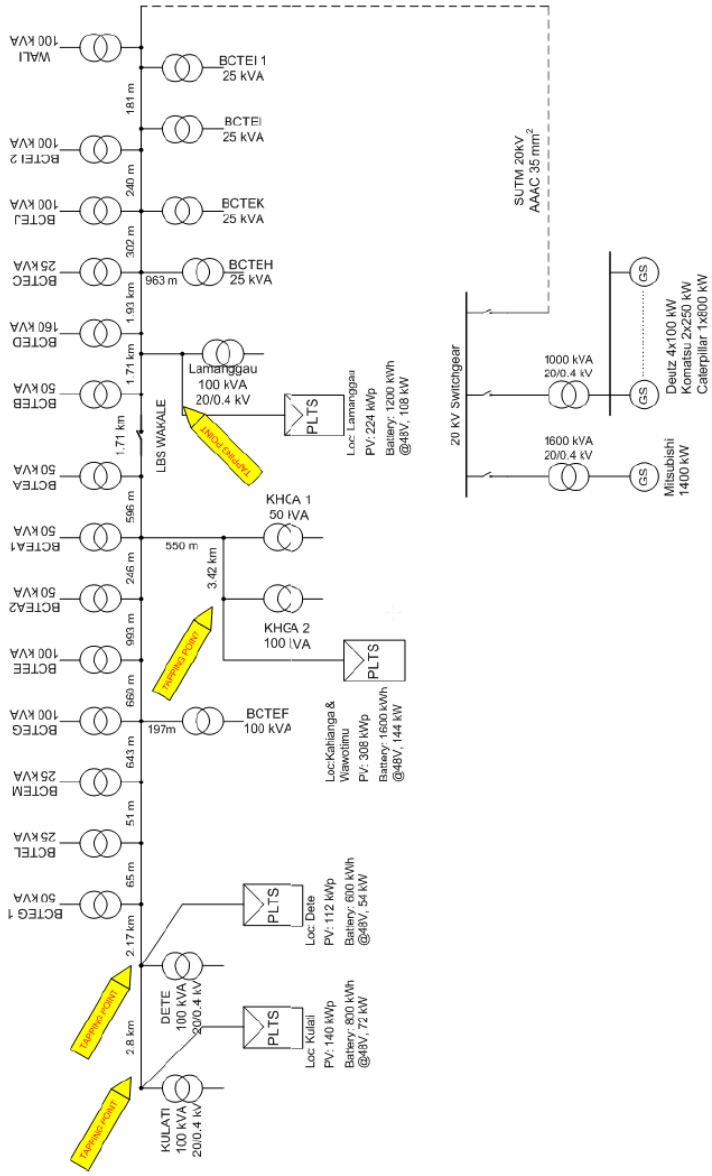
Tabel 3.1 Spesifikasi PLTS

Lokasi	Jumlah Cluster	Kapasitas PV (kWp)	Grid-Inverter (kVA)
Kahianga	11	308,6	275
Kulati	5	140,3	125
Dete	4	112,2	100
Lamanggau	8	224,4	200

Pada setiap PLTS terdapat baterai sebagai *support system*. Tujuan dari adanya baterai adalah sebagai peredam fluktuasi PLTS. Sehingga diharapkan PLTD dapat bekerja dengan stabil. Spesifikasi baterai yang terpasang tertera pada Tabel 3.2.

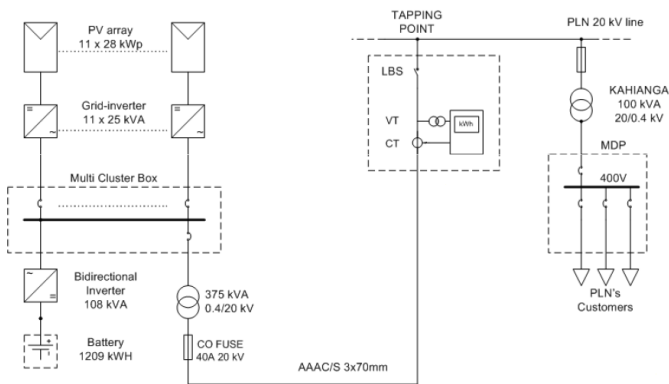
Tabel 3.2 Spesifikasi Baterai

Lokasi	Jumlah Cluster	Kapasitas Baterai (kWh)	Bidirectional-Inverter (kVA)
Kahianga	8	1612	144
Kulati	4	806	72
Dete	3	605	54
Lamanggau	6	1209	108



Gambar 3.1 Single Line Sistem Kelistrikan di Pulau Tomia

PLTS terdiri atas PV array, grid inverter, multi cluster box, bidirectional inverter dan baterai. Output dari PV array akan terdistribusi ke baterai dan ke beban. Bidirectional inverter dipasang pada baterai, dapat digunakan sebagai inverter dan penyearah. Antara PV array dan baterai diintegrasikan melalui multi cluster box. Yang kemudian disalurkan menuju trafo step up agar tegangan sama dengan 20 kV. Dengan pengaman berupa fuse dan LBS. LBS, CT dan PT diletakkan pada sisi tapping point. Pada Gambar 3.2 ditunjukkan diagram interkoneksi PLTS dan Baterai.



Gambar 3.2 Diagram interkoneksi PLTS dan Baterai, Contoh di Kahianga

3.2 Spesifikasi PLTD

PLTD yang digunakan berkapasitas 1,4 MW dengan merk Mitsubishi. Spesifikasi PLTD yang digunakan pada Sistem Kelistrikan Tomia akan tertera pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Spesifikasi PLTD

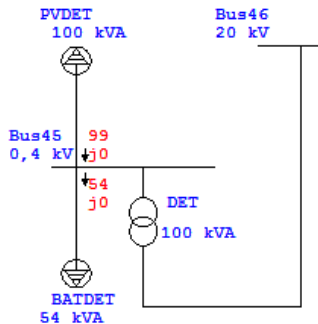
Machine Data		Exciter Data	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Ra	1	Type	1
Xd''	25	KA	250
Xd'	35	KE	1

Tabel Lanjutan dari Tabel 3.3

<i>Machine Data</i>		<i>Exciter Data</i>	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Xd	99	KF	0,06
Xq''	33	TR	0,005
Xq'	66	TA	0,03
Xq	66	TE	1,25
Xl	15	TF	1
Tdo''	0,03	VRmax	17,5
Tdo'	5,25	VRmin	-15,5
Tqo''	0,05	Semax	1,65
Tqo'	0	SE75	1,13
H	0,925	Efdmax	6,6

3.3 Permodelan PLTS dan Baterai pada ETAP

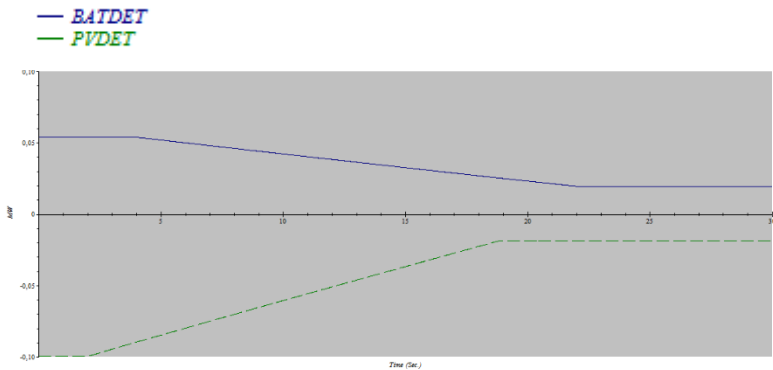
Seperti yang tertera pada Bab II Subbab 2.2 mengenai *ramp rate*, setiap pembangkit memiliki *ramp rate* masing-masing. Namun di dalam ETAP, tidak ada simulasi mengenai *ramp rate* untuk PV, baterai dan inverter. Untuk itu dicari permodelan lain yang dapat mensimulasikan perubahan radiasi dengan waktu *ramping* tertentu. Pada kasus ini, PV dan *grid* inverter dijadikan satu kesatuan yang akan dimodelkan menjadi *lumped load*. Dengan *power factor* inverter 100% dan efisiensi 89,3%. Begitu pula dengan permodelan untuk baterai dan *bidirectional* inverter.



Gambar 3.3 Hasil simulasi permodelan *lumped load* contoh di Dete

Lumped load akan didesain bernilai negatif apabila PV maupun baterai dioperasikan sebagai sumber tenaga dan akan didesain positif saat baterai dioperasikan sebagai beban atau menyerap daya dari PV. Hal tersebut disesuaikan dengan arah aliran daya yang telah disesuaikan dengan simulasi yang ada. Apabila *lumped load* bernilai positif maka arah aliran daya akan masuk menuju *lumped load* dan apabila bernilai negatif maka arah aliran daya akan keluar menuju *grid* seperti yang tertera pada Gambar 3.3.

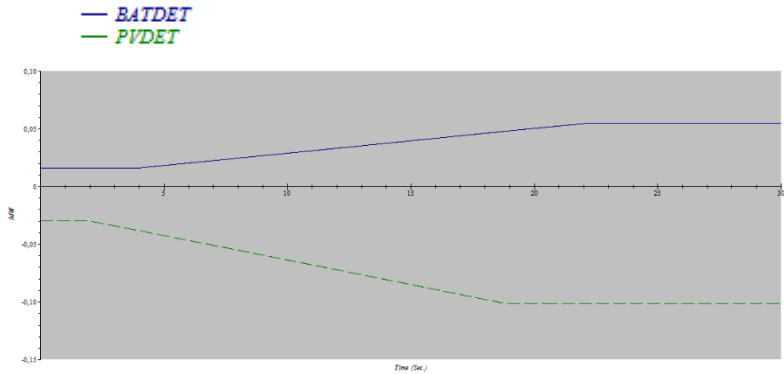
Tipe *lumped load* yang digunakan adalah konstan Z dengan PF 100%. *Output* awal yang diinginkan akan dicantumkan dalam kolom *design* pada *tab rating*. Selanjut akan disimulasikan saat *photovoltaic* dan baterai sedang *ramp up* ataupun *ramp down*. Skenario yang diinginkan akan dituliskan pada *event* pada *study case transient stability*. Salah satu hasil simulasi saat PV dan baterai *ramp down* tertera pada Gambar 3.4 dan hasil simulasi saat PV dan baterai *ramp up* tertera pada Gambar 3.5.



Gambar 3.4 Hasil simulasi saat PV dan baterai *ramp down*

Pada Gambar 3.4 PV terdapat dalam grafik dengan nilai negatif yang dapat diartikan bahwa PV sedang menyuplai daya. Sedangkan baterai terdapat dalam grafik dengan nilai positif maka dapat diartikan bahwa Baterai sedang *charging*. PV dan baterai dalam keadaan *ramp down*.

Pada Gambar 3.5 PV terdapat dalam grafik dengan nilai negatif yang dapat diartikan bahwa PV sedang menyuplai daya. Sedangkan baterai terdapat dalam grafik dengan nilai positif maka dapat diartikan bahwa baterai sedang *charging*. PV dan baterai dalam keadaan *ramp up*.

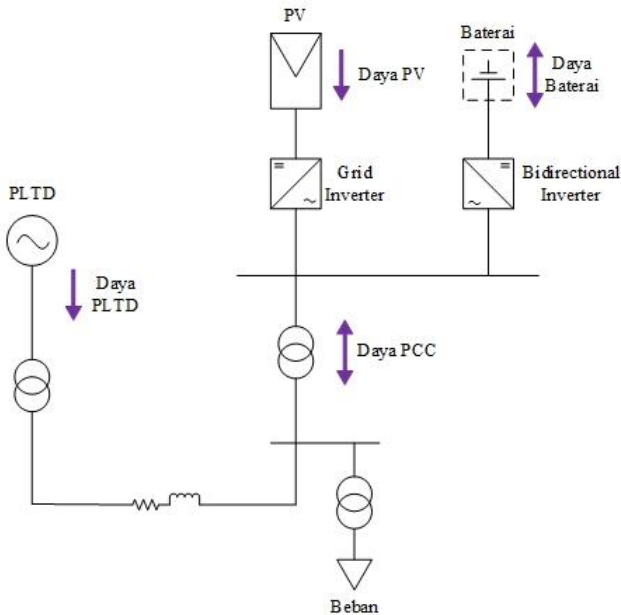


Gambar 3.5 Hasil simulasi saat PV dan baterai *ramp up*

Ramp up maupun *ramp down* baterai mengikuti keadaan PV. Namun, pada sistem kelistrikan Pulau Tomia belum ada kontrol yang dapat membuat PV dan Baterai memiliki waktu *ramping* yang sama. Ketika PV mulai *ramp up* atau *ramp down* maka baterai akan mulai *ramp up* atau *ramp down* beberapa detik setelahnya.

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini, akan dijabarkan hasil simulasi dari beberapa kasus yang dapat menyebabkan adanya instabilitas pada Sistem Kelistrikan Pulau Tomia. Pada satu subbab akan dijelaskan bagaimana pengaruh daya keluaran PV terhadap kinerja PLTD dan hubungan antara respon sudut rotor terhadap daya keluaran dari PLTD beserta standarnya. Juga menjelaskan tentang respon frekuensi bus yang mendapat pengaruh dari kecepatan generator. Pada setiap subbab juga akan dijelaskan mengenai besar daya PCC apakah akan terjadi penyerapan atau suplai pada *grid* dari hubungan antara baterai dan PV. Daya PCC yang dimaksud akan tertera pada Gambar 4.1. Dan kasus yang dianalisis tercantum dalam Tabel 4.1.



Gambar 4.1 Diagram Aliran Daya

Tabel 4.1 Kasus yang akan dianalisis

No.	No. Kasus	Nama Kasus
1.	Kasus 1	Daya keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100%
2.	Kasus 2	Daya keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100% dan Baterai Tidak Beroperasi
3.	Kasus 3	Daya keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 20%
4.	Kasus 4	Daya keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 20% dan Baterai Tidak Beroperasi
5.	Kasus 5	PLTS dalam Keadaan Tidak Beroperasi dan Daya Keluaran Baterai Meningkat dari 10% Menjadi 100%
6.	Kasus 6	PLTS dalam Keadaan Tidak Beroperasi dan Daya Keluaran Baterai Menurun dari 10% Menjadi 0%
7.	Kasus 7	Daya Keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100% dalam Keadaan Beban Meningkat Hingga 923 kW
8.	Kasus 8	Daya Keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 30% dalam Keadaan Beban Meningkat Hingga 923 kW

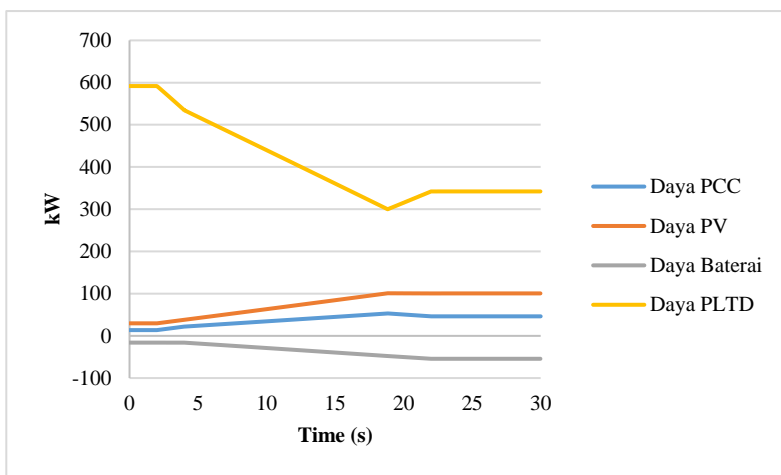
4.1 Kasus Satu : Daya Keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100%

Pada kasus satu, dilakukan simulasi dengan anggapan terjadi pada siang hari yang terik. Sehingga semua PV dapat menghasilkan daya sebesar 100% dari kapasitasnya dan menyebabkan baterai juga menyerap daya sebesar 100% dari kapasitasnya. Generator dioperasikan dalam mode *swing* agar kebutuhan beban tetap terpenuhi. Simulasi *ramp up* PV dilakukan pada detik kedua dan simulasi *ramp up* baterai dilakukan pada detik ke empat. Hal tersebut dikarenakan, pada kondisi nyata, pada sistem kelistrikan di Pulau Tomia masih belum ada kontrol yang membuat PV dan baterai dapat *ramp up* secara bersamaan.

Pada saat adanya perbedaan waktu *ramping* maka dapat terjadi penyerapan daya dari *grid* yang disebut dengan daya PCC yang menuju ke baterai. Hal tersebut menjadi salah satu konsentrasi pada Tugas Akhir

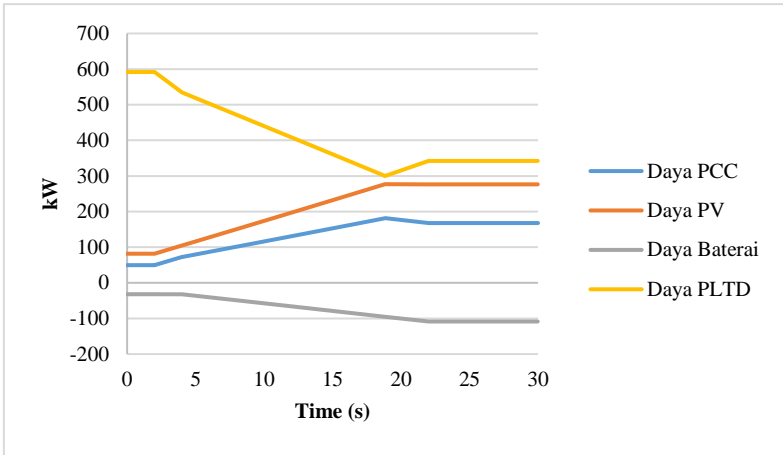
ini. Daya PCC pada masing-masing lokasi PLTS akan ditunjukkan oleh grafik yang tertera pada Gambar 4.2 hingga Gambar 4.5.

Gambar 4.2 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Dete. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Dete yang menuju *grid* sebesar 46,235 kW.

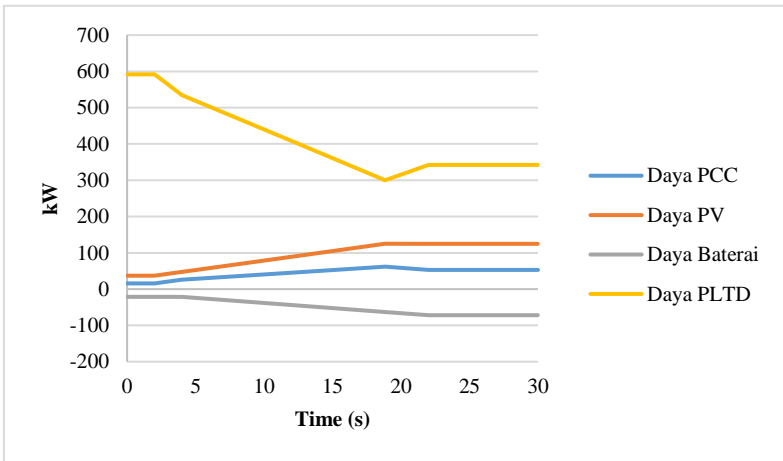


Gambar 4.2 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 1

Gambar 4.3 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kahiang. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kahiang yang menuju *grid* sebesar 167,769 kW.



Gambar 4.3 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 1

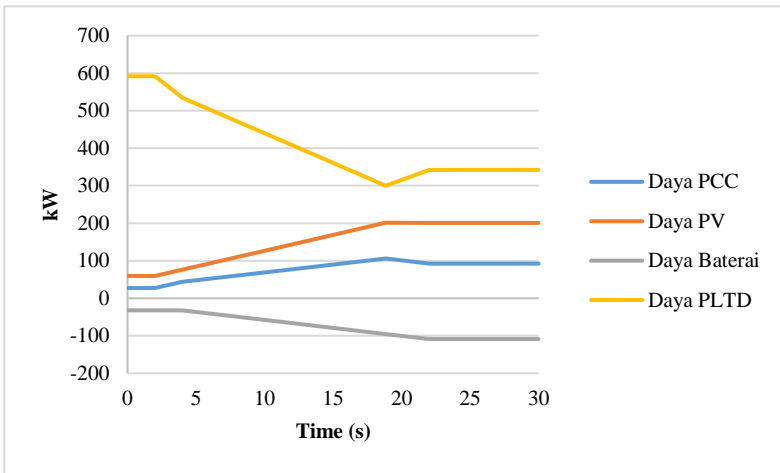


Gambar 4.4 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 1

Gambar 4.4 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kulati. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus

PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kulati yang menuju *grid* sebesar 52,8883 kW.

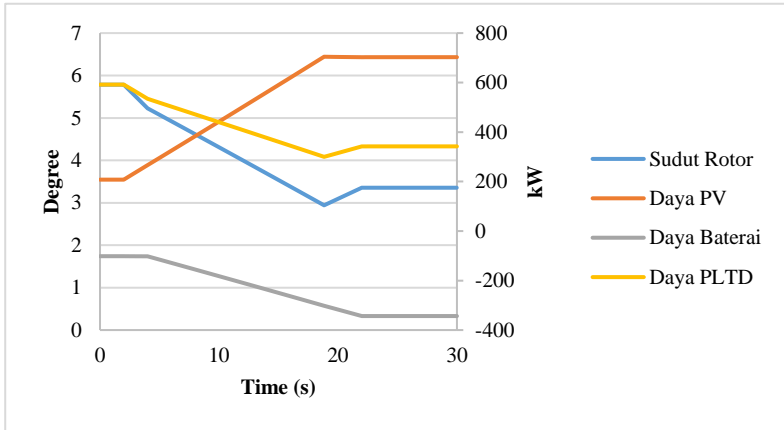
Gambar 4.5 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Lamanggau. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Lamanggau yang menuju *grid* sebesar 92,423 kW.



Gambar 4.5 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 1

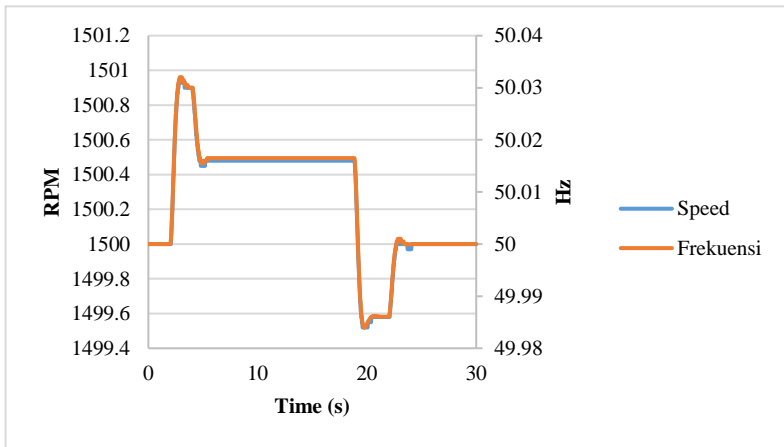
Pada Gambar 4.6 menjelaskan bagaimana respon dari PLTD ketika terjadi kenaikan daya *output* PV pada detik kedua baik dari segi daya *output* PLTD dan sudut rotor PLTD. Dapat dilihat bahwa semakin besarnya persentase daya PV maka semakin kecil persentase daya dari PLTD. Pada kasus ini, PLTD akan beroperasi sebesar 24% dari kapasitasnya, semakin sedikit daya yang dibangkitkan oleh PLTD maka nilai sudut rotor akan semakin kecil. Nilai sudut rotor stabil pada nilai 3,355°. Menurut ANSI/IEEE Std 399-1997, sudut rotor dikatakan dalam *range* aman apabila pada saat osilasi nilai sudut kurang dari 180° dan pada saat *steady state* sudut rotor kurang dari 90°. Dengan demikian, maka pada operasi PLTD sebesar 24%, sudut rotor dalam *range* aman untuk

dioperasikan. Namun, hal tersebut tidak sesuai dengan kapasitas pengoperasian minimum yang dianjurkan yaitu 30% dari kapasitasnya.



Gambar 4.6 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 1

Respon frekuensi tertera pada Gambar 4.7. Frekuensi yang diperlihatkan adalah frekuensi pada bus PLTD Tomia yang merupakan bus 0,4 kV yang ada pada sistem kelistrikan Pulau Tomia.



Gambar 4.7 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 1

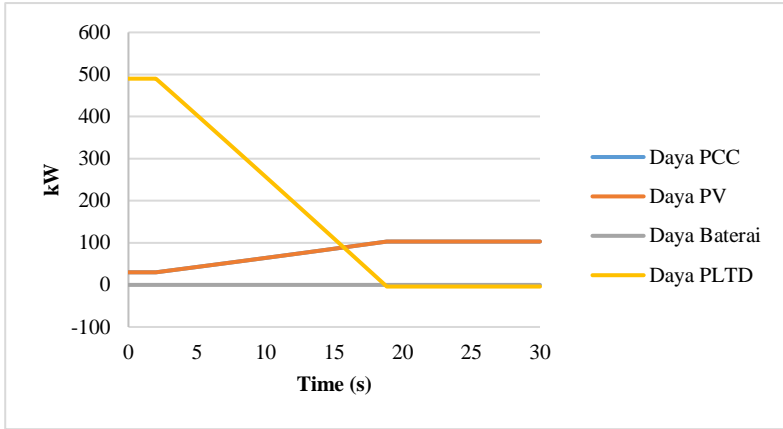
Kenaikan daya *output* PV secara tiba-tiba akan menyebabkan fluktuasi pada RPM atau putaran pada generator di PLTD. RPM tersebut mempengaruhi frekuensi yang ada. Menurut IEEE Std C37.106-2003, *overfrequency limit* adalah 60,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz dan *underfrequency limit* adalah 59,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz. Apabila dikonversikan ke 50 Hz maka *overfrequency limit* adalah 50,417 Hz dan *underfrequency limit* adalah 49,583 Hz. Sesuai yang tertera pada Gambar 4.7 maka frekuensi pada sistem kelistrikan Pulau Tomia masih dalam *range* aman untuk dioperasikan, dengan nilai *overfrequency* tertinggi 50,032 Hz dan nilai *underfrequency* terendah 49,9839 Hz.

4.2 Kasus Dua : Daya Keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100% dan Baterai dalam Keadaan Tidak Beroperasi di Semua Lokasi

Pada kasus dua, dilakukan simulasi dengan anggapan terjadi pada siang hari yang terik. Sehingga semua PV dapat menghasilkan daya sebesar 100% dari kapasitasnya dan menyebabkan baterai juga menyerap daya sebesar 100% dari kapasitasnya. Namun, pada kasus dua, baterai diasumsikan dalam keadaan tidak beroperasi. Generator dioperasikan dalam mode *swing* agar kebutuhan beban tetap terpenuhi. Simulasi *ramp up* PV dilakukan pada detik kedua.

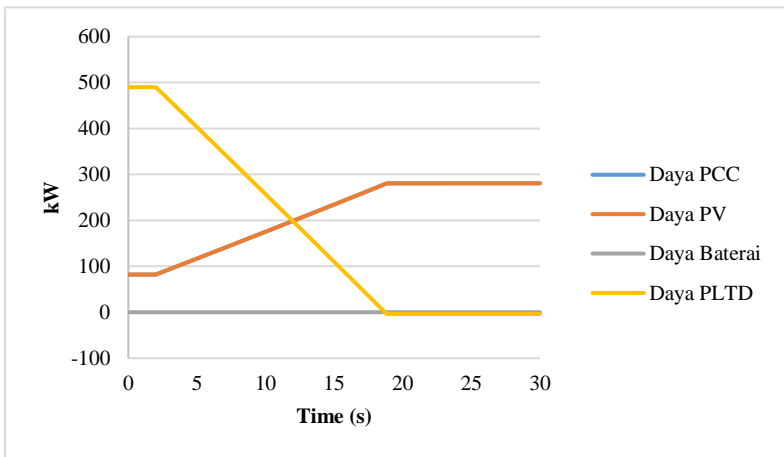
Pada saat adanya perbedaan waktu *ramping* maka dapat terjadi penyerapan daya dari *grid* yang disebut dengan daya PCC yang menuju ke baterai. Hal tersebut menjadi salah satu konsentrasi pada Tugas Akhir ini. Daya PCC pada masing-masing lokasi PLTS akan ditunjukkan oleh grafik yang tertera pada Gambar 4.8 hingga Gambar 4.11.

Gambar 4.8 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Dete. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Dete yang menuju *grid* sebesar 100 kW.



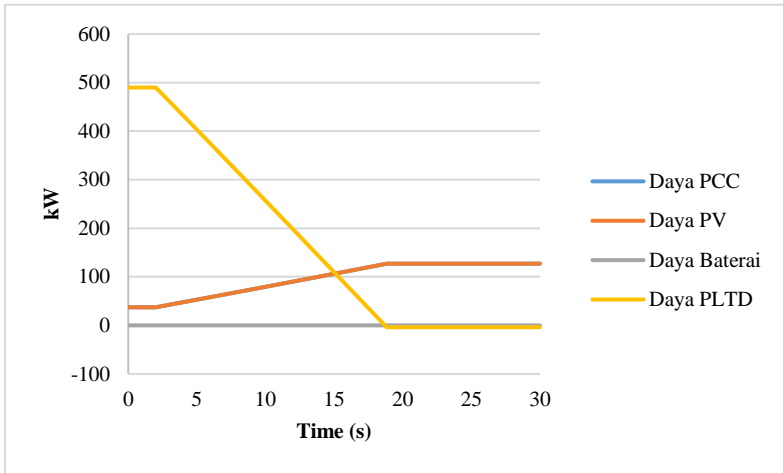
Gambar 4.8 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 2

Gambar 4.9 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kahianga. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai tidak menyerap maupun menyuplai daya. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kahianga yang menuju *grid* sebesar 275 kW.



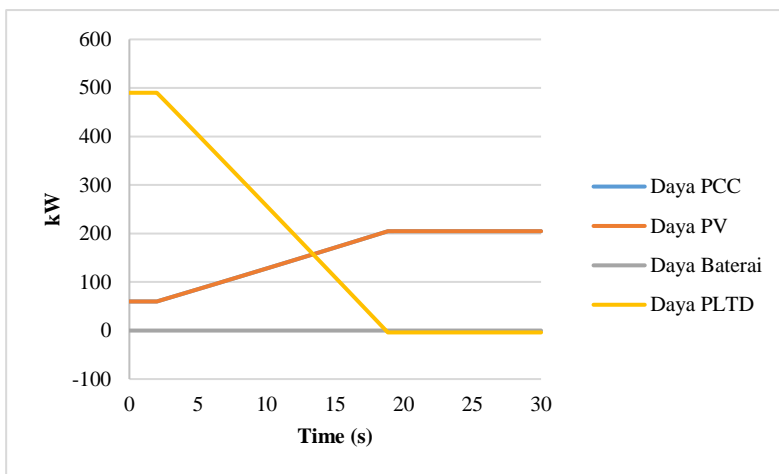
Gambar 4.9 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 2

Gambar 4.10 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kulati. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai tidak menyerap maupun menyuplai daya. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kulati yang menuju *grid* sebesar 125 kW.



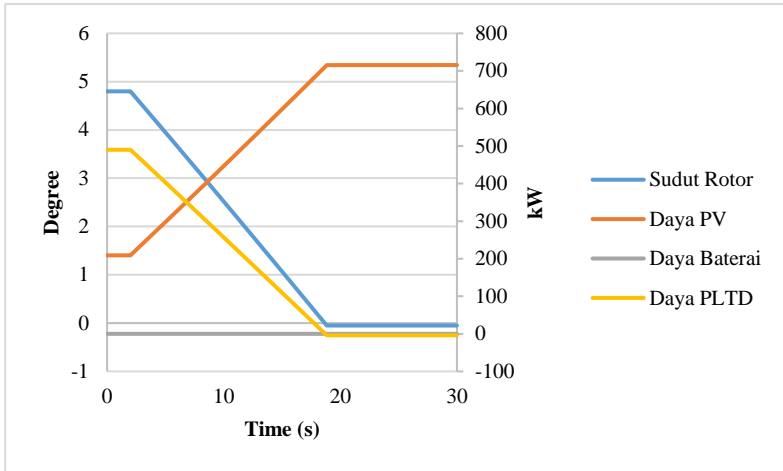
Gambar 4.10 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 2

Gambar 4.11 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Lamanggau. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai tidak menyerap maupun menyuplai daya. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Lamanggau yang menuju *grid* sebesar 200 kW.



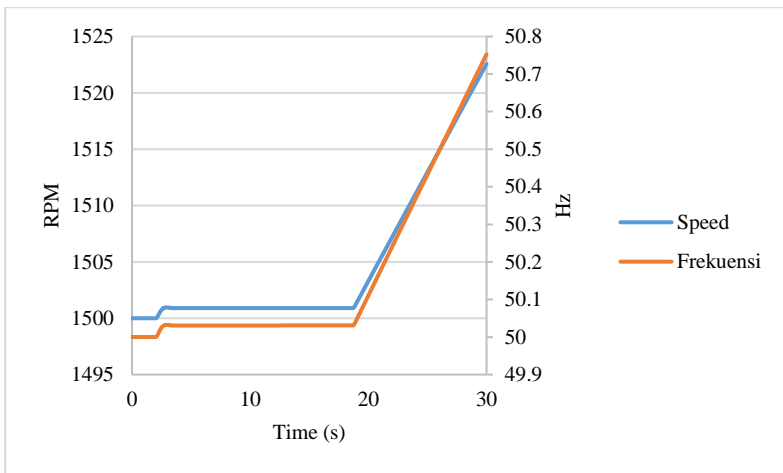
Gambar 4.11 Aliran Daya pada PLTS di Lamangau Kasus 2

Pada Gambar 4.12 menjelaskan bagaimana respon dari PLTD ketika terjadi kenaikan daya *output* PV pada detik kedua baik dari segi daya *output* PLTD dan sudut rotor PLTD. Dapat dilihat bahwa semakin besarnya persentase daya PV maka semakin kecil persentase daya dari PLTD. Pada kasus ini, PLTD akan beroperasi sebesar 0% dari kapasitasnya karena PLTS dapat mengatasi permintaan beban. Penurunan daya PLTD hingga 0 kW membuat sudut rotor memiliki nilai kurang dari nol yaitu $-0,05^\circ$. Menurut ANSI/IEEE Std 399-1997, sudut rotor dikatakan dalam *range* aman apabila pada saat osilasi nilai sudut kurang dari 180° dan pada saat *steady state* sudut rotor kurang dari 90° . Pada kasus dua sudut rotor berada dalam nilai minus yang berarti PLTD dapat menyerap daya dari *grid*. Hal tersebut tidak diperbolehkan dalam suatu sistem tenaga karena dapat menyebabkan *lifetime* dari generator menjadi lebih rendah. Oleh sebab itu, dapat ditarik kesimpulan bahwa PLTS tidak boleh dioperasikan secara maksimum ketika tidak ada tempat penyimpanan energi.



Gambar 4.12 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 2

Respon frekuensi tertera pada Gambar 4.13. Frekuensi yang diperlihatkan adalah frekuensi pada bus PLTD Tomia yang merupakan bus 0,4 kV yang ada pada sistem kelistrikan Pulau Tomia.



Gambar 4.13 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 2

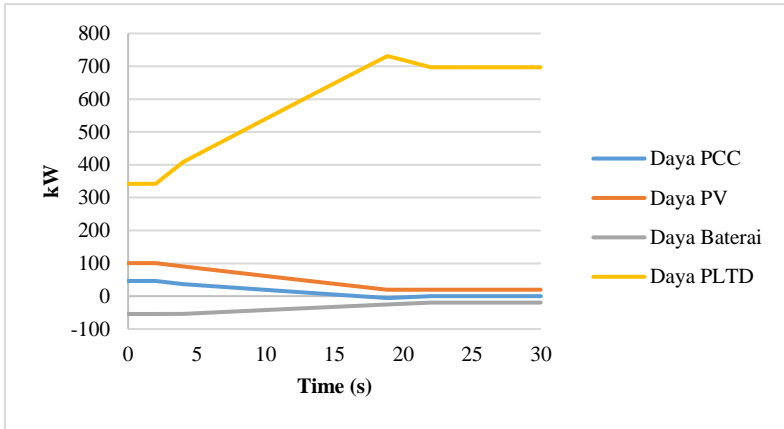
Kenaikan daya *output* PV secara tiba-tiba akan menyebabkan fluktuasi pada RPM atau putaran pada generator di PLTD. RPM tersebut mempengaruhi frekuensi yang ada. Menurut IEEE Std C37.106-2003, *overfrequency limit* adalah 60,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz dan *underfrequency limit* adalah 59,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz. Apabila dikonversikan ke 50 Hz maka *overfrequency limit* adalah 50,417 Hz dan *underfrequency limit* adalah 49,583 Hz. Sesuai yang tertera pada Gambar 4.13 frekuensi tidak dapat mempertahankan kestabilannya. Meruntut pada kasus dua maka sistem operasi pada kasus dua tidak boleh dijalankan.

4.3 Kasus Tiga : Daya Keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 20%

Pada kasus tiga, dilakukan simulasi dengan anggapan terjadi mendung di Pulau Tomia. Sehingga semua daya PV menurun hingga 20% dari kapasitasnya. Generator dioperasikan dalam mode *swing* agar kebutuhan beban tetap terpenuhi. Simulasi *ramp down* PV dilakukan pada detik kedua dan simulasi *ramp down* baterai dilakukan pada detik ke empat. Hal tersebut dikarenakan, pada kondisi nyata, pada sistem kelistrikan di Pulau Tomia masih belum ada kontrol yang membuat PV dan baterai dapat *ramp up* secara bersamaan.

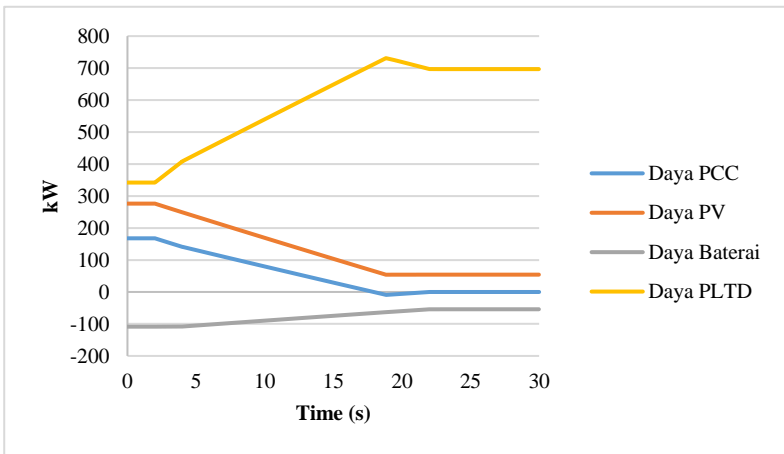
Pada saat adanya perbedaan waktu *ramping* maka dapat terjadi penyerapan daya dari *grid* yang disebut dengan daya PCC yang menuju ke baterai. Hal tersebut menjadi salah satu konsentrasi pada Tugas Akhir ini. Daya PCC pada masing-masing lokasi PLTS akan ditunjukkan oleh grafik yang tertera pada Gambar 4.14 hingga Gambar 4.17.

Gambar 4.14 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Dete. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai mendapat suplai daya dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari *grid* menuju ke bus PLTS dan baterai yang berarti *grid* menyumbang daya pada baterai. Daya dari *grid* yang menuju baterai sebesar 12,6 W.



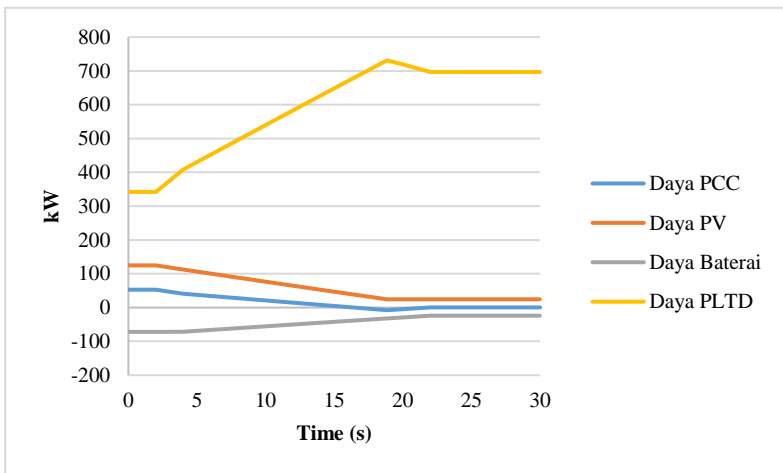
Gambar 4.14 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 3

Gambar 4.15 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kahianga. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai mendapat suplai daya dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari *grid* menuju ke bus PLTS dan baterai yang berarti *grid* menyumbang daya pada baterai. Daya dari *grid* yang menuju baterai sebesar 49,3 W.



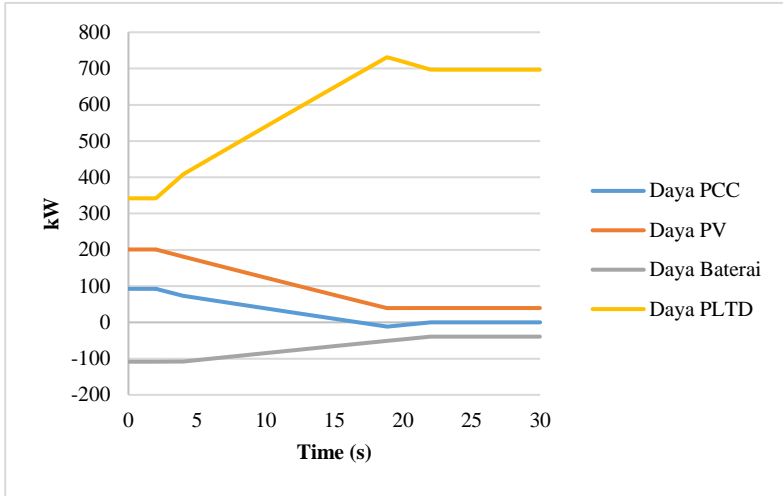
Gambar 4.15 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 3

Gambar 4.16 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kulati. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kulati yang menuju *grid* sebesar 476,1 W.



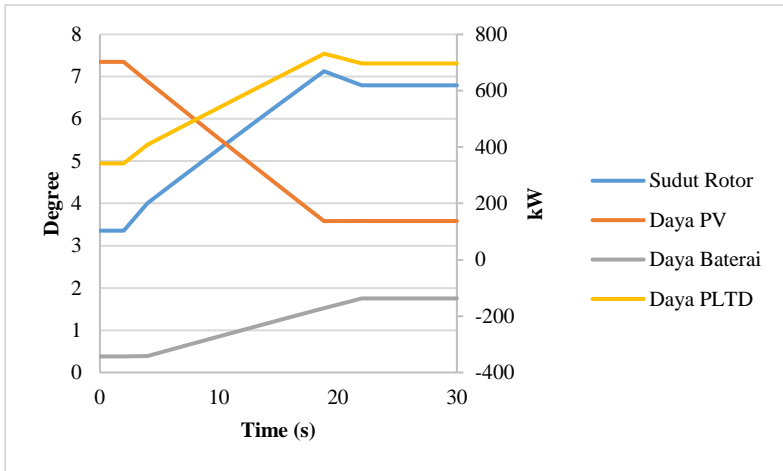
Gambar 4.16 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 3

Gambar 4.17 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Lamanggau. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai mendapat suplai daya dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari *grid* menuju ke bus PLTS dan baterai yang berarti *grid* menyumbang daya pada baterai. Daya dari *grid* yang menuju baterai sebesar 25,1 W.



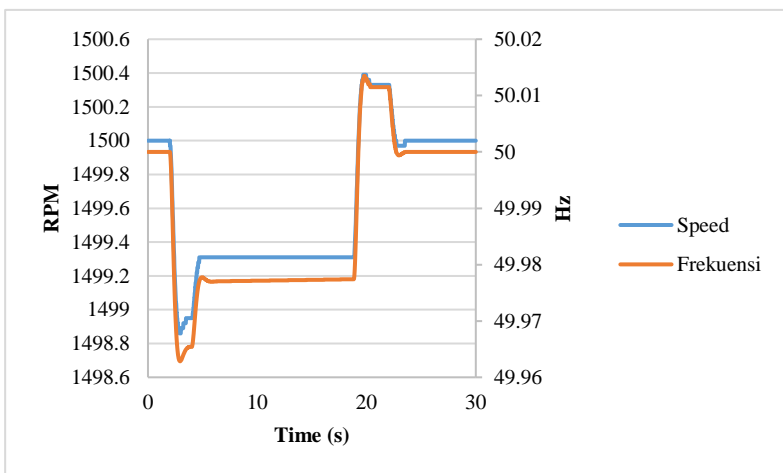
Gambar 4.17 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 3

Pada Gambar 4.18 menjelaskan bagaimana respon dari PLTD ketika terjadi kenaikan daya *output* PV pada detik kedua baik dari segi daya *output* PLTD dan sudut rotor PLTD. Dapat dilihat bahwa semakin kecil persentase daya PV maka semakin besar persentase daya dari PLTD. Pada kasus ini, PLTD akan beroperasi sebesar 50% dari kapasitasnya, semakin sedikit daya yang dibangkitkan oleh PLTD maka nilai sudut rotor akan semakin kecil. Nilai sudut rotor stabil pada nilai $6,795^\circ$. Menurut ANSI/IEEE Std 399-1997, sudut rotor dikatakan dalam *range* aman apabila pada saat osilasi nilai sudut kurang dari 180° dan pada saat *steady state* sudut rotor kurang dari 90° . Dengan demikian, maka pada operasi PLTD sebesar 50%, sudut rotor dalam *range* aman untuk dioperasikan.



Gambar 4.18 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 3

Respon frekuensi tertera pada Gambar 4.19. Frekuensi yang diperlihatkan adalah frekuensi pada bus PLTD Tomia yang merupakan bus 0,4 kV yang ada pada sistem kelistrikan Pulau Tomia.



Gambar 4.19 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 3

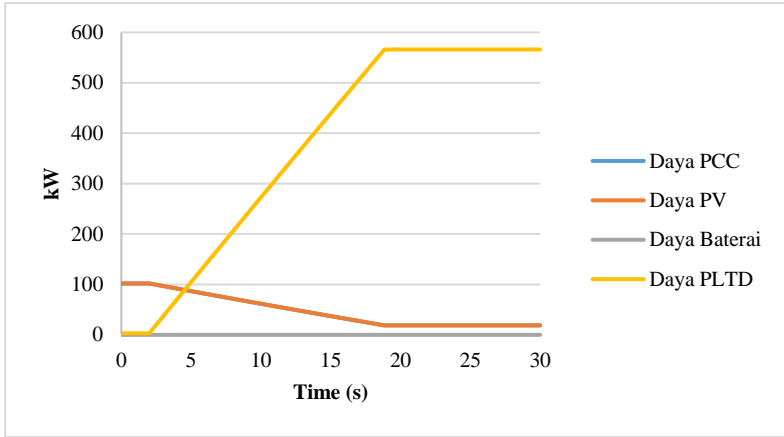
Penurunan daya *output* PV secara tiba-tiba akan menyebabkan fluktuasi pada RPM atau putaran pada generator di PLTD. RPM tersebut mempengaruhi frekuensi yang ada. Menurut IEEE Std C37.106-2003, *overfrequency limit* adalah 60,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz dan *underfrequency limit* adalah 59,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz. Apabila dikonversikan ke 50 Hz maka *overfrequency limit* adalah 50,417 Hz dan *underfrequency limit* adalah 49,583 Hz. Sesuai yang tertera pada Gambar 4.19 maka frekuensi pada sistem kelistrikan Pulau Tomia masih dalam *range* aman untuk dioperasikan, dengan nilai *overfrequency* tertinggi 50,0135 Hz dan nilai *underfrequency* terendah 49,962 Hz.

4.4 Kasus Empat : Daya Keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 20% dan Baterai dalam Keadaan Tidak Beroperasi di Semua Lokasi

Pada kasus empat, dilakukan simulasi dengan anggapan terjadi mendung di Pulau Tomia. Sehingga semua daya PV menurun hingga 20% dari kapasitasnya dan menyebabkan baterai juga menyerap daya sebesar 100% dari kapasitasnya. Generator dioperasikan dalam mode *swing* agar kebutuhan beban tetap terpenuhi. Pada kasus empat, baterai dianggap dalam keadaan tidak beroperasi. Simulasi *ramp down* PV dilakukan pada detik kedua.

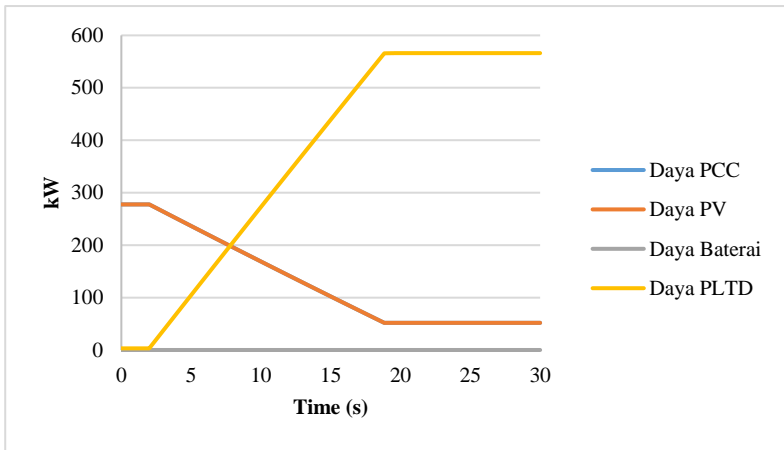
Pada saat adanya perbedaan waktu *ramping* maka dapat terjadi penyerapan daya dari *grid* yang disebut dengan daya PCC yang menuju ke baterai. Hal tersebut menjadi salah satu konsentrasi pada Tugas Akhir ini. Daya PCC pada masing-masing lokasi PLTS akan ditunjukkan oleh grafik yang tertera pada Gambar 4.20 hingga Gambar 4.23.

Gambar 4.20 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Dete. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Dete yang menuju *grid* sebesar 18,8078 kW.



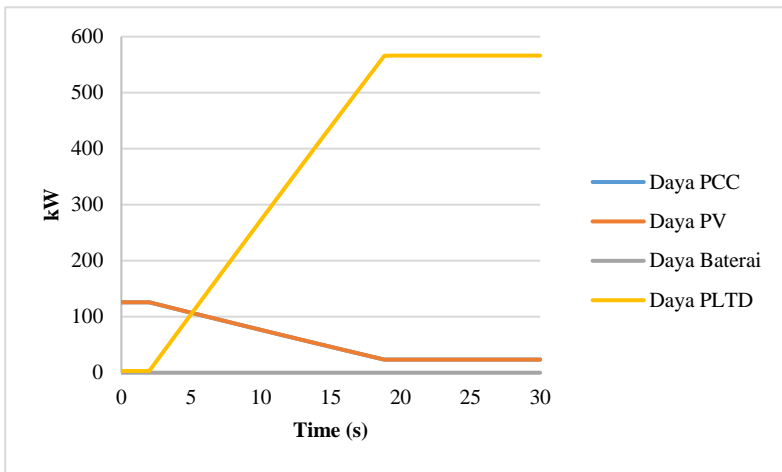
Gambar 4.20 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 4

Gambar 4.21 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kahianga. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kahianga yang menuju *grid* sebesar 51,7997 kW.



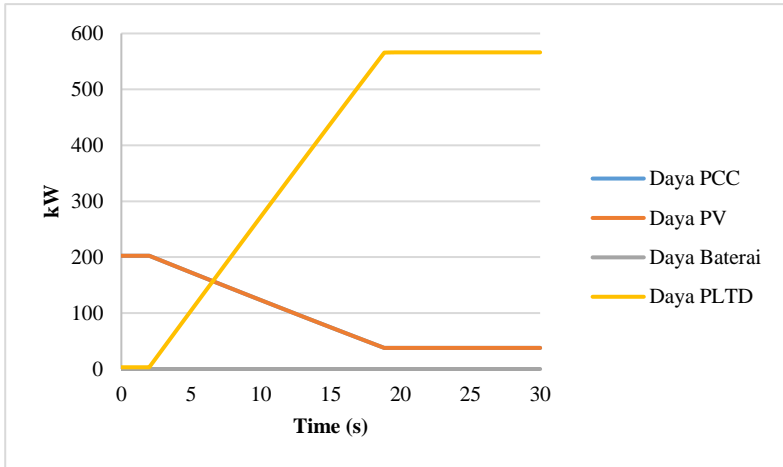
Gambar 4.21 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 4

Gambar 4.22 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kulati. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kulati yang menuju *grid* sebesar 23,4284 kW.



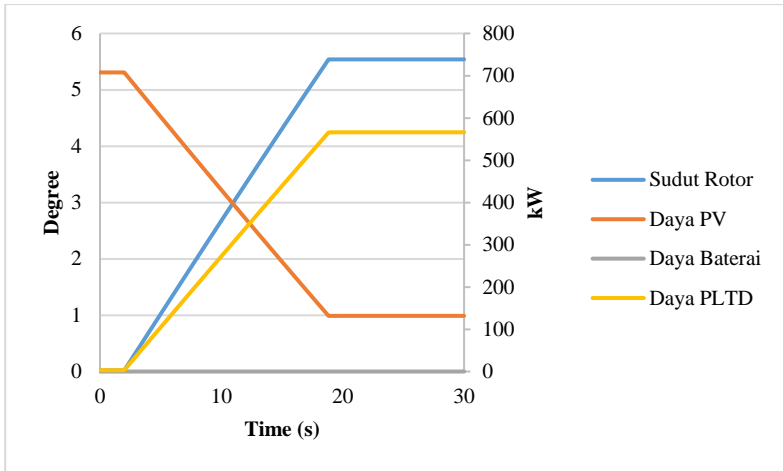
Gambar 4.22 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 4

Gambar 4.23 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Lamanggau. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Lamanggau yang menuju *grid* sebesar 37,7257 kW.



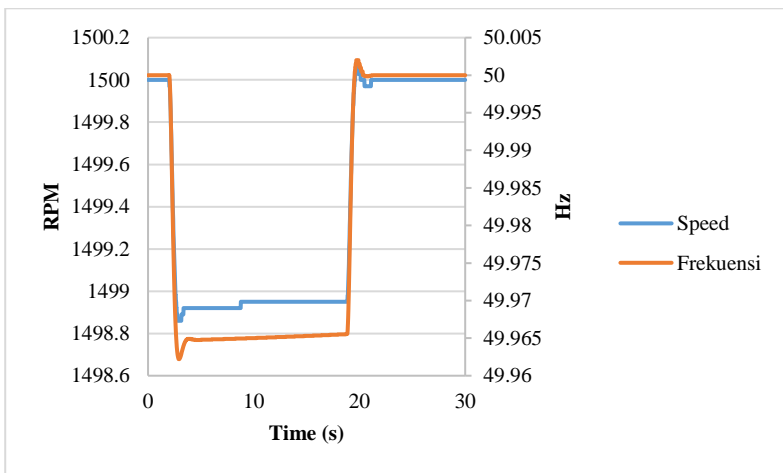
Gambar 4.23 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 4

Pada Gambar 4.24 menjelaskan bagaimana respon dari PLTD ketika terjadi penurunan daya *output* PV pada detik kedua baik dari segi daya *output* PLTD dan sudut rotor PLTD. Dapat dilihat bahwa semakin kecil persentase daya PV maka semakin kecil persentase daya dari PLTD. Pada kasus ini, PLTD akan beroperasi sebesar 40% dari kapasitasnya, semakin sedikit daya yang dibangkitkan oleh PLTD maka nilai sudut rotor akan semakin kecil. Nilai sudut rotor stabil pada nilai $5,53916^\circ$. Menurut ANSI/IEEE Std 399-1997, sudut rotor dikatakan dalam *range* aman apabila pada saat osilasi nilai sudut kurang dari 180° dan pada saat *steady state* sudut rotor kurang dari 90° . Dengan demikian, maka pada operasi PLTD sebesar 40%, sudut rotor dalam *range* aman untuk dioperasikan.



Gambar 4.24 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 4

Respon frekuensi tertera pada Gambar 4.25. Frekuensi yang diperlihatkan adalah frekuensi pada bus PLTD Tomia yang merupakan bus 0,4 kV yang ada pada sistem kelistrikan Pulau Tomia.



Gambar 4.25 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 4

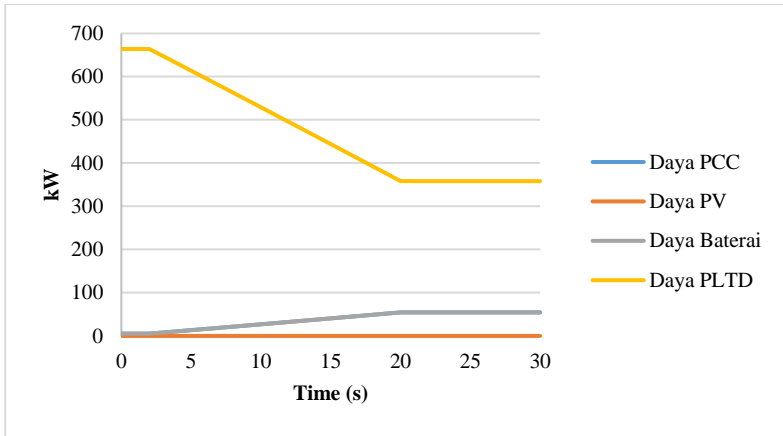
Penurunan daya *output* PV secara tiba-tiba akan menyebabkan fluktuasi pada RPM atau putaran pada generator di PLTD. RPM tersebut mempengaruhi frekuensi yang ada. Menurut IEEE Std C37.106-2003, *overfrequency limit* adalah 60,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz dan *underfrequency limit* adalah 59,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz. Apabila dikonversikan ke 50 Hz maka *overfrequency limit* adalah 50,417 Hz dan *underfrequency limit* adalah 49,583 Hz. Sesuai yang tertera pada Gambar 4.25 maka frekuensi pada sistem kelistrikan Pulau Tomia masih dalam *range* aman untuk dioperasikan, dengan nilai *overfrequency* tertinggi 50,002 Hz dan nilai *underfrequency* terendah 49,96475 Hz.

4.5 Kasus Lima : PLTS dalam Keadaan Tidak Beroperasi dan Daya Keluaran Baterai Meningkatkan dari 10% Menjadi 100%

Pada kasus lima, dilakukan simulasi dengan anggapan terjadi pada malam hari. Sehingga semua PV tidak dapat menghasilkan daya dan menyebabkan baterai merilis daya sebesar 100% dari kapasitasnya. Generator dioperasikan dalam mode *swing* agar kebutuhan beban tetap terpenuhi. Simulasi *ramp up* baterai dilakukan pada detik kedua .

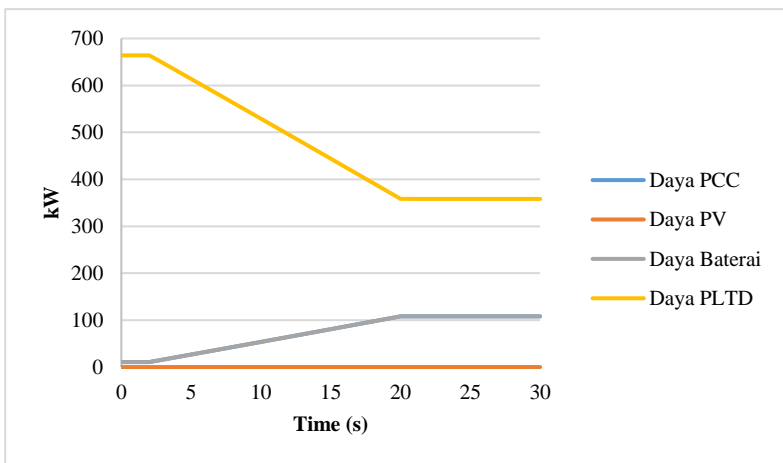
Pada saat adanya perbedaan waktu *ramping* maka dapat terjadi penyerapan daya dari *grid* yang disebut dengan daya PCC yang menuju ke baterai. Hal tersebut menjadi salah satu konsentrasi pada Tugas Akhir ini. Daya PCC pada masing-masing lokasi PLTS akan ditunjukkan oleh grafik yang tertera pada Gambar 4.26 hingga Gambar 4.29.

Gambar 4.26 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Dete. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Dete yang menuju *grid* sebesar 54,4357 kW.



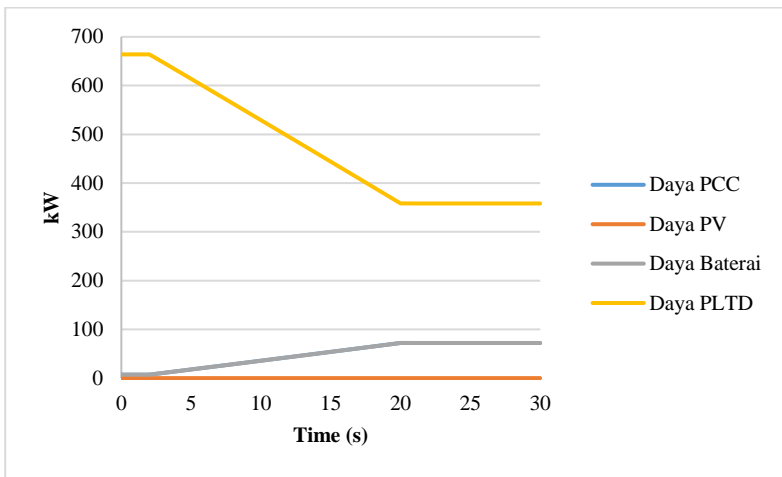
Gambar 4.26 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 5

Gambar 4.27 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kahianga. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kahianga yang menuju *grid* sebesar 108,042 kW.



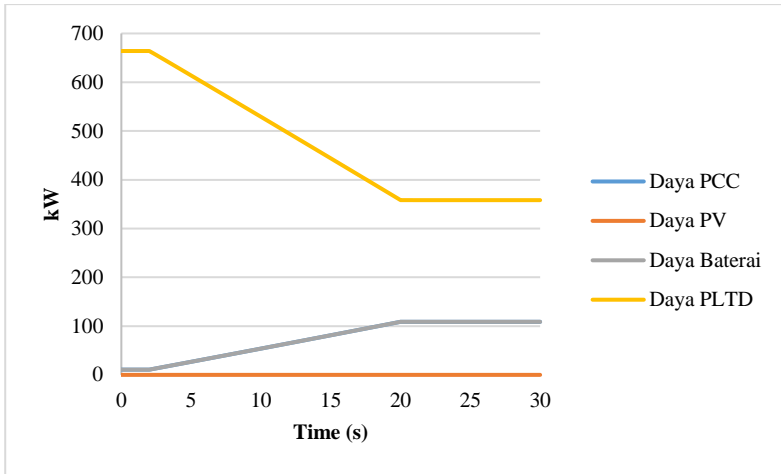
Gambar 4.27 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 5

Gambar 4.28 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kulati. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kulati yang menuju *grid* sebesar 72,075 kW.



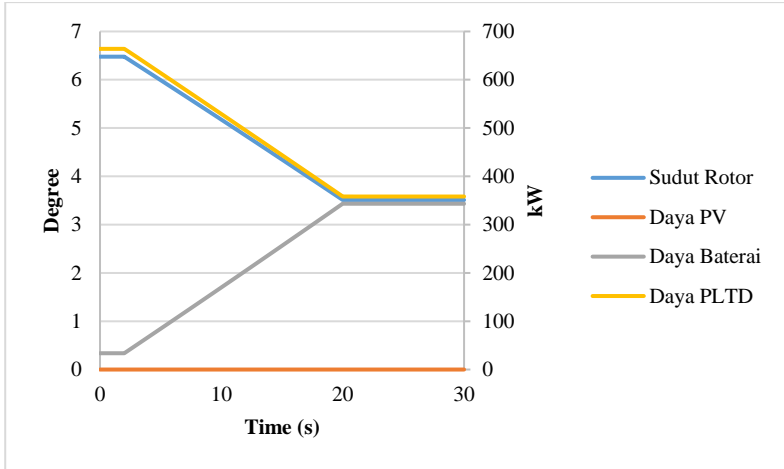
Gambar 4.28 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 5

Gambar 4.29 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Lamanggau. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Lamanggau yang menuju *grid* sebesar 108,754 kW.



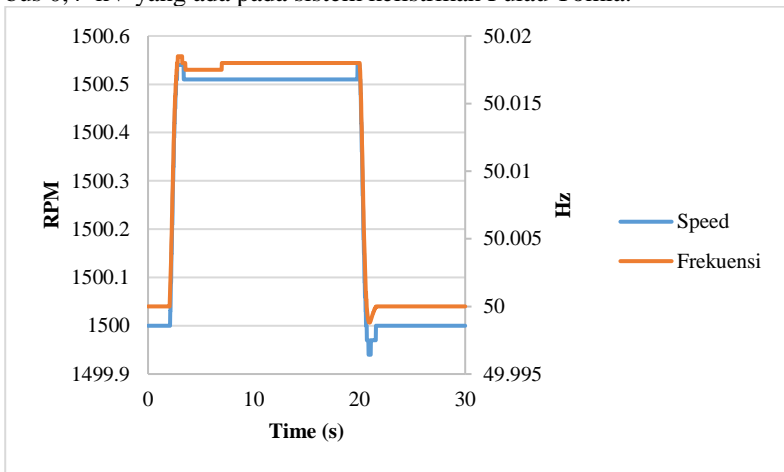
Gambar 4.29 Aliran Daya pada PLTS di Lamangau Kasus 5

Pada Gambar 4.30 menjelaskan bagaimana respon dari PLTD ketika terjadi kenaikan daya *output* baterai pada detik kedua baik dari segi daya *output* PLTD dan sudut rotor PLTD. Dapat dilihat bahwa semakin besarnya persentase daya baterai maka semakin kecil persentase daya dari PLTD. Pada kasus ini, PLTD akan beroperasi sebesar 26% dari kapasitasnya, semakin sedikit daya yang dibangkitkan oleh PLTD maka nilai sudut rotor akan semakin kecil. Nilai sudut rotor stabil pada nilai 3,51174°. Menurut ANSI/IEEE Std 399-1997, sudut rotor dikatakan dalam *range* aman apabila pada saat osilasi nilai sudut kurang dari 180° dan pada saat *steady state* sudut rotor kurang dari 90°. Dengan demikian, maka pada operasi PLTD sebesar 26%, sudut rotor dalam *range* aman untuk dioperasikan. Namun, hal tersebut tidak sesuai dengan kapasitas pengoperasian minimum yang dianjurkan yaitu 30% dari kapasitasnya.



Gambar 4.30 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 5

Respon frekuensi tertera pada Gambar 4.31. Frekuensi yang diperlihatkan adalah frekuensi pada bus PLTD Tomia yang merupakan bus 0,4 kV yang ada pada sistem kelistrikan Pulau Tomia.



Gambar 4.31 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 5

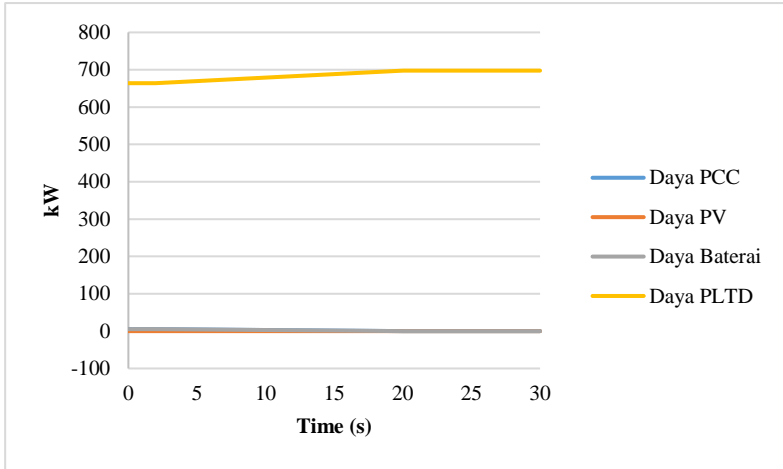
Kenaikan daya *output* baterai secara tiba-tiba akan menyebabkan fluktuasi pada RPM atau putaran pada generator di PLTD. RPM tersebut mempengaruhi frekuensi yang ada. Menurut IEEE Std C37.106-2003, *overfrequency limit* adalah 60,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz dan *underfrequency limit* adalah 59,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz. Apabila dikonversikan ke 50 Hz maka *overfrequency limit* adalah 50,417 Hz dan *underfrequency limit* adalah 49,583 Hz. Sesuai yang tertera pada Gambar 4.31 maka frekuensi pada sistem kelistrikan Pulau Tomia masih dalam *range* aman untuk dioperasikan, dengan nilai *overfrequency* tertinggi 50,0185 Hz dan nilai *underfrequency* terendah 49,9991 Hz.

4.6 Kasus Enam : PLTS dalam Keadaan Tidak Beroperasi dan Daya Keluaran Baterai Menurun dari 10% Menjadi 0%

Pada kasus enam, dilakukan simulasi dengan anggapan terjadi pada malam hari. Dimana semua PV tidak dapat menghasilkan daya dan daya baterai menurun hingga 0% dari kapasitasnya. Generator dioperasikan dalam mode *swing* agar kebutuhan beban tetap terpenuhi. Simulasi *ramp down* baterai dilakukan pada detik ke dua.

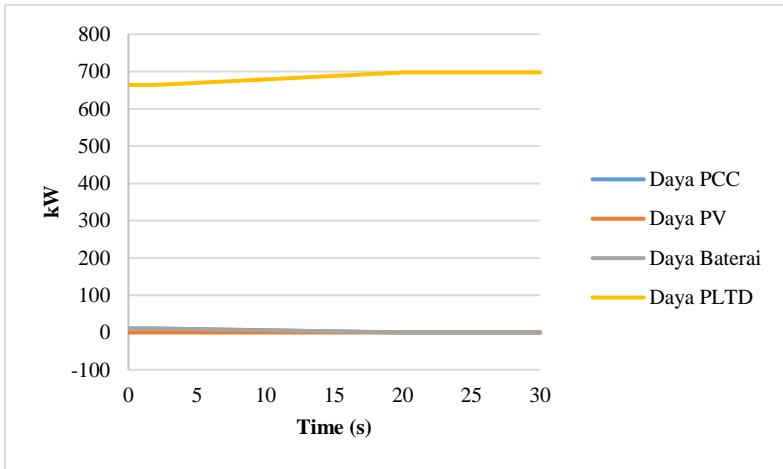
Pada saat adanya perbedaan waktu *ramping* maka dapat terjadi penyerapan daya dari *grid* yang disebut dengan daya PCC yang menuju ke baterai. Hal tersebut menjadi salah satu konsentrasi pada Tugas Akhir ini. Daya PCC pada masing-masing lokasi PLTS akan ditunjukkan oleh grafik yang tertera pada Gambar 4.32 hingga Gambar 4.35.

Gambar 4.32 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Dete. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa tidak ada aliran daya baik dari bus PLTS maupun menuju bus PLTS.



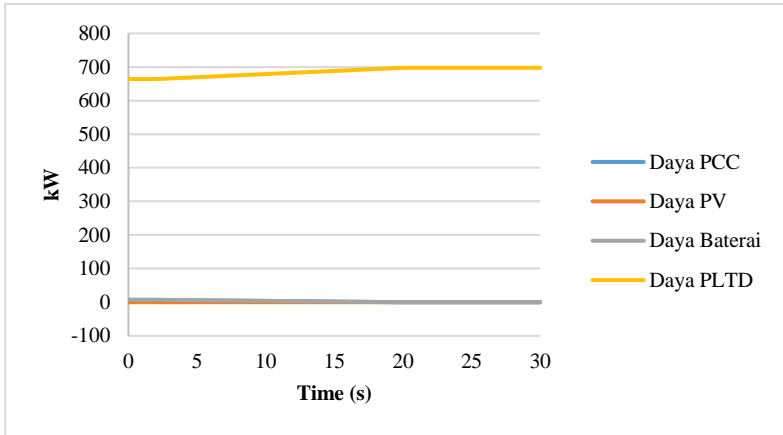
Gambar 4.32 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 6

Gambar 4.33 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kahianga. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa tidak ada aliran daya baik dari bus PLTS maupun menuju bus PLTS.

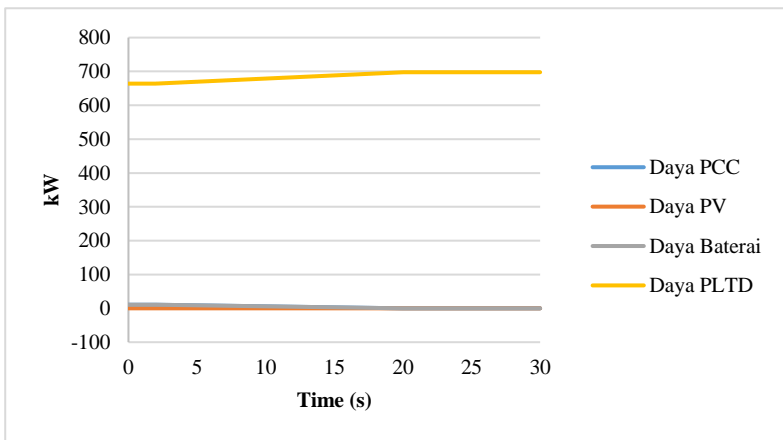


Gambar 4.33 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 6

Gambar 4.34 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kulati. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa tidak ada aliran daya baik dari bus PLTS maupun menuju bus PLTS.



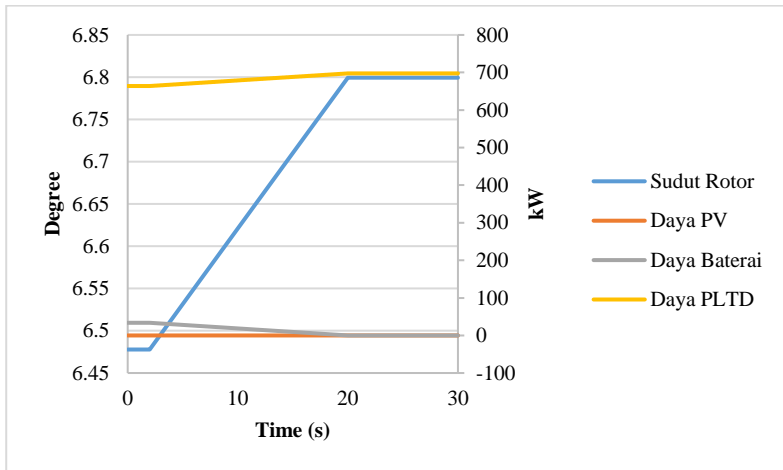
Gambar 4.34 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 6



Gambar 4.35 Aliran Daya pada PLTS di Lamangau Kasus 6

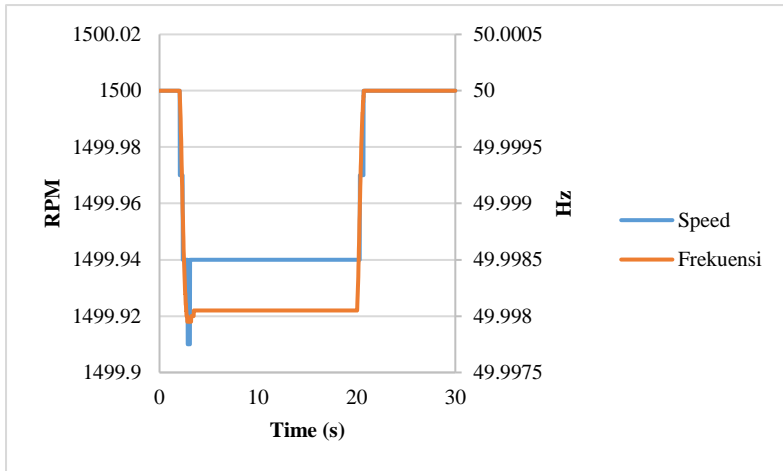
Gambar 4.35 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Lamanggau. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa tidak ada aliran daya baik dari bus PLTS maupun menuju bus PLTS.

Pada Gambar 4.36 menjelaskan bagaimana respon dari PLTD ketika terjadi penurunan daya *output* baterai pada detik kedua baik dari segi daya *output* PLTD dan sudut rotor PLTD. Dapat dilihat bahwa semakin kecil persentase daya baterai maka semakin besar persentase daya dari PLTD. Pada kasus ini, PLTD akan beroperasi sebesar 50% dari kapasitasnya, semakin sedikit daya yang dibangkitkan oleh PLTD maka nilai sudut rotor akan semakin kecil. Nilai sudut rotor stabil pada nilai 6,7994°. Menurut ANSI/IEEE Std 399-1997, sudut rotor dikatakan dalam *range* aman apabila pada saat osilasi nilai sudut kurang dari 180° dan pada saat *steady state* sudut rotor kurang dari 90°. Dengan demikian, maka pada operasi PLTD sebesar 50%, sudut rotor dalam *range* aman untuk dioperasikan.



Gambar 4.36 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 6

Respon frekuensi tertera pada Gambar 4.37. Frekuensi yang diperlihatkan adalah frekuensi pada bus PLTD Tomia yang merupakan bus 0,4 kV yang ada pada sistem kelistrikan Pulau Tomia.



Gambar 4.37 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 6

Penurunan daya *output* baterai secara tiba-tiba akan menyebabkan fluktuasi pada RPM atau putaran pada generator di PLTD. RPM tersebut mempengaruhi frekuensi yang ada. Menurut IEEE Std C37.106-2003, *overfrequency limit* adalah 60,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz dan *underfrequency limit* adalah 59,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz. Apabila dikonversikan ke 50 Hz maka *overfrequency limit* adalah 50,417 Hz dan *underfrequency limit* adalah 49,583 Hz. Sesuai yang tertera pada Gambar 4.37 maka frekuensi pada sistem kelistrikan Pulau Tomia masih dalam *range* aman untuk dioperasikan, dengan nilai *overfrequency* tertinggi 50 Hz dan nilai *underfrequency* terendah 49,9979 Hz.

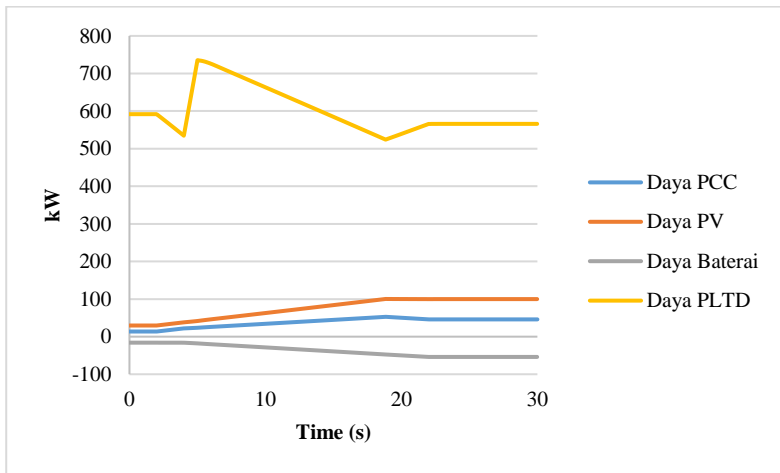
4.7 Kasus Tujuh : Daya Keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100% dalam Keadaan Beban Meningkat Hingga 923 kW

Pada kasus tujuh, dilakukan simulasi dengan anggapan terjadi pada siang hari yang terik. Sehingga semua PV dapat menghasilkan daya sebesar 100% dari kapasitasnya dan menyebabkan baterai juga menyerap daya sebesar 100% dari kapasitasnya. Generator dioperasikan dalam mode *swing* agar kebutuhan beban tetap terpenuhi. Pada kasus tujuh, dilakukan simulasi beban meningkat hingga mencapai beban puncak

923 kW. Simulasi *ramp up* PV dilakukan pada detik kedua dan simulasi *ramp up* baterai dilakukan pada detik ke empat. Hal tersebut dikarenakan, pada kondisi nyata, pada sistem kelistrikan di Pulau Tomia masih belum ada kontrol yang membuat PV dan baterai dapat *ramp up* secara bersamaan.

Pada saat adanya perbedaan waktu *ramping* maka dapat terjadi penyerapan daya dari *grid* yang disebut dengan daya PCC yang menuju ke baterai. Hal tersebut menjadi salah satu konsentrasi pada Tugas Akhir ini. Daya PCC pada masing-masing lokasi PLTS akan ditunjukkan oleh grafik yang tertera pada Gambar 4.38 hingga Gambar 4.41.

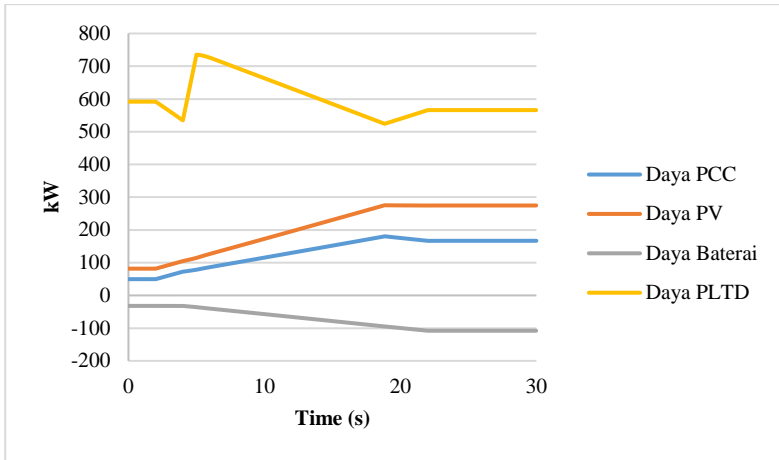
Gambar 4.38 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Dete. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Dete yang menuju *grid* sebesar 45,9202 kW.



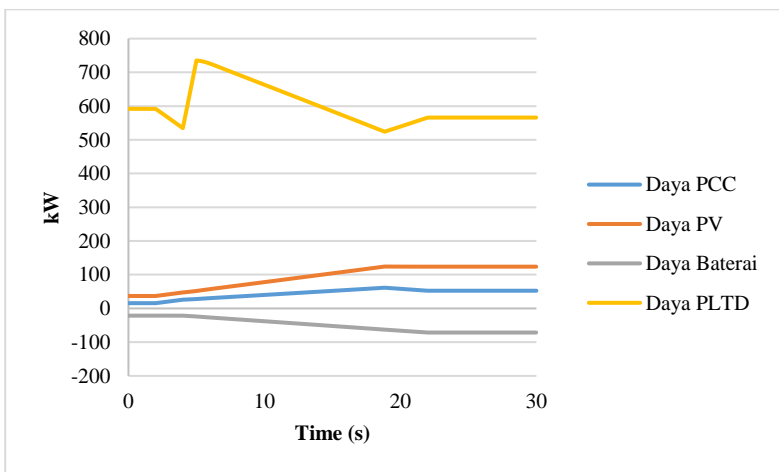
Gambar 4.38 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 7

Gambar 4.39 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kahianga. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus

PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kahianga yang menuju *grid* sebesar 166,724 kW



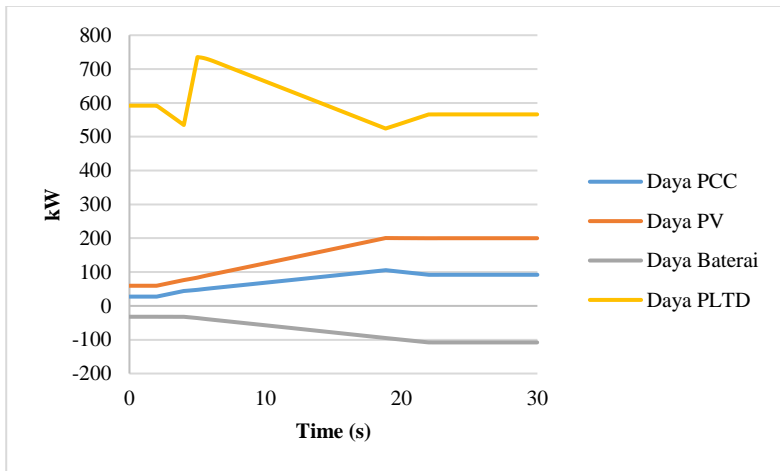
Gambar 4.39 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 7



Gambar 4.40 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 7

Gambar 4.40 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kulati. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Kulati yang menuju *grid* sebesar 52,5217 kW.

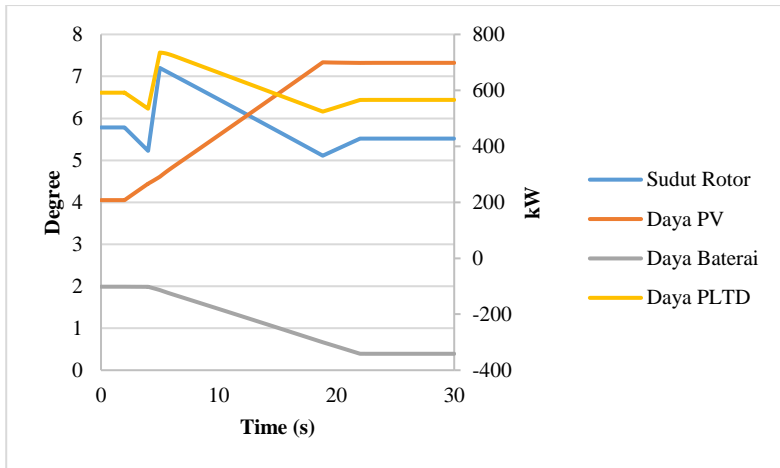
Gambar 4.41 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Lamanggau. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai sepenuhnya mendapat daya dari PLTS tanpa dapat sumbangan dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari bus PLTS menuju ke *grid* yang berarti PLTS menyumbang daya pada *grid*. Daya dari PLTS Dete yang menuju *grid* sebesar 91,940 kW.



Gambar 4.41 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 7

Pada Gambar 4.42 menjelaskan bagaimana respon dari PLTD ketika terjadi kenaikan daya *output* PV pada detik kedua baik dari segi daya *output* PLTD dan sudut rotor PLTD. Dapat dilihat bahwa semakin besarnya persentase daya PV maka semakin kecil persentase daya dari PLTD. Pada kasus ini, PLTD akan beroperasi sebesar 40% dari kapasitasnya, semakin sedikit daya yang dibangkitkan oleh PLTD maka nilai sudut rotor akan semakin kecil. Nilai sudut rotor stabil pada nilai 5,5175°. Menurut ANSI/IEEE Std 399-1997, sudut rotor dikatakan dalam

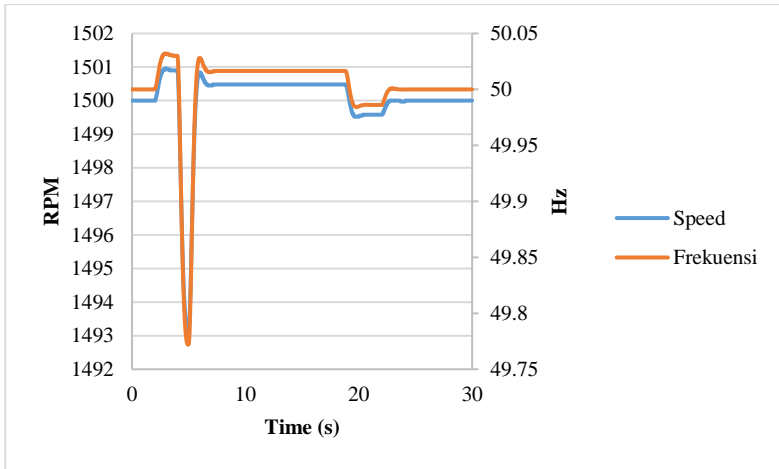
range aman apabila pada saat osilasi nilai sudut kurang dari 180° dan pada saat *steady state* sudut rotor kurang dari 90° . Dengan demikian, maka pada operasi PLTD sebesar 40%, sudut rotor dalam *range* aman untuk dioperasikan.



Gambar 4.42 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 7

Respon frekuensi tertera pada Gambar 4.43. Frekuensi yang diperlihatkan adalah frekuensi pada bus PLTD Tomia yang merupakan bus 0,4 kV yang ada pada sistem kelistrikan Pulau Tomia.

Kenaikan daya *output* PV secara tiba-tiba akan menyebabkan fluktuasi pada RPM atau putaran pada generator di PLTD. RPM tersebut mempengaruhi frekuensi yang ada. Menurut IEEE Std C37.106-2003, *overfrequency limit* adalah 60,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz dan *underfrequency limit* adalah 59,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz. Apabila dikonversikan ke 50 Hz maka *overfrequency limit* adalah 50,417 Hz dan *underfrequency limit* adalah 49,583 Hz. Sesuai yang tertera pada Gambar 4.43 maka frekuensi pada sistem kelistrikan Pulau Tomia masih dalam *range* aman untuk dioperasikan, dengan nilai *overfrequency* tertinggi 50,03 Hz dan nilai *underfrequency* terendah 49,7981 Hz.



Gambar 4.43 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 7

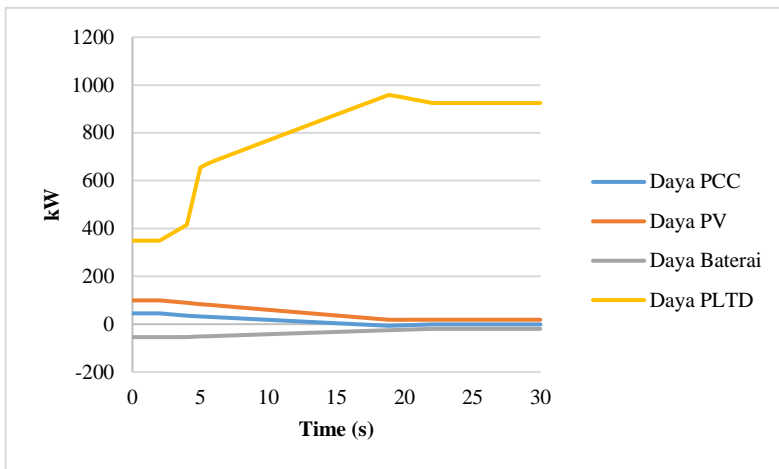
4.8 Kasus Delapan : Daya Keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 20% dalam Keadaan Beban Puncak Meningkat Hingga 923 kW

Pada kasus delapan, dilakukan simulasi dengan anggapan terjadi pada saat mendung di Pulau Tomia. Sehingga daya semua PV dapat menurun hingga 20% dari kapasitasnya dan menyebabkan baterai juga menyerap daya sebesar 100% dari kapasitasnya. Generator dioperasikan dalam mode *swing* agar kebutuhan beban tetap terpenuhi. Simulasi *ramp down* PV dilakukan pada detik kedua dan simulasi *ramp down* baterai dilakukan pada detik ke empat. Hal tersebut dikarenakan, pada kondisi nyata, pada sistem kelistrikan di Pulau Tomia masih belum ada kontrol yang membuat PV dan baterai dapat *ramp down* secara bersamaan.

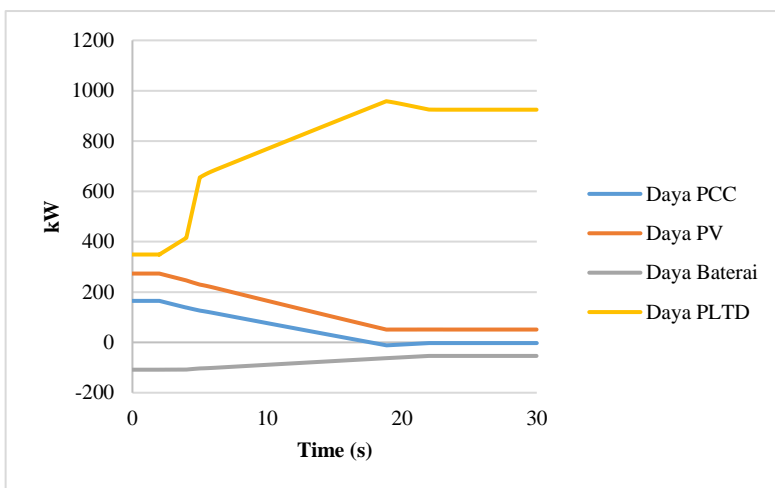
Pada saat adanya perbedaan waktu *ramping* maka dapat terjadi penyerapan daya dari *grid* yang disebut dengan daya PCC yang menuju ke baterai. Hal tersebut menjadi salah satu konsentrasi pada Tugas Akhir ini. Daya PCC pada masing-masing lokasi PLTS akan ditunjukkan oleh grafik yang tertera pada Gambar 4.44 hingga Gambar 4.47.

Gambar 4.44 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Dete. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai mendapat suplai daya dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari *grid* menuju ke PLTS dan baterai yang berarti

grid menyumbang daya pada baterai. Daya dari *grid* yang menuju baterai sebesar 985,3 W.



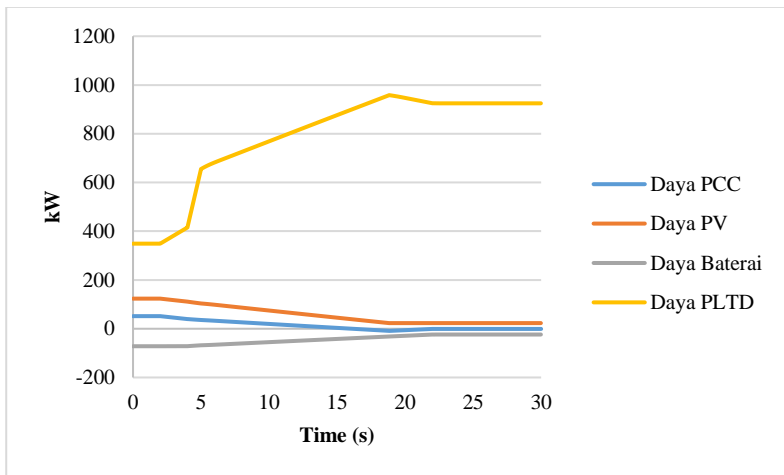
Gambar 4.44 Aliran Daya pada PLTS di Dete Kasus 8



Gambar 4.45 Aliran Daya pada PLTS di Kahianga Kasus 8

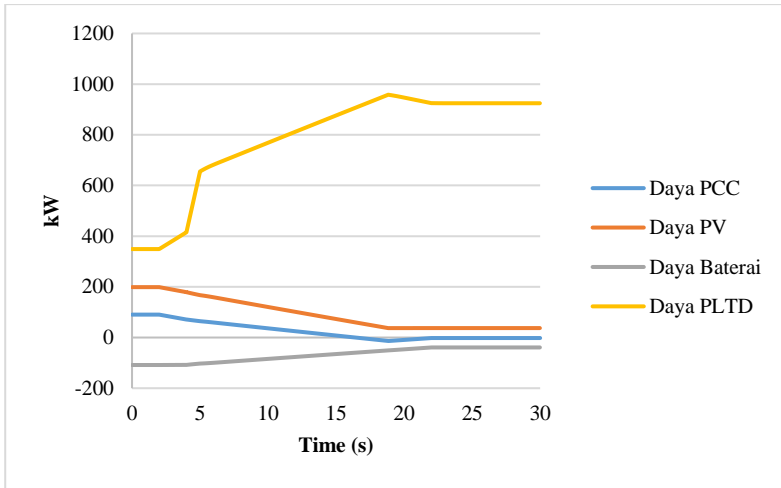
Gambar 4.45 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kahianga. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai mendapat suplai daya dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari *grid* menuju ke PLTS dan baterai yang berarti *grid* menyumbang daya pada baterai. Daya dari *grid* yang menuju baterai sebesar 2,7338 kW.

Gambar 4.46 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Kulati. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai mendapat suplai daya dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari *grid* menuju ke PLTS dan baterai yang berarti *grid* menyumbang daya pada baterai. Daya dari *grid* yang menuju baterai sebesar 743,1 W.



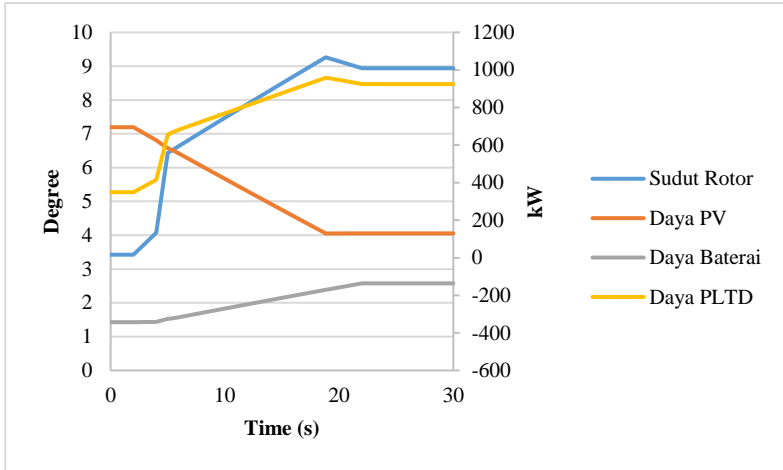
Gambar 4.46 Aliran Daya pada PLTS di Kulati Kasus 8

Gambar 4.47 menjelaskan aliran daya yang masuk menuju baterai atau keluar dari baterai di lokasi PLTS Lamanggau. Sesuai grafik yang ada menunjukkan bahwa baterai mendapat suplai daya dari *grid*. Maka, arah aliran daya PCC ialah dari *grid* menuju ke PLTS dan baterai yang berarti *grid* menyumbang daya pada baterai. Daya dari *grid* yang menuju baterai sebesar 1,9845 kW.



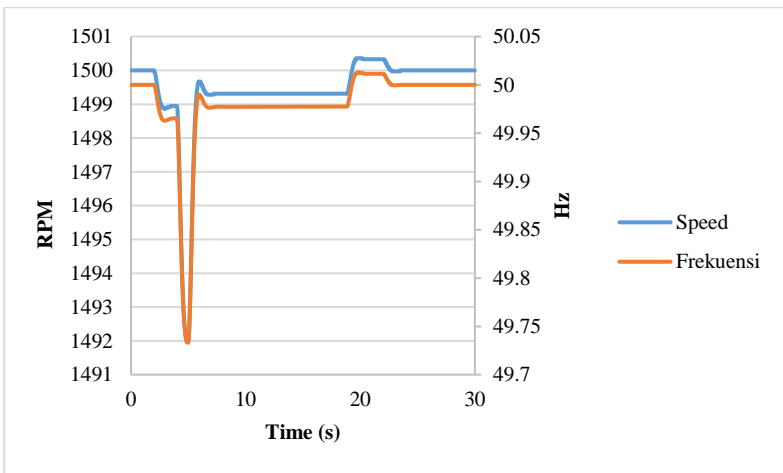
Gambar 4.47 Aliran Daya pada PLTS di Lamanggau Kasus 8

Pada Gambar 4.47 menjelaskan bagaimana respon dari PLTD ketika terjadi kenaikan daya *output* PV pada detik kedua baik dari segi daya *output* PLTD dan sudut rotor PLTD. Dapat dilihat bahwa semakin besarnya persentase daya PV maka semakin kecil persentase daya dari PLTD. Pada kasus ini, PLTD akan beroperasi sebesar 66% dari kapasitasnya, semakin sedikit daya yang dibangkitkan oleh PLTD maka nilai sudut rotor akan semakin kecil. Nilai sudut rotor stabil pada nilai $8,94^\circ$. Menurut ANSI/IEEE Std 399-1997, sudut rotor dikatakan dalam *range* aman apabila pada saat osilasi nilai sudut kurang dari 180° dan pada saat *steady state* sudut rotor kurang dari 90° . Dengan demikian, maka pada operasi PLTD sebesar 66%, sudut rotor dalam *range* aman untuk dioperasikan.



Gambar 4.48 Respon Sudut Rotor dan Daya Kasus 8

Respon frekuensi tertera pada Gambar 4.49. Frekuensi yang diperlihatkan adalah frekuensi pada bus PLTD Tomia yang merupakan bus 0,4 kV yang ada pada sistem kelistrikan Pulau Tomia.



Gambar 4.49 Respon Frekuensi pada Bus PLTD Tomia Kasus 8

Penurunan daya *output* PV secara tiba-tiba akan menyebabkan fluktuasi pada RPM atau putaran pada generator di PLTD. RPM tersebut mempengaruhi frekuensi yang ada. Menurut IEEE Std C37.106-2003, *overfrequency limit* adalah 60,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz dan *underfrequency limit* adalah 59,5 Hz pada standar frekuensi 60 Hz. Apabila dikonversikan ke 50 Hz maka *overfrequency limit* adalah 50,417 Hz dan *underfrequency limit* adalah 49,583 Hz. Sesuai yang tertera pada Gambar 4.49 maka frekuensi pada sistem kelistrikan Pulau Tomia masih dalam *range* aman untuk dioperasikan, dengan nilai *overfrequency* tertinggi 50,013 Hz dan nilai *underfrequency* terendah 49,7412 Hz.

4.9 Hasil Rekapitulasi Analisis

Tabel 4.2 Hasil Rekapitulasi Analisis

No.	Kasus	Keadaan	Keterangan
1.	Daya keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100%	Stabil	PLTD beroperasi di bawah 30%
2.	Daya keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100% dan Baterai Tidak Beroperasi	Tidak Stabil	-
3.	Daya keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 20%	Stabil	-
4.	Daya keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 20% dan Baterai Tidak Beroperasi	Stabil	-
5.	PLTS dalam Keadaan Tidak Beroperasi dan Daya Keluaran Baterai Meningkat dari 10% Menjadi 100%	Stabil	PLTD beroperasi di bawah 30%
6.	PLTS dalam Keadaan Tidak Beroperasi dan Daya Keluaran Baterai Menurun dari 10% Menjadi 0%	Stabil	-

Tabel Lanjutan dari Tabel 4.2 Hasil Rekapitulasi Analisis

No.	Kasus	Keadaan	Keterangan
7.	Daya Keluaran PLTS Meningkat dari 30% Menjadi 100% dalam Keadaan Beban Meningkat Hingga 923 kW	Stabil	-
8.	Daya Keluaran PLTS Menurun dari 100% Menjadi 30% dalam Keadaan Beban Meningkat Hingga 923 kW	Stabil	-

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan analisis kestabilan transien pada sistem kelistrikan di Pulau Tomia dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Di Pulau Tomia masih tidak ada kontrol yang bisa membuat daya ekspor (daya PCC) dari interkoneksi PLTS dan baterai selalu konstan. Sehingga daya keluaran yang fluktuatif tersebut sangat mempengaruhi kinerja PLTD.
2. Pulau Tomia memiliki PV dengan kapasitas total 785,5 kWp, *grid-inverter* berkapasitas total 700 kVA, baterai berkapasitas total 4232 kWh dan *bidirectional-inverter* berkapasitas total 378 kVA. Kapasitas PLTS dan Baterai yang tidak seimbang menyebabkan adanya fluktuasi daya ekspor menuju *grid* yang memengaruhi kinerja PLTD.
3. Sistem di Pulau Tomia dapat dikatakan stabil kecuali dengan pola operasi sebagai berikut :
 - a. Daya keluaran PLTS 100% dan baterai beroperasi. Hal tersebut menyebabkan PLTD hanya mengeluarkan daya 24% dari kapasitasnya. Dengan sudut rotor $3,355^\circ$ dan frekuensi 50 Hz.
 - b. Daya keluaran PLTS 100% dan baterai tidak dioperasikan. Menyebabkan PLTD kehilangan sinkronismenya sehingga dinyatakan tidak stabil. Dengan sudut rotor $-0,05^\circ$ dan frekuensi 50,7525 Hz pada detik ke-30 dan akan meningkat tiap detiknya.
 - c. PLTS tidak beroperasi dan daya keluaran baterai 100%. Hal tersebut menyebabkan PLTD hanya mengeluarkan daya 26% dari kapasitasnya. Dengan sudut rotor $3,51174^\circ$ dan frekuensi 50 Hz.

5.2 Saran

Setelah dilakukan analisis kestabilan transien, maka terdapat saran yang perlu dipertimbangkan, yaitu sebagai berikut :

1. Di Pulau Tomia, keluaran daya PV sesuai dengan *maximum power*, sehingga selalu terjadi fluktuasi karena *maximum power*

berbanding lurus dengan radiasi matahari yang nilainya tidak konstan. Oleh karena itu, diperlukan adanya kontrol yang dapat membatasi daya keluaran pada PV sehingga daya ekspor dapat selalu konstan.

2. Selain melakukan kontrol pembatasan daya, ada alternatif lain yaitu dengan memperbesar daya pada baterai sehingga baterai dapat menerima daya dari PLTS secara keseluruhan. Dengan hal tersebut, maka tidak akan ada fluktuasi daya ekspor.

DAFTAR PUSTAKA

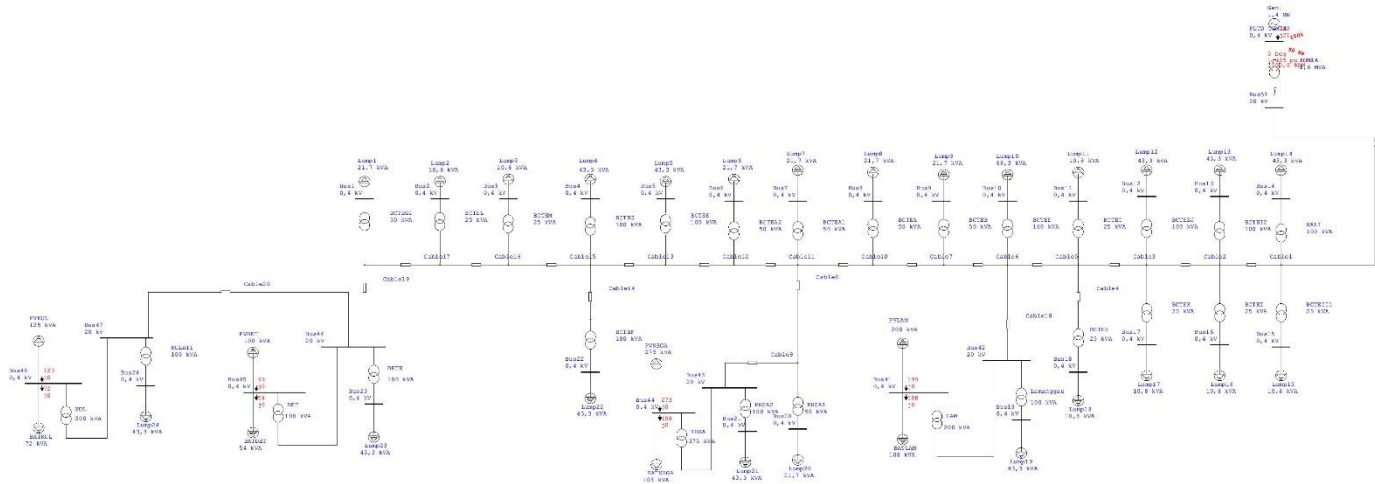
- [1] Mohanty, Asid, Sandipan Patra dan Prakash K. Ray. 2016.*IET Gener. Transm., 2016, Vol.10, Iss. 5, pp 1248-1257 : Robust Fuzzy-sliding Mode Based UPFC Controller for Transient Stability Analysis in Autonomous Wind-Diesel-PV Hybrid System.* The Institution of Engineering and Technology.
- [2] Luque, Antonio and Steven Hegedus. 2011. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering :Second Edition.* United Kingdom : John Wiley & Sons, Ltd.
- [3] Yan, Ruifeng, Tapan Kumar Saha. 2010. IEEE : *Power Ramp Rate Control for Grid Connected Photovoltaic System.* Brisbane : University of Queensland.
- [4] Kundur, Prabha.1994. *Power System Stability and Control.* Toronto: McGraw-Hill, Inc.
- [5] Grainger, J.J., Stevenson, W.D. 1994. *Power System Analysis.* New York: McGraw-Hill, Inc.
- [6] IEEE Std C37.106-2003 : *IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants.* New York. 2004
- [7] ANSI/IEEE Std 399-1997 : *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis.* New York.1998

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

One-Line Diagram - OLV1 (Transient Stability Analysis)



BIOGRAFI



Nama saya Nabella Setya Yuliani. Saya adalah mahasiswa Teknik Elektro Lintas Jalur dengan bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Sebelumnya pernah bersekolah di TK Kuncup Harapan pada tahun 2000 hingga 2002. Kemudian melanjutkan pendidikan di SDN Siwalan Panji pada tahun 2002 hingga 2008. Melanjutkan lagi di SMPN 3 Sidoarjo pada tahun 2008-2011. Kemudian pada tahun 2011-2014 saya melanjutkan pendidikan ke SMA Muhammadiyah 2 Sidoarjo. Dan selanjutnya berkuliah di D3 Teknik Elektro ITS pada tahun 2014 hingga 2017. Dan melanjutkan pendidikan sarjana melalui jenjang Lintas Jalur Teknik Elektro ITS pada tahun 2017 sampai 2019. Pembaca dapat menghubungi penulis di nabella.setya@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan