



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

STUDI PENGGUNAAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

Octavian Nur Fauzi
NRP 07111440000069

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI PENGGUNAAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI
PENYIMPAN ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA ANGIN**

Octavian Nur Fauzi
NRP 0711144000069

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

STUDY OF SUPERCAPACITOR'S USE AS ENERGY STORAGE IN WIND POWER GENERATION

Octavian Nur Fauzi
NRP 0711144000069

Supervisors

Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

STUDI PENGGUNAAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

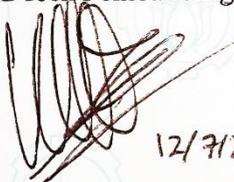
TUGAS AKHIR

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



12/7/2018

Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
NIP. 198208292006042001

Dosen Pembimbing II



12/7/18

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



PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**STUDI PENGGUNAAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN**” 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 mapupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

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

Surabaya, Juni 2018

Octavian Nur Fauzi
0711144000069

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI PENGGUNAAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

Nama mahasiswa : Octavian Nur Fauzi

Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.

Dosen Pembimbing II : Dedet C. Riawan, ST., M. Sc., Ph. D.

Abstrak:

Pembangkit Listrik Tenaga Angin adalah salah satu terobosan yang telah ditemukan untuk menjawab kebutuhan akan adanya sumber energi baru-terbarukan. Salah satu karakteristik yang dimiliki oleh pembangkit listrik ini ialah ketidakstabilan daya yang dikeluarkan oleh pembangkit ini dikarenakan kecepatan angin yang bervariasi. Salah satu solusi untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan menambahkan penyimpan energi ke dalam sistem pembangkit ini yang bekerja sebagai *power smoothing* agar daya yang dikirim ke beban dapat dijaga konstan. Sistem ini dapat bekerja sebagai penyimpan energi saat daya yang dikeluarkan oleh pembangkit melebihi daya yang dibutuhkan beban dan dapat menjadi sumber energi pada saat daya yang dikeluarkan oleh pembangkit kurang dari daya yang dibutuhkan beban. Permasalahan yang dimiliki oleh penyimpan energi pada umumnya adalah siklus pemakaian yang cenderung rendah. Superkapasitor, dengan karakteristik massa jenis daya yang besar, efisiensi tinggi, dan siklus pemakaian tinggi yang dimilikinya, dirasa mampu mengatasi permasalahan yang dimiliki oleh sistem penyimpanan energi yang lain. Tugas akhir ini berisi mengenai studi penggunaan superkapasitor sebagai penyimpan energi pada pembangkit listrik tenaga angin, dengan berfokus untuk membandingkan beberapa parameter yang dimiliki oleh superkapasitor dengan baterai *lead acid*. Berdasarkan hasil simulasi pada Tugas Akhir ini dapat disimpulkan bahwa superkapasitor memiliki massa jenis daya dan jumlah siklus hidup yang cenderung lebih tinggi dibanding baterai, namun memiliki kekurangan, diantaranya besar kapasitas energi yang kecil dan biaya yang relatif lebih mahal dibanding baterai. Superkapasitor juga dapat bekerja sebagai *power smoothing* untuk menjaga daya pada DC link konstan.

Kata kunci: Superkapasitor, Pembangkit Listrik Tenaga Angin, Penyimpan Energi, Baterai

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDY OF SUPERCAPACITOR'S USE AS ENERGY STORAGE IN WIND POWER GENERATION

Student Name : Octavian Nur Fauzi
Supervisor I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
supervisor II : Dedet C. Riawan, ST., M. Sc., Ph. D.

Abstract:

The wind power generation is one of the breakthroughs that has been found to answer the needs for new renewable energy sources. One of the characteristics possessed by this power plant is the instability of power generated by these plants due to varying wind velocity inputs. One solution to solve this problem is by adding some energy storage into this generating system that works as a power smoothing for the power delivered to the load to be kept constant. This system can work as energy storage when the power released by the plant exceeds the load required power and can be a source of energy when the power generated by the power plant is less than the load power required. The problem of energy storage in general is the life cycle which tend to be low. The supercapacitor, with its large power density, high efficiency, and high usage lifecycle, is able to solve the problems that other energy storage systems have. This Final Project contains a study of the use of supercapacitors as energy storage in wind power plants, focusing on comparing some of the parameters possessed by supercapacitors with lead acid batteries. Based on the simulation results in this Final Project it can be concluded that the supercapacitor can perform the performance as a power smoothing to keep the power at DC link constant, has the power density and life cycles that higher than the batteries. However, supercapacitors also have shortcomings, including small capacity and relatively more expensive than batteries.

Key Word: *Supercapacitors, Wind Power Generation, Energy Storage Systems, Batteries*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Tiada kata yang mampu menggambarkan seberapa banyak syukur yang harus penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wata'ala, atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya, walaupun baragam tantangan menghadang, pada akhirnya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul **“STUDI PENGGUNAAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibunda Napsiyah dan Ayahanda Ir. S. Joko Triyono atas segala doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D. dan Bapak Dedet C. Riawan, ST., M. Eng., Ph. D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Para asisten Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) yang menjadi teman seperjuangan dalam proses menyelesaikan Tugas Akhir.
5. Heryanto Hartra Mamana Meliala dan Fahmi Nurfaishal yang senantiasa menjadi teman penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir di malam hari.
6. Tim Supercapacitor, Deny Andika Prasetya, Saiful Anshoruddin, dan Aditya Setiadi yang telah menjadi teman diskusi dalam topik superkapasitor.
7. Teman-teman Laboratorium Konversi Energi, terutama Andika Mada, Tyas Sarnaning Maharani, Ramadhan Muhammad, Yudhatama Dwi Putra yang telah menjadi teman diskusi penulis dalam topik seputar sistem konversi energi baru terbarukan.

8. Teman-teman K-31 dan para anggota Kalpataru Elektro ITS yang telah memberikan motivasi baik secara langsung maupun tidak langsung.
9. Kabinet dan fungsionaris HIMATEKTRO SIGAP 16/17 yang telah mengajarkan makna kegigihan.
10. Teman-teman Rantai Emas ITS SMANSA yang telah memberikan dukungan untuk menjalani ujian Tugas Akhir.
11. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan menorehkan cerita selama masa kuliah sampai penyusunan Tugas Akhir ini
12. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, Juni 2018

Octavian Nur Fauzi
0711144000069

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
1.7 Relevansi	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Kajian Pustaka dan Penelitian Terkait	5
2.2 Energi Angin.....	6
2.3 Turbin Angin	8
2.3.1 Teknologi Turbin Angin.....	8
2.3.2 Karakteristik Turbin Angin	9
2.4 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG).....	11
2.5 Penyearah Dioda Tiga Fasa	12
2.6 Konverter <i>Boost</i>	14
2.7 Penyimpan Energi	18
2.7.1 Baterai	19
2.7.2 Superkapasitor	20
2.8 Konverter Bidirectional.....	22
BAB 3 PERANCANGAN DAN PERMODELAN SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN.....	25
3.1 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Angin.....	25
3.2 Kecepatan Angin.....	26
3.3 Model Turbin Angin dan PMSG	26
3.3.1 Simulasi PMSG.....	28
3.4 Penyearah Dioda Tiga Fasa	29
3.5 Model Konverter <i>Boost</i>	29
3.6 Model Konverter <i>Bidirectional</i>	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Perbandingan Kinerja Superkapasitor dengan Baterai.....	34

4.1.1. Karakteristik Tegangan, Arus, dan Daya	35
4.1.2 Data <i>Power Density</i> , <i>Energy Density</i> , <i>Lifetime</i> , dan Biaya Penyimpan Energi	40
4.2 Hasil Simulasi Supercapacitor sebagai <i>Power Smoothing</i> dalam Sistem Konversi Energi	42
BAB 5 KESIMPULAN	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA	53
BIODATA PENULIS	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Peta Pesebaran Kecepatan Angin Di Indonesia	7
Gambar 2. 2	Model Sederhana PMSG Dalam Sumbu dq	12
Gambar 2. 3	Penyearah Tiga Fasa 6 Pulsa Tidak Terkontrol.	13
Gambar 2. 4	Rangkaian Konverter <i>Boost</i>	14
Gambar 2. 5	Rangkaian Konverter <i>Boost Switch 'On'</i>	15
Gambar 2. 6	Rangkaian Konverter <i>Boost Switch 'Off'</i>	16
Gambar 2. 7	Permodelan Baterai <i>Lead Acid Generic</i> MATLAB/Simulink	19
Gambar 2. 8	Kurva Karakteristik Tegangan VS Kapasitas Baterai	20
Gambar 2. 9	Permodelan Superkapasitor <i>Generic</i> MATLAB/Simulink	21
Gambar 2. 10	Kurva Karakteristik Tegangan Superkapasitor Saat Kondisi <i>Charge</i>	22
Gambar 2. 11	Skema Kinerja Konverter <i>Bidirectional</i>	23
Gambar 3. 1	Skema Sistem Konversi Energi Angin	25
Gambar 3. 2	Grafik Kecepatan Angin	26
Gambar 3. 3	Permodelan Turbin Angin Dengan Simulink	27
Gambar 3. 4	Kurva Karakteristik Turbin Angin	27
Gambar 3. 5	Hasil Simulasi Turbin Angin	28
Gambar 3. 6	Hasil Simulasi PMSG	29
Gambar 3. 7	Hasil Simulasi <i>Rectifier</i>	29
Gambar 3. 8	Hasil Simulasi Konverter <i>Boost</i>	30
Gambar 3. 9	Kontroler PI untuk Konverter <i>Bidirectional</i>	31
Gambar 3. 10	Hasil Simulasi Tegangan, Arus, dan Daya Konverter <i>Bidirectional</i>	31
Gambar 4. 1	Gambar Gafik Kecepatan Angin Berubah Ekstrem	33
Gambar 4. 2	Parameter Superkapasitor pada Blok <i>Generic</i> MATLAB/Simulink	35
Gambar 4. 3	Hasil Simulasi SOC, Tegangan, Dan Arus Superkapasitor	36
Gambar 4. 4	Parameter Baterai pada Blok <i>Generic</i> MATLAB/Simulink	37
Gambar 4. 5	Hasil Simulasi SOC, Tegangan, Dan Arus Baterai.....	38
Gambar 4. 6	Tegangan Gabungan Superkapasitor dan Baterai	38

Gambar 4. 7	Arus Gabungan Superkapasitor dan Baterai	39
Gambar 4. 8	Daya Beban Gabungan Superkapasitor, Baterai, dan Referensi	40
Gambar 4. 9	Permodelan Kecepatan Angin Berubah Acak	42
Gambar 4. 10	Permodelan Kebutuhan Daya Konstan	43
Gambar 4. 11	Hasil Simulasi Tegangan DC Link pada Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Konstan	43
Gambar 4. 12	Hasil Simulasi Daya DC Link pada Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Konstan	44
Gambar 4. 13	Hasil Simulasi Daya Penyimpan Energi, Daya Angin, Daya Beban, Dan Daya Referensi Kasus 1	44
Gambar 4. 14	Permodelan Kecepatan Angin Konstan	45
Gambar 4. 15	Permodelan Kebutuhan Daya Berubah	45
Gambar 4. 16	Hasil Simulasi Tegangan DC Link pada Kecepatan Angin Konstan dan Kebutuhan Daya Berubah	46
Gambar 4. 17	Hasil Simulasi Daya DC Link pada Kecepatan Angin Konstan dan Kebutuhan Daya Berubah	46
Gambar 4. 18	Hasil Simulasi Daya Penyimpan Energi, Daya Angin, Daya Beban, Dan Daya Referensi Kasus 2	46
Gambar 4. 19	Permodelan Kecepatan Angin Berubah	47
Gambar 4. 20	Permodelan Kebutuhan Daya Berubah	47
Gambar 4. 21	Hasil Simulasi Tegangan DC Link pada Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Berubah	48
Gambar 4. 22	Hasil Simulasi Daya DC Link pada Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Berubah	48
Gambar 4. 23	Hasil Simulasi Daya Penyimpan Energi, Daya Angin, Daya Beban, dan Daya Referensi Kasus 3	49

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter Turbin Angin Dan PMSG.....	27
Tabel 4. 1 Parameter Penyimpan Energi	41

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring bertambahnya kebutuhan akan pasokan listrik di dunia, mendorong manusia untuk menciptakan inovasi baru untuk menemukan pembangkit listrik yang menggunakan energi baru terbarukan, mengingat sumber energi yang umum digunakan saat ini, seperti batu bara, minyak, dan sebagainya, sewaktu-waktu dapat habis. Untuk menjawab permasalahan tersebut dikembangkanlah teknologi-teknologi yang memiliki sumber dari alam karena dirasa sumber energi tersebut tidak akan habis, salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Angin. [1]

Pembangkit Listrik Tenaga Angin merupakan pembangkit listrik yang mengandalkan kondisi alam sebagai faktor masukannya. Hal ini membuat keluaran dari Pembangkit Listrik Tenaga Angin memiliki karakteristik yang fluktuatif, yang juga mempengaruhi penyimpangan pada frekuensi jaringan dan tegangan, sedangkan dibutuhkan masukan yang stabil untuk menjadi konsumsi beban. Hal tersebut dapat diatasi dengan menambahkan sistem penyimpanan energi dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin, yang dapat melakukan proses *charge* saat daya berlebih dan *discharge* saat generator menyuplai daya di bawah daya yang dibutuhkan beban. [2]

Salah satu media penyimpanan energi yang umum ditemukan adalah baterai. Media penyimpanan ini menawarkan cakupan yang luas untuk diimplementasikan dalam aplikasi sistem tenaga, seperti luas pengaturan, kapasitas cadangan, serta koreksi faktor daya. Hal itu membuat baterai menjadi salah satu media penyimpanan yang favorit digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Namun, baterai memiliki kekurangan, salah satunya adalah tingginya frekuensi keluaran yang dihasilkan pada saat baterai melakukan proses *charge/discharge*. [3]

Superkapasitor adalah salah satu alternatif media penyimpanan energi yang dapat digunakan dalam sistem energi baru-terbarukan, mempertimbangkan beberapa karakteristik yang dimiliki superkapasitor yang dinilai memiliki keunggulan dibanding media penyimpanan energi lainnya, seperti dari segi siklus pemakaian, efisiensi, massa jenis, juga biaya. Hal itu dirasa mampu mengatasi permasalahan tingginya frekuensi keluaran yang dihasilkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Angin,

mengingat Pembangkit Listrik Tenaga Angin sangat bergantung pada kecepatan angin yang fluktuatif. [2]

1.2 Permasalahan

Perumusan masalah dari tugas akhir ini adalah :

1. Apakah superkapasitor sebagai penyimpan energi mampu bekerja sebagai *power smoothing* pada Pembangkit Listrik tenaga Angin.
2. Bagaimana perbandingan hasil keluaran yang diperoleh untuk sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan menggunakan superkapasitor dan dengan menggunakan baterai *lead acid* sebagai penyimpanan energinya

1.3 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Membandingkan hasil keluaran yang diperoleh untuk sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan menggunakan superkapasitor dan dengan menggunakan baterai *lead acid* sebagai penyimpanan energinya.
2. Menguji superkapasitor sebagai penyimpan energi untuk bekerja sebagai *power smoothing* pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah :

1. Permodelan dan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink R2017a
2. Blok-blok yang digunakan adalah blok *generic* pada MATLAB/Simulink R2017a
3. Kontroler yang digunakan adalah kontroler *bidirectinal* yang berupa kontroler PI
4. Baterai yang digunakan adalah jenis *lead acid*
5. Tidak mempertimbangkan *power balancing* pada sistem penyimpan energi

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Mengumpulkan referensi-referensi yang berhubungan dengan penyimpanan energi superkapasitor, sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin seperti buku, *paper*, serta jurnal.
2. Pengumpulan Data
Pada tahap ini dilakukan pengambilan data-data yang diperlukan untuk mendukung Tugas Akhir ini, diantaranya adalah pengambilan data kecepatan angin yang ada di Nganjuk untuk melihat karakteristik kecepatan angin di Indonesia. Data yang diambil berupa data kecepatan angin, besarnya nilai tegangan, dan arus pada keluaran sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin.
3. Simulasi
Tahap ini berisi proses pengolahan data-data yang diperoleh dari proses sebelumnya untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. *Software* yang digunakan dalam tahap ini adalah MATLAB/Simulink R2017a.
4. Analisis Data dan Hasil Simulasi
Memberikan kesimpulan mengenai studi penggunaan superkapasitor sebagai penyimpan energi dalam Pembangkit Listrik Tenaga Angin.
5. Penyelesaian Laporan Tugas Akhir
Tahap ini dilakukan sebagai tahap akhir dari serangkaian pengerjaan tugas akhir ini. Juga dilakukan guna memenuhi persyaratan kelulusan mata kuliah Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri dari lima BAB dengan uraian sebagai berikut :

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisikan latar belakang masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi
2. BAB 2 berisikan kajian pustaka dan dasar teori yang membahas mengenai teori-teori penunjang yang berkaitan dengan sistem turbin angin yang terhubung dengan dua jenis penyimpan energi, yaitu superkapasitor dan baterai.

3. BAB 3 berisikan perancangan dan permodelan sistem turbin angin yang membahas mengenai permodelan dari masing-masing blok beserta validasinya.
4. BAB 4 berisikan simulasi dan analisis data, yang membahas tentang simulasi penyimpanan energi superkapasitor dan baterai.
5. BAB 5 berisikan kesimpulan dan saran.

1.7 Relevansi

Tugas Akhir ini diharapkan mampu memberikan manfaat terhadap sistem turbin angin, terlebih yang menggunakan penyimpanan energi untuk menjalankan kinerja *power smoothing*. Diharapkan Tugas Akhir ini mampu memberikan pertimbangan dalam memilih antara dua jenis penyimpan energi, yaitu superkapasitor dan baterai dalam implementasi sistem konversi energi angin.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Dalam bab ini akan dijelaskan teori-teori dan penelitian terkait yang pernah berhubungan dengan topik tentang sistem konversi energi angin yang terhubung dengan sistem penyimpanan energi. Bab ini terdiri dari beberapa sub-bab yang dirasa berkaitan untuk menjadi teori penunjang dalam Tugas Akhir ini, diantaranya kajian pustaka dan penelitian terkait, energi angin, turbin angin beserta teknologinya, *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), penyearah dioda tiga fasa, konverter *boost*, jenis penyimpan energi yang terdiri dari superkapasitor, baterai, dan beserta teknik penentuan kapasitasnya, dan konverter *bidirectional*. Kajian penelitian terkait akan disajikan secara singkat di sub-bab 2.1, sedangkan dasar teori yang berkaitan dengan Tugas Akhir ini akan diberikan di sub-bab 2.2 sampai 2.8.

2.1 Kajian Pustaka dan Penelitian Terkait

Dalam sub-bab ini akan dibahas mengenai kajian pustaka dan penelitian terkait yang memuat tentang hasil penelitian yang pernah dilakukan yang berhubungan dengan sistem konversi energi angin yang terhubung dengan penyimpanan energi. Kajian pustaka dan penelitian terkait memuat hasil penelitian mengenai sistem konversi energi angin yang berfokus kepada beberapa aspek yang terdapat dalam sistem konversi energi angin, seperti kontrol optimal sistem konversi energi angin, manajemen penyimpanan energi, penentuan kapasitas penyimpanan energi yang berhubungan dengan sistem konversi energi angin.

Ratna Ika Putri, dalam disertasinya [4] meneliti mengenai kontrol optimum dalam sistem konversi energi angin. Ia membandingkan beberapa macam metode kontroler seperti *Perturb And Observe* (P&O), *Modified Perturb And Observe* (MP&O), algoritma logika *fuzzy*, *Partical Swarm Optimization* (PSO), *Modified Partical Swarm Optimization* (MPSO), *modified firefly* untuk menemukan metode atau algoritma yang efektif untuk mengekstrak daya maksimum pada *permanenet magnet synchronous generator* (PMSG). Selain itu dibahas juga mengenai kontroler *bidirectional* dan *grid side converter* untuk menentukan kontrol optimum menggunakan sistem penyimpanan energi. Penelitian ini dikembangkan melalui simulasi dengan menggunakan MATLAB/Simulink untuk mengetahui kinerja kontroler tersebut yang

diimplementasikan melalui sebuah eksperimen permodelan sistem konversi energi angin.

Nishad Mendis, dalam *paper*-nya [5] meneliti mengenai algoritma manajemen energi atau yang disebut sebagai *energy management algorithm* (EMA) untuk mengembangkan performansi dari baterai sebagai penyimpan energi. *Synchronous condenser* juga ditambahkan dalam penelitiannya untuk menghasilkan daya reaktif pada sistem *Remote Area Power Supply* (RAPS). Ia juga mencantumkan metode penentuan kapasitas *hybrid energy storage* untuk mendapatkan performansi penyimpan energi yang optimal. *Hybrid energy storage* yang digunakan dalam penelitiannya adalah baterai dan superkapasitor. Dalam penelitiannya, ia menggunakan MATLAB/Simulink untuk membuat simulasi dari penelitian yang dilakukannya.

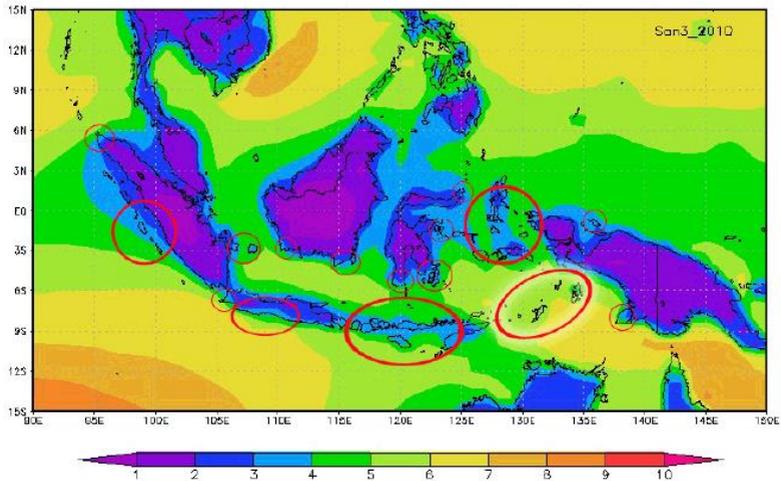
Sercan Teleke, dalam tesisnya [3] meneliti mengenai metode kontrol penyimpan energi untuk mengirimkan daya dari sumber energi baru terbarukan yang tidak stabil. Ia menggunakan dua permodelan sumber energi baru terbarukan dalam tesisnya, yaitu *photovoltaic* dan *wind turbine*. Penyimpan energi yang digunakan dalam penelitian ini adalah baterai. Dijelaskan juga mengenai penentuan kapasitas penyimpanan energi berdasarkan daya yang dihasilkan sumber energi baru terbarukan dan daya referensi yang ditentukan untuk melakukan proses pengiriman daya.

2.2 Energi Angin

Angin merupakan fenomena alam yang timbul karena adanya perbedaan antara tekanan udara dari suatu wilayah ke wilayah lainnya. Perbedaan suhu udara dari tekanan udara ini juga berkaitan dengan panas matahari yang diterima oleh daerah tersebut. Keberadaan angin tidak dapat dihindari dalam kehidupan ini. Untuk itu, angin merupakan salah satu sumber energi yang dihasilkan dari sumber daya energi yang berkelanjutan jika dikelola dengan baik dan dikategorikan masuk ke dalam sumber energi terbarukan dalam UU No. 30 tahun 2007 tentang energi [6].

Angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan di Indonesia yang berpotensi cukup besar untuk dikonversi menjadi energi listrik. Berdasarkan data potensi energi terbarukan Indonesia pada tahun 2015 yang terdapat pada Rencana Umum Energi Nasional 2017 [7], energi angin memiliki potensi sebesar 60.637 MW dari total potensi

energi baru terbarukan sebesar 443.208 MW. Gambar 2.1 Menunjukkan peta persebaran angin di Indonesia [8].



Gambar 2. 1 Peta Pesebaran Kecepatan Angin Di Indonesia

Proses konversi energi angin menjadi energi listrik melalui beberapa tahapan, yakni perubahan energi kinetik angin menjadi energi gerak rotor yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Dalam proses konversi energi angin, ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi besarnya energi listrik yang dapat dihasilkan, diantaranya :

- a. Rotor/kincir, yang memiliki variasi jenis yang berbeda. Variasi yang dimaksud contohnya seperti diameter kincir, yang akan berbanding lurus dengan energi listrik yang akan dihasilkan.
- b. Kecepatan angin, yang akan berpengaruh pada kecepatan putar rotor yang akan menggerakkan generator.
- c. Jenis generator, yang memiliki karakteristik yang berbeda sesuai dengan tipe generator yang digunakan.

2.3 Turbin Angin

Turbin angin merupakan salah satu komponen penting dalam sistem konversi energi angin. Turbin angin merupakan alat yang digunakan untuk menangkap energi kinetik yang nantinya akan dikonversi menjadi tenaga listrik.

2.3.1 Teknologi Turbin Angin

Dalam sejarah turbin angin, pertama kali digunakan sebagai alat penggiling gandum atau yang disebut *windmill*. Seiring dengan berkembangnya teknologi, prinsip kerja turbin angin dimanfaatkan untuk memutar turbin pada generator agar kemudian dapat diolah menjadi tenaga listrik. Berdasarkan orientasi arah putarnya, turbin angin dibedakan menjadi dua, yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal.

2.3.1.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin ini berputar secara vertikal dan menggunakan *blade* yang menyerupai *propeller* yang membutuhkan penyangga sebagai letak ditematkannya poros rotor dan generator yang harus diletakkan searah dengan hembusan angin.

Penyangga pada turbin angin ini dapat menghasilkan turbulensi, untuk itu turbin angin harus dihadapkan ke arah angin yang berasal dari depan (*upwind*). *Blade* biasanya dibuat kaku agar kuat dengan hembusan angin yang kencang. Selain itu, penempatan *blade* juga harus diperhatikan agar dapat menyesuaikan hembusan angin dari belakang (*downwind*). *Blade* dirancang agar bisa melengkung agar bisa menyesuaikan dengan kecepatan hembusan angin [9]. Detail komponen turbin angin ini ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Turbin angin sumbu horizontal memiliki beberapa kelebihan, diantaranya :

- a. Menghasilkan konversi energi yang lebih tinggi
- b. Dapat mengakses angin yang lebih besar dengan posisi yang lebih tinggi
- c. Dapat dilakukan pengaturan daya dan *pitch angle* pada kecepatan angin yang tinggi

Sedangkan kekurangan yang dimiliki turbin angin jenis ini antara lain :

- a. Membutuhkan biaya konstruksi yang besar

- b. Membutuhkan tower yang tinggi dan kuat karena memiliki rotor poros utama dan generator listrik di puncak menara.

2.3.1.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin jenis ini memiliki poros rotor yang diletakan dengan tegak lurus atau vertikal. Hal ini dirancang agar dapat menyesuaikan dengan arah hembusan angin tanpa harus merubah arah turbin angin. Turbin angin jenis ini cocok diletakan pada daerah yang memiliki arah angin yang bervariasi. Gambar 2.3 menunjukkan gambar turbin angin sumbu vertikal.

Beberapa kelebihan yang dimiliki oleh turbin angin sumbu horizontal diantaranya :

- a. Biaya instalasi murah
- b. Perawatannya mudah karena diletakan dekat dengan tanah, bukan pada tempat yang tinggi
- c. Peletakkan turbin angin tidak bergantung pada arah angin
- d. Tidak membutuhkan penyangga

Sedangkan kekurangan yang dimiliki turbin angin jenis ini antara lain :

- a. Memiliki efisiensi yang lebih rendah
- b. Fluktuasi torsi lebih tinggi dan rawan terjadi vibrasi mekanik
- c. Sulit dilakukan pengaturan daya pada kecepatan angin yang tinggi

2.3.2 Karakteristik Turbin Angin

Dalam proses konversi energi kinetik angin menjadi energi listrik, turbin angin memegang peranan penting di dalamnya. Hembusan kecepatan angin nantinya akan dimanfaatkan untuk memutar turbin angin yang kemudian menjadi putaran rotor dalam generator yang akan menghasilkan energi listrik. Untuk menghitung daya angin (P_w) dapat diperoleh melalui persamaan (2.1) berikut :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 \quad (2.1)$$

Dimana :

- ρ : kerapatan udara (kg/m^3)
- A : luas sapuan *blade* turbin angin (m^2)
- V_{wind} : kecepatan angin (m/s)

Dengan persamaan di atas, maka dapat dibayangkan dalam sistem turbin angin, jika terdapat kecepatan angin yang berubah sedikit saja akan menyebabkan perubahan daya angin yang cukup signifikan. Misalkan, bila jari-jari turbin angin yang digunakan sebesar 1 m dan densitas udaranya 1.225 kg/m^3 dan kecepatan angin sebesar 3 m/s. maka daya angin akan sebesar 52 W dan dengan kecepatan angin 6 m/s, maka daya yang dihasilkan jauh lebih besar, yaitu 415 W.

Selain itu, dalam setiap sistem pasti memiliki tingkat efisiensi, karena hampir tidak ada sistem yang mampu bekerja dengan sempurna, sama halnya dalam sistem turbin angin ini. Daya yang dihasilkan oleh mesin listrik secara umum dituliskan dengan persamaan (2.2). Untuk mendapatkan hasil daya mekanik (P_m) dari sistem, maka nilai efisiensi turbin (C_p) juga harus diperhatikan. Daya mekanik ini berupa kecepatan putar bilah turbin (ω) dan torsi (τ). Persamaan daya mekanik (P_m) sistem turbin angin dituliskan dalam persamaan (2.3) berikut :

$$P = \omega \cdot T \quad (2.2)$$

$$P_m = P_w \cdot C_p \quad (2.3)$$

Dimana :

- P_w : daya angin (W)
- C_p : efisiensi turbin
- ω : kecepatan generator (RPM)
- T : torsi turbin angin (Nm)

Dalam mendesain sistem turbin angin, hal lain yang harus diperhatikan selain nilai efisiensi turbin (C_p) adalah *Tip Speed Ratio* (TSR). Semakin besar nilai efisiensi dari sebuah turbin, maka semakin besar pula kemampuan turbin angin tersebut untuk mengambil energi yang didapatnya. *Tip Speed Ratio* (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar *blade* turbin dengan kecepatan angin. *Tip Speed Ratio* (TSR) dapat dinyatakan dengan persamaan (2.4) berikut :

$$TSR = \frac{\omega_r R}{V_{wind}} \quad (2.4)$$

Dimana :

- ω_r : kecepatan putar *blade* turbin
- R : jari-jari luas sapuan *blade* turbin angin
- V_{wind} : kecepatan angin

Dari beragam tipe turbin angin, tipe 3 *blade propeller* adalah tipe turbin angin yang memiliki nilai efisiensi yang mendekati ideal (mencapai 40%) dan juga dapat digunakan untuk putaran tinggi. Pada perkembangan

turbin angin saat ini, produk komersil lebih banyak mengembangkan turbin angin dengan tipe 2 dan 3 *blade propeller*.

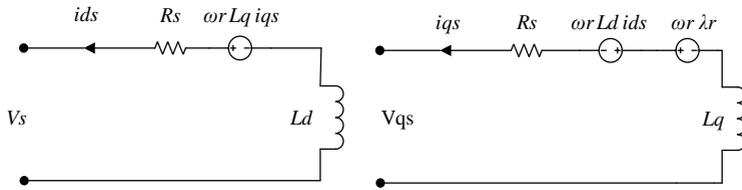
2.4 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Generator merupakan salah satu peralatan yang penting yang diperlukan dalam sebuah sistem pembangkit listrik. Generator berfungsi sebagai alat konversi dari energi mekanik ke energi listrik. Salah satu alternatif yang dapat dipilih dalam pembangkit listrik yang memanfaatkan energi baru terbarukan adalah *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Ratna Ika Putri, dalam disertasinya [4] menulis bahwa PMSG memiliki beberapa keuntungan, diantaranya :

- 1) Tidak memiliki sikat dan slip ring, generator jenis ini memiliki bentuk dan momen inersia yang kecil
- 2) Memiliki bentuk yang sederhana namun berefisiensi tinggi
- 3) Fluks magnetik yang terdapat dalam generator ini berasal dari permanen magnet yang dimilikinya dan juga tidak memiliki belitan rotor. Hal ini membuat PMSG menghasilkan kerapatan jenis yang tinggi sehingga dapat mengurangi ukuran dan beratnya.
- 4) Tidak memerlukan eksitasi yang berasal dari eksternal generator, sehingga tidak terdapat rugi-rugi tembaga pada rangkaian rotor, dan biaya perawatannya cenderung rendah.
- 5) Reliabilitas tinggi
- 6) Apabila terdapat gangguan pada grid tidak mempengaruhi generator secara langsung karena amplitudo dan frekuensi tegangannya dikontrol penuh oleh konverter daya

Namun PMSG juga memiliki kerugian, diantaranya :

- 1) Bahan permanen magnet cenderung mahal
- 2) Proses fabrikasi yang rumit
- 3) Proses penghilangan pada permanen magnet membutuhkan suhu yang tinggi
- 4) Sangat bergantung pada konverter daya, karena semua daya yang dihasilkan harus melalui konverter daya
- 5) Memiliki rugi-rugi yang tinggi pada rangkaian elektronika



Gambar 2. 2 Model Sederhana PMSG Dalam Sumbu dq

Model dinamik PMSG digambarkan dalam rangkaian ekivalen dq seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Berdasarkan rangkaian tersebut, didapatkan persamaan yang menyatakan tegangan stator pada sumbu d (2.5) dan tegangan stator pada sumbu q (2.6) berikut :

$$v_{ds} = -i_{ds} \cdot R_s - \omega_r \cdot L_q \cdot i_{qs} - p \cdot L_d \cdot i_{ds} \quad (2.5)$$

$$v_{qs} = -i_{qs} \cdot R_s - \omega_r \cdot L_d \cdot i_{ds} - p \cdot L_q \cdot i_{qs} \quad (2.6)$$

Dimana :

- i_{ds} = arus stator sumbu d
- i_{qs} = arus stator sumbu q
- R_s = resistansi belitan
- L_d = induktansi belitan pada sumbu d
- L_q = induktansi belitan pada sumbu q
- p = jumlah *pole*
- ω_r = kecepatan rotasi elektrik PMSG (rad/s)

Torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh PMSG dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.7) berikut :

$$T_e = \frac{3p}{2} (i_{qs} \cdot \lambda_r + i_{ds} \cdot i_{qs} (L_d + L_q)) \quad (2.7)$$

Kecepatan rotor PMSG dapat dinyatakan dengan persamaan (2.8) :

$$\omega_r = \frac{p}{J_s} (T_e - T_m) \quad (2.8)$$

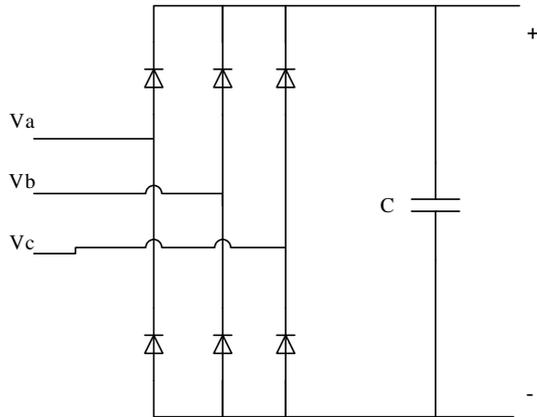
Sedangkan daya elektrik (P) yang dihasilkan oleh PMSG dapat dinyatakan oleh persamaan (2.9) berikut :

$$P = 1.5 (v_{sd} \cdot i_{sd} - v_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (2.9)$$

2.5 Penyearah Dioda Tiga Fasa

Penyearah atau yang biasa dikenal dengan istilah *rectifier* adalah salah satu jenis konverter AC-DC yang merupakan komponen elektronika daya yang berfungsi mengubah masukan gelombang bolak-balik (AC) menjadi gombang searah (DC). Pada penyearah tiga fasa dikenal

beberapa jenis yang digolongkan berdasarkan banyak pulsa, diantaranya 3 pulsa, 6 pulsa, dan 12 pulsa. Berdasarkan jenis saklar yang digunakan, penyearah tiga fasa dikelompokkan menjadi penyearah tidak terkontrol, terkontrol semi, dan terkontrol penuh [10]. Pada bagian ini akan dibahas mengenai penyearah tiga fasa 6 pulsa tidak terkontrol. Rangkaian penyearah dioda tiga fasa 6 pulsa tidak terkontrol ditunjukkan dalam Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Penyearah Tiga Fasa 6 Pulsa Tidak Terkontrol.

Pada penyearah jenis ini, tiga diode akan menghasilkan bentuk gelombang tegangan positif, sedangkan tiga diode lainnya akan menghasilkan gelombang negatif pada sisi output DC. Apabila bentuk gelombang ini disetarakan dengan tegangan DC pada umumnya, yaitu bernilai nol pada polaritas negatif, maka akan terbentuk enam puncak gelombang pada sisi polaritas positif. Pada gelombang DC yang dihasilkan, lebar tiap puncak adalah 60° sehingga batas-batas pada kurva sinusoidal kuadran pertama adalah 60° dan 120° . Nilai amplitudo pada penyearah jenis ini adalah harga maksimum tegangan *line-to-line*.

Dioda akan aktif bergantian yang sesuai dengan sudut konduksi $2\pi/3$, sehingga tegangan keluaran rata-rata yang dihasilkan penyearah (V_{dc}) ini dapat dinyatakan dengan persamaan (2.10) dan persamaan (2.11) berikut :

$$V_{DC} = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{3}V_m \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (2.10)$$

$$V_{DC} = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \quad (2.11)$$

Dimana : V_m = tegangan masukan maksimum

Pada Tugas Akhir ini, tegangan maksimum dari rangkaian penyearah berasal dari tegangan keluaran PMSG. Tegangan keluaran per fasa untuk PMSG (V_{ph}) dapat dinyatakan dengan persamaan (2.12) berikut :

$$V_{ph} = E_g - I_g (R_s + jp\omega L_s) \quad (2.12)$$

Dimana : E_g = daya elektromotif PMSG

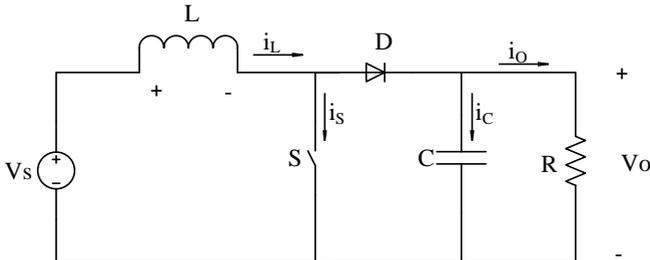
I_g = arus fasa PMSG

Pada PMSG, daya elektromotif yang dihasilkan sebanding dengan tegangan keluaran penyearah atau tegangan sis DC. Seperti yang diketahui tegangan maksimum (V_m) merupakan $\sqrt{2} V_{ph}$, sehingga dengan menggunakan persamaan (2.11) dan (2.12) maka tegangan keluaran penyearah dapat dinyatakan dengan persamaan (2.13) berikut :

$$\begin{aligned} V_{DC} &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{ph} \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} (E_g - I_g (R_s + jp\omega L_s)) \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.6 Konverter Boost

Konverter *boost* adalah salah satu jenis konverter DC-DC yang merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk menaikkan tegangan DC input menjadi tegangan DC output yang diinginkan. Konverter ini memanfaatkan beberapa komponen seperti induktor, kapasitor, dioda, dan transistor yang berfungsi sebagai saklar pada saat proses *switching*. Rangkaian konverter *boost* ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Rangkaian Konverter *Boost*.

Prinsip kerja konverter ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu pada saat *switch* tertutup dan pada saat *switch* terbuka. Pada saat *switch* tertutup, arus pada induktor L akan naik secara linier dan pada saat yang bersamaan dioda D mati. Pada kondisi ini, induktor akan mengalami proses *charging*. Kondisi yang kedua yaitu pada saat *switch* terbuka, dioda akan aktif dan induktor akan bekerja sebagai penyuplai beban (*discharging*) yang ditambah dengan tegangan input. Pengaktifan *switch* transistor bergantung pada *duty cycle* pulsa PWM yang diberikan, yang dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.14)$$

$$t_{on} = D \cdot T_s \quad (2.15)$$

$$t_{off} = T_s - t_{on}$$

$$t_{off} = T_s - (D \cdot T_s)$$

$$t_{off} = T_s (1 - D) \quad (2.16)$$

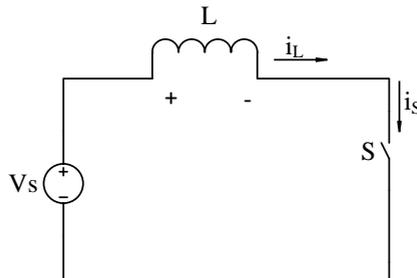
Dimana :

- t_{on} = waktu pulsa *on*
- t_{off} = waktu pulsa *off*
- D = *duty cycle*
- T_s = periode *switching*

Berdasarkan cara kerjanya, konverter *boost* dibagi menjadi dua bagian, yaitu kondisi pada saat *switch* 'on' dan pada saat saata *switch* 'off'.

1) Kondisi saat *switch* 'on'

Pada kondisi ini, induktor L pada rangkaian akan terhubung langsung dengan sumber V_s dan induktor L akan mengalami proses *charging*. Gambar 2.5 merupakan ilustrasi pada saat konverter dalam kondisi *switch* 'on'.



Gambar 2. 5 Rangkaian Konverter *Boost Switch* 'On'.

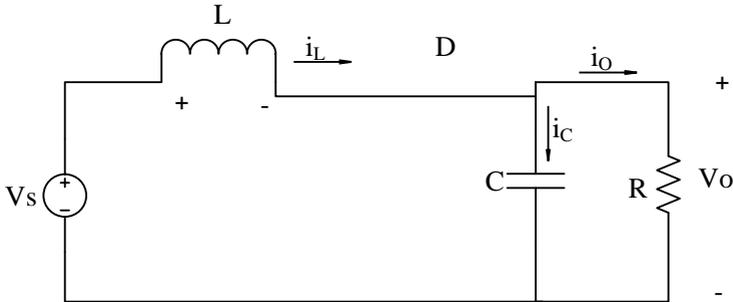
Persamaan pada rangkaian di atas dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 V_s &= V_L \\
 V_s &= L \frac{di}{dt} \\
 V_s &= L \frac{di}{t_{on}} \\
 L_{di} &= V_s \cdot t_{on}
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

Dimana : V_s = tegangan sumber
 V_L = tegangan pada induktor L

2) Kondisi saat *switch 'off'*

Pada kondisi ini, sumber V_s akan terhubung seri dengan induktor L dan resistor R . pada kondisi ini induktor L akan melakukan proses *discharging*, sehingga induktor L bekerja sebagai sumber. Resistor R akan menjadi beban yang disuplai oleh dua sumber, yaitu sumber V_s dan induktor L . Gambar 2.6 merupakan ilustrasi pada saat konverter dalam kondisi *switch 'off'*.



Gambar 2. 6 Rangkaian Konverter *Boost Switch 'Off'*

Persamaan rangkaian di atas dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 V_o &= V_s + V_L \\
 V_o &= V_s + L \frac{di}{dt} \\
 V_o &= V_s + L \frac{di}{t_{off}}
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Dengan substitusi persamaan (2.17) dengan (2.18), maka didapatkan persamaan berikut :

$$V_o = V_s + V_s \frac{t_{on}}{t_{off}}$$

$$\begin{aligned}
 V_o &= V_s \left(1 + \frac{t_{on}}{t_{off}} \right) \\
 V_o &= V_s \left(\frac{t_{off} + t_{on}}{t_{off}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Substitusi persamaan (2.19) dengan (2.16) :

$$\begin{aligned}
 V_o &= V_s \left(\frac{T_s}{T_s (1-D)} \right) \\
 V_o &= V_s \frac{1}{1-D}
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Dalam perancangannya, konverter *boost* membutuhkan beberapa komponen yang harus ditentukan besar nilainya untuk menentukan besar *ripple* yang diinginkan. Komponen tersebut diantaranya induktor (L) dan kapasitor (C). Penentuan nilai induktor (L) dituliskan dalam persamaan (2.21) berikut :

$$L = \frac{V_s \cdot t_{on}}{\Delta i} \tag{2.21}$$

Dimana :
 L = induktor
 t_{on} = waktu pulsa *on*
 Δi = besar *ripple* arus

Sedangkan penentuan nilai kapasitor (C) dituliskan dalam persamaan (2.22) berikut :

$$C = \frac{V_o \cdot D}{R \cdot \Delta V \cdot f} \tag{2.22}$$

Dimana :
 C = kapasitor
 D = *duty cycle*
 R = resistor konverter
 ΔV = besar *ripple* tegangan
 F = frekuensi *switching*

Konverter *boost* juga memegang peran penting dalam menentukan karakteristik daya yang dapat dihasilkan sistem turbin angin. Daya keluaran yang dikirim ke beban dapat dinyatakan dengan :

$$\begin{aligned}
 P_{out} &= V_{out} \cdot I_o \\
 P_{out} &= \frac{V_{out}^2}{R_L}
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

Dimana :
 I_o = arus keluaran konverter *boost*
 R_L = beban

Berdasarkan persamaan (2.20) dan (2.23) didapatkan persamaan :

$$P_{out} = \frac{V_{DC}^2}{(1-D)^2 R_L} \tag{2.24}$$

Bila rugi-rugi daya konverter sangat kecil dan diabaikan maka daya keluaran akan sama dengan daya masukan, sehingga :

$$P_{in} = \frac{V_{DC}^2}{R_{in}} \cong P_{out} = \frac{V_{DC}^2}{(1-D)^2 R_L} \quad (2.25)$$

Maka, resistansi masukan konverter *boost* (R_{in}) dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$R_{in} = (1 - D)^2 R_L \quad (2.26)$$

Berdasarkan persamaan (2.26), penurunan *duty cycle* akan menghasilkan kenaikan pada nilai resistansi masukan pada konverter *boost*, sehingga arus masukan konverter *boost* akan menurun, demikian pula pada arus keluaran dan torsi elektromagnetik PMSG. Penurunan torsi elektromagnetik PMSG akan meningkatkan kecepatan rotor PMSG. Maka dapat disimpulkan bahwa kecepatan rotor PMSG dapat diatur melalui pengaturan *duty cycle* yang ditentukan oleh kontroler MPPT untuk mendapatkan daya maksimum.

2.7 Penyimpan Energi

Sistem turbin angin sangat bergantung pada kecepatan angin yang menggerakkan turbin angin untuk dikonversi menjadi energi listrik. Kecepatan angin yang fluktuatif membuat daya yang dihasilkan pun berfluktuatif, daya yang berfluktuatif ini menyebabkan frekuensi yang juga berfluktuatif dan kedip tegangan (*flicker*) pada sistem. Selain itu, dibutuhkan daya yang stabil yang sesuai dengan kebutuhan beban [11]. Untuk itu dibutuhkan sebuah mekanisme yang dapat bekerja sebagai penyeimbang daya saat terjadi daya berlebih ataupun kekurangan daya pada sistem agar daya yang dihasilkan sistem turbin angin menjadi konstan, hal inilah yang disebut sebagai *power smoothing* [12].

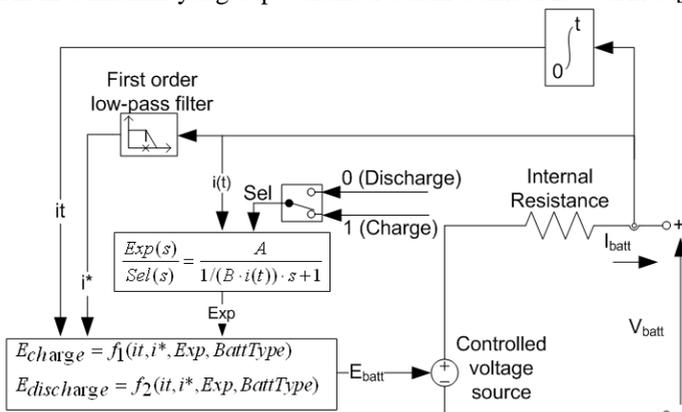
Penyimpan energi merupakan salah komponen alternatif yang dapat digunakan yang dapat bertindak sebagai penyeimbang daya atau *power smoothing* yang dihasilkan sistem konversi energi angin. Penyimpan energi mampu melakukan mekanisme *charging*, saat daya yang dihasilkan turbin angin melebihi daya yang dibutuhkan beban, dan dapat melakukan mekanisme *discharging* saat daya yang dibutuhkan beban melebihi daya yang mampu dihasilkan oleh turbin angin. Dalam Tugas Akhir ini, dilakukan penelitian yang membandingkan baterai dan superkapasitor sebagai penyimpan energi pada sistem turbin angin.

2.7.1 Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen sistem penyimpanan energi yang dapat dipilih sebagai alternatif untuk memperoleh keseimbangan daya, antara daya yang dihasilkan oleh sistem turbin angin dan dengan daya yang dibutuhkan oleh grid melalui pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) dari dan atau ke sistem penyimpan energi ini.

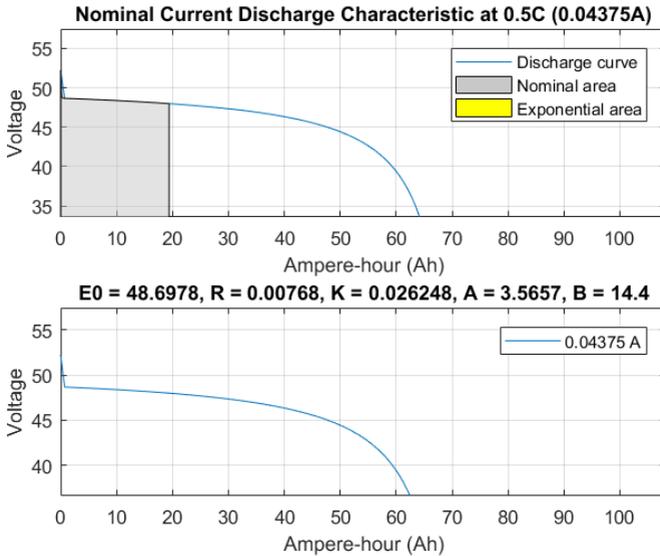
Baterai merupakan salah satu teknologi penyimpan energi tertua dan paling banyak digunakan hingga sampai saat ini, karena cukup efektif untuk aplikasi daya kecil maupun tinggi. Baterai terdiri dari dua atau lebih sel yang dihubungkan dengan susunan seri atau paralel untuk mendapatkan kapasitas dan tegangan operasi tertentu yang dibutuhkan. Baterai memiliki efisiensi pengisian dan pengosongan yang tinggi, masa pakai yang panjang, dan biaya yang relatif rendah [13].

Salah satu baterai yang umum digunakan ialah *Lead Acid*. Baterai ini memiliki performansi yang relatif rendah pada suhu yang terlalu tinggi maupun terlalu rendah dan masa pakai dari baterai ini pun cenderung singkat. Baterai ini umumnya dijumpai sebagai sistem penyimpanan energi pada aplikasi *photovoltaic*, terutama pada sistem *stand alone* karena mudah dibawa kemana-mana. Dalam Tugas Akhir ini, digunakan permodelan baterai *lead acid generic* pada MATLAB/Simulink yang dapat diamati dalam Gambar 2.7 berikut [14].



Gambar 2. 7 Permodelan Baterai *Lead Acid Generic* MATLAB/Simulink

Sebagai penyimpan energi, baterai memiliki kurva karakteristik tegangan terhadap *state of charge* (SOC) pada saat melakukan proses pengisian maupun pengosongan daya. Baterai memiliki karakteristik tegangan yang cenderung konstan terhadap perubahan SOC yang dimilikinya. Kurva karakteristik baterai terhadap *state of charge* (SOC) dapat diamati pada Gambar 2.8 [14].



Gambar 2. 8 Kurva Karakteristik Tegangan VS Kapasitas Baterai

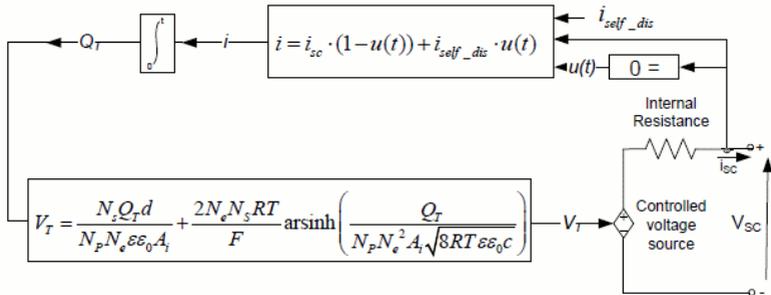
2.7.2 Superkapasitor

Superkapasitor, atau yang biasa disebut *ultracapacitor*, termasuk ke dalam salah satu kategori media penyimpanan energi elektrokimia. Pertama kali ditemukan di SOHIO (*Standart Oil Company of Ohio*) oleh Robert A. Rightmire. Penemuan ini diawali dengan penggunaan medan elektrostatis untuk melewati batas *interphase*, antara elektron dengan ion pada konduktor untuk menambah penyimpanan energi dengan prinsip adsorpsi ionik pada batas *interphase* [15].

Superkapasitor memiliki kapasitansi beberapa kali lipat dibandingkan dengan kapasitor konvensional. Prinsip-prinsip yang digunakan pada superkapasitor mengikuti dasar yang sama yang

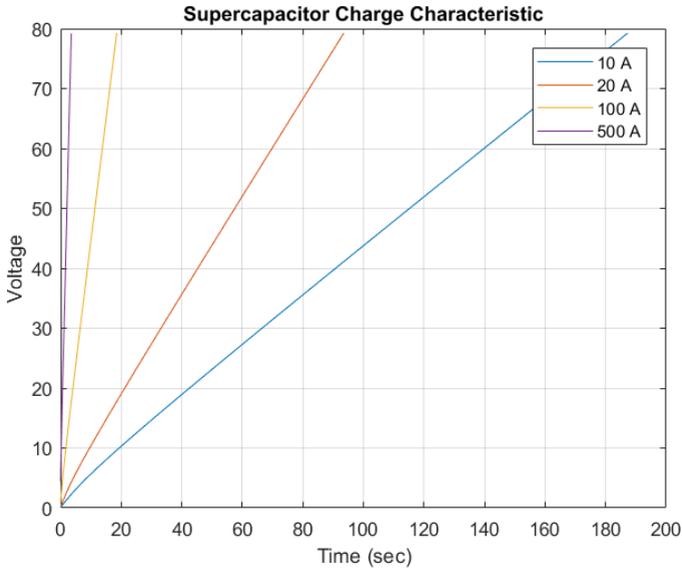
digunakan pada kapasitor konvensional. Hanya saja, pada superkapasitor permukaan elektroda dibuat lebih besar dan juga memiliki ketebalan yang lebih tipis sehingga jarak antara dua keping elektrodanya semakin tipis.

Hal ini berdampak pada jumlah kapasitansi dan energi yang mampu disimpan superkapasitor dibandingkan kapasitor konvensional, juga memiliki kerapatan daya lebih tinggi, waktu *charging* yang lebih pendek dan siklus umur simpan yang lebih lama dibanding baterai biasa. Pada Tugas Akhir ini, digunakan permodelan superkapasitor *generic* pada MATLAB/Simulink seperti yang dapat diamati dalam Gambar 2.9 [16].



Gambar 2. 9 Permodelan Superkapasitor *Generic* MATLAB/Simulink

Superkapasitor memiliki kurva karakteristik tegangan terhadap *state of charge* (SOC) yang dapat diamati melalui proses pengisian dan pengosongan daya pada penyimpanan energi ini. Karakteristik tegangan pada kapasitor relatif linear mengikuti perubahan SOC yang dimilikinya. Ketika mengalami proses pengisian daya atau *charging*, maka profil tegangan superkapasitor akan naik dan pada saat mengalami proses pengosongan daya atau *discharging* profil tegangan superkapasitor akan menurun. Kurva karakteristik tegangan superkapasitor ditunjukkan pada Gambar 2.10 [16].

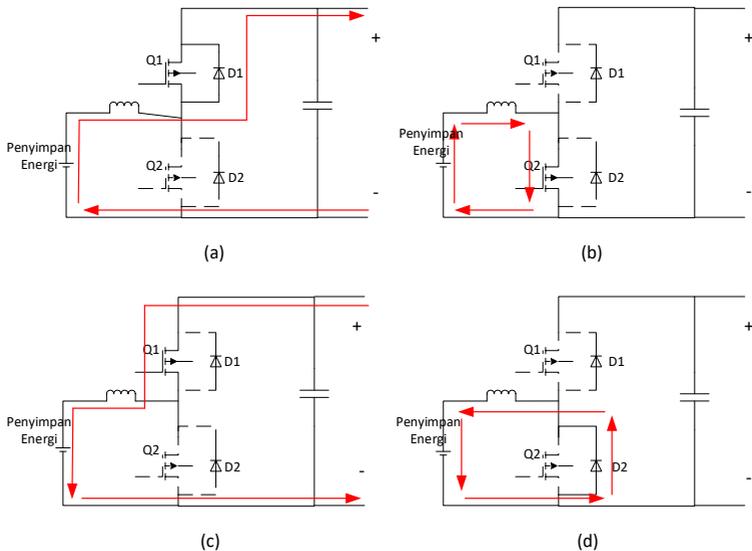


Gambar 2. 10 Kurva Karakteristik Tegangan Superkapasitor Saat Kondisi *Charge*

2.8 Konverter Bidirectional

Dalam aplikasinya, sistem penyimpanan energi membutuhkan rangkaian yang mampu bekerja sebagai perantara untuk melakukan proses *charging* dan *discharging* untuk mencapai keseimbangan daya yang dibutuhkan. Konverter *bidirectional* merupakan rangkaian yang dapat dipilih sebagai perantara agar penyimpan energi mampu melakukan proses *charging* dan *discharging*.

Konverter *bidirectional* merupakan konverter yang mampu bekerja dua arah yang dapat menjaga tegangan DC *link* menjadi konstan, melalui proses pengisian dan pengosongan penyimpan energi. Konverter ini mampu bertindak sebagai konverter *boost* saat penyimpan energi melakukan proses *charging* dan bertindak sebagai konverter *buck* saat melakukan proses *discharging*. Skema kinerja konverter ini dijelaskan dalam Gambar 2.11 [4].



Gambar 2. 11 Skema Kinerja Konverter *Bidirectional*

Berdasarkan gambar di atas, prinsip kerja rangkaian konverter *buck boost bidirectional* dibagi menjadi empat bagian, yakni :

- 1) Bagian 1 (D1 on, Q1 off, D2 off, Q2 off) :
Bagian ini ditunjukkan dalam Gambar 2.8a. Dalam bagian ini konverter menunjukkan keadaan dimana koverter akan menyuplai daya ke DC link.
- 2) Bagian 2 (Q2 on, D1 off, Q1 off, D2 off) :
Bagian ini ditunjukkan dalam Gambar 2.8b. Dalam bagian ini konverter menunjukkan keadaan *boost* dan induktor akan mengalami proses *charging* sehingga arus induktor akan meningkat.
- 3) Bagian 3 (Q1 on, D1 off, D2 off, Q2 off) :
Bagian ini ditunjukkan dalam Gambar 2.8c. Dalam bagian ini konverter menunjukkan keadaan *buck* dan daya dari DC link akan disuplai ke baterai.

- 4) Bagian 4 (D2 on, D1 off, Q1 off, Q2 off) :
Bagian ini ditunjukkan dalam Gambar 2.8d. Dalam bagian ini konverter menunjukkan keadaan dimana arus induktor tidak dapat berubah langsung, sehingga akan dibuang melalui dioda 2 sehingga tegangan pada DC link akan turun dibandingkan tegangan baterai.

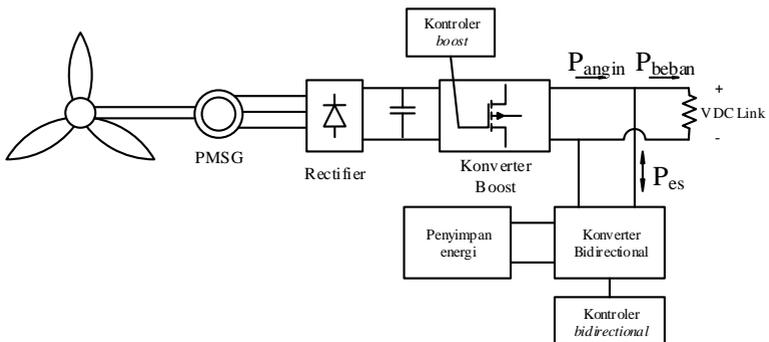
BAB 3

PERANCANGAN DAN PERMODELAN SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN

Dalam bab ini akan dijelaskan tentang permodelan sistem konversi energi angin yang terhubung dengan penyimpanan energi yang akan digunakan dalam simulasi. Dalam Tugas Akhir ini, simulasi dilakukan menggunakan *software* MATLAB/Simulink untuk mendemonstrasikan kinerja sistem konversi energi angin. Blok-blok bagian dalam sistem konversi energi angin yang telah dijelaskan dalam bab sebelumnya dimodelkan dengan menggunakan blok *generic* dari *software* MATLAB/Simulink.

3.1 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Angin

Keseluruhan sistem turbin angin yang digunakan dalam Tugas Akhir ini terdiri dari beberapa blok, diantaranya turbin angin yang terhubung dengan PMSG, penyearah dioda tiga fasa atau *rectifier*, konverter *boost* yang terhubung dengan kontroler *boost*, dan sebuah beban resistif yang diparalel dengan penyimpanan energi yang terhubung dengan konverter *bidirectional* dengan kontroler *bidirectional*. Keseluruhan sistem konversi energi angin digambarkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Skema Sistem Konversi Energi Angin

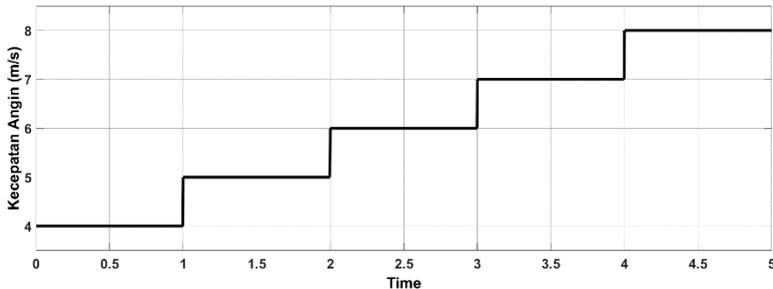
Berdasarkan gambar di atas, dapat diamati daya yang mengalir ke beban (P_{beban}) adalah penjumlahan dari daya yang dihasilkan dari energi angin (P_{angin}) dan daya yang berasal dari penyimpanan energi (P_{es}). Untuk itu, untuk mendapatkan daya yang sesuai dengan kebutuhan daya pada

beban diperlukan keseimbangan antara daya yang dihasilkan dari energi angin dan daya yang berasal dari penyimpanan energi.

3.2 Kecepatan Angin

Kecepatan angin memiliki peran penting dalam penentuan energi listrik yang dapat dihasilkan sistem turbin angin. Dalam bab sebelumnya telah dijelaskan bahwa daya yang dihasilkan sistem turbin angin sangat bergantung pada perubahan kecepatan angin. Karakteristik kecepatan yang tidak menentu, tidak dapat dikontrol, dan bervariasi terhadap waktu dan tempat dapat menyebabkan gangguan pada daya yang dikirim ke beban.

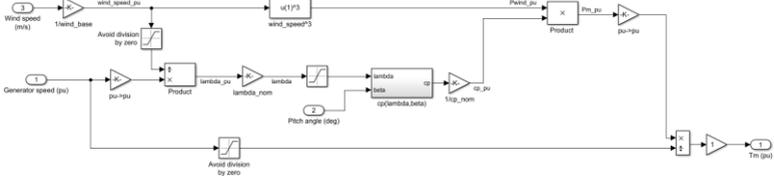
Pada sub-bab ini, kecepatan angin yang digunakan adalah permodelan kecepatan angin yang berubah konstan dari 4 m/s sampai 8 m/s untuk mengetahui kinerja dari masing-masing blok dari sistem konversi energi angin. Grafik kecepatan angin di tunjukkan oleh Gambar 3.2.



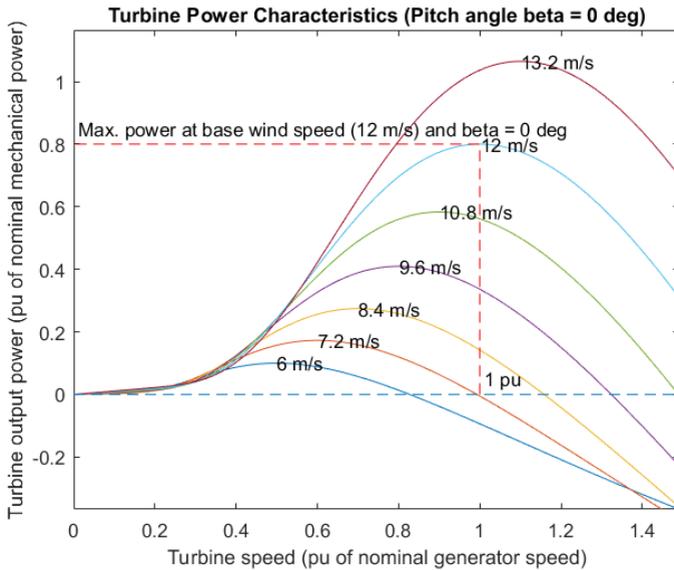
Gambar 3. 2 Grafik Kecepatan Angin

3.3 Model Turbin Angin dan PMSG

Sistem turbin angin yang digunakan dalam Tugas Akhir ini memiliki peralatan pembangkit utama yang berupa turbin angin dan PMSG. Turbin angin yang dihubungkan ke PMSG termasuk kedalam sistem *direct driven*, yang berarti turbin angin yang terhubung dengan PMSG tidak menggunakan *gear*. Jenis turbin angin yang digunakan adalah *Horizontal Axis Wind Turbine* dengan mode operasi *variable speed* dan *fixed pitch*, yang berarti dioperasikan dengan kecepatan angin yang bervariasi.



Gambar 3. 3 Permodelan Turbin Angin Dengan Simulink



Gambar 3. 4 Kurva Karakteristik Turbin Angin

Permodelan turbin angin dengan menggunakan *software* Simulink ditunjukkan pada Gambar 3.3. dan kurva karakteristik turbin angin ditunjukkan pada Gambar 3.4 di atas. Nilai parameter turbin angin dan PMSG yang dibutuhkan ditunjukkan dalam Tabel 3.1.

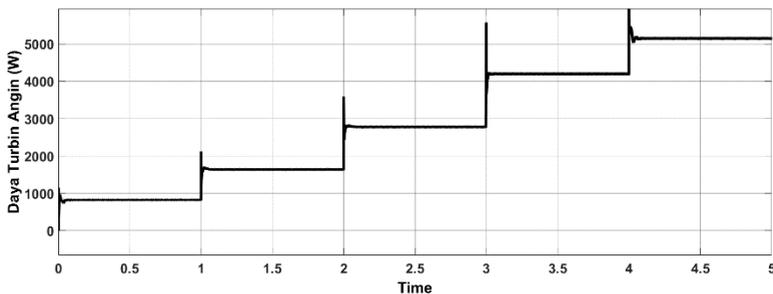
Tabel 3. 1 Parameter Turbin Angin Dan PMSG

Rating daya keluaran	8.5 kW
Rating kecepatan	12 m/s

Tabel 3.1 (lanjutan) Parameter Turbin Angin dan PMSG

Jumlah kutub	10
Resistansi stator	0.425 W
Induktansi stator	8.2 mH
Inersia	0.01197 kg.m ²
Faktor gesekan	0.001189 N.m.s
Flux	0.433 V.s
Tipe rotor	Salient-pole

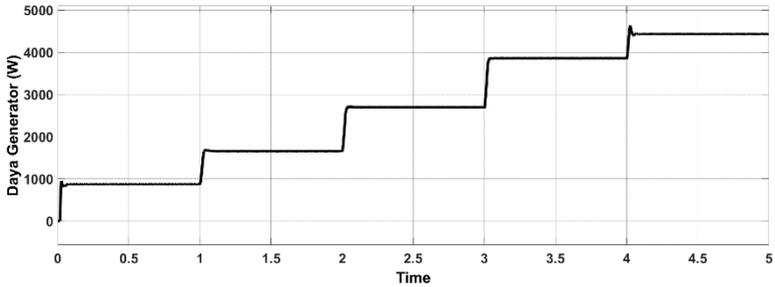
Selanjutnya, blok turbin angin dan PMSG akan diuji dengan masukan kecepatan angin seperti yang terdapat pada Gambar 3.2 dan diamati daya keluarannya. Dalam simulasi ini, akan ditelusuri hasil kinerja dari turbin angin dengan mengukur berdasarkan hasil simulasi berdasarkan kecepatan angin yang terdapat pada Gambar 3.2 melalui pendekatan perkalian torsi dengan kecepatan generator, seperti yang terdapat pada persamaan (2.2). Hasil simulasi turbin angin ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Hasil Simulasi Turbin Angin

3.3.1 Simulasi PMSG

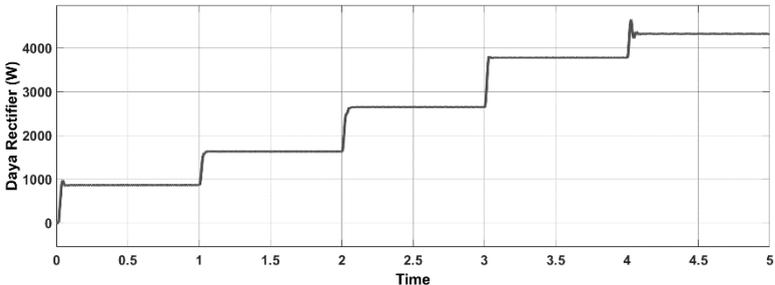
Untuk mengetahui verifikasi model dari PMSG dalam sistem konversi energi angin, PMSG akan diuji berdasarkan kecepatan angin yang telah dijelaskan pada Gambar 3.2. Hasil simulasi PMSG ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Hasil Simulasi PMSG

3.4 Penyearah Dioda Tiga Fasa

Untuk mengetahui verifikasi model dari penyearah dioda tiga fasa atau *rectifier* dalam sistem konversi energi angin, penyearah dioda tiga fasa atau *rectifier* akan diuji berdasarkan kecepatan angin yang telah dijelaskan pada Gambar 3.2. Hasil simulasi *rectifier* ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Hasil Simulasi *Rectifier*

3.5 Model Konverter *Boost*

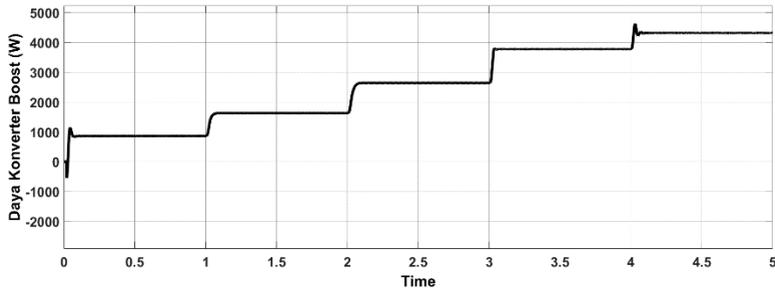
Dalam menghasilkan daya maksimum, perlu dilakukan pengaturan kecepatan generator yang diatur berdasarkan pengaturan *duty cycle* yang telah dijelaskan dalam persamaan (2.22). Untuk itu dilakukan perhitungan nilai paramete-parameter konverter *boost* agar sesuai dengan hasil yang diinginkan. Berikut adalah parameter komponen-komponen yang digunakan pada konverter *boost* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini :

- a) Tegangan output konverter (DC link) = 400 Volt

- b) *Ripple* arus keluaran $= \pm 1 \%$
- c) *Ripple* tegangan keluaran $= \pm 1 \%$
- d) Frekuensi *switching* $= 25 \text{ kHz}$

Berdasarkan persamaan (2.19) dan (2.20) dan parameter yang digunakan di atas, maka ditentukan besar nilai L sebesar 40 mH dan nilai C sebesar 56.3 μF .

Untuk mengetahui verifikasi model dari konverter *boost* dalam sistem konversi energi angin, konverter *boost* akan diuji berdasarkan kecepatan angin yang telah dijelaskan pada Gambar 3.2. Hasil simulasi konverter *boost* ditunjukkan pada Gambar 3.8.



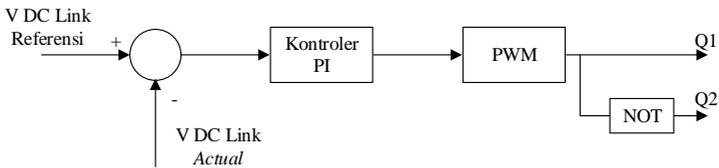
Gambar 3. 8 Hasil Simulasi Konverter *Boost*

3.6 Model Konverter *Bidirectional*

Seperti apa yang telah dijelaskan pada bab 2, konverter *bidirectional* bekerja dengan cara mengatur *switch* untuk mengatur aliran daya dua arah ke penyimpanan energi. Kinerja ini bertujuan untuk menjaga tegangan DC link konstan, melalui proses pengisian dan pengosongan penyimpanan energi. Pada Tugas Akhir ini, kontroler *bidirectional* bekerja dengan menggunakan referensi tegangan DC Link seperti yang terdapat pada Gambar 3.1.

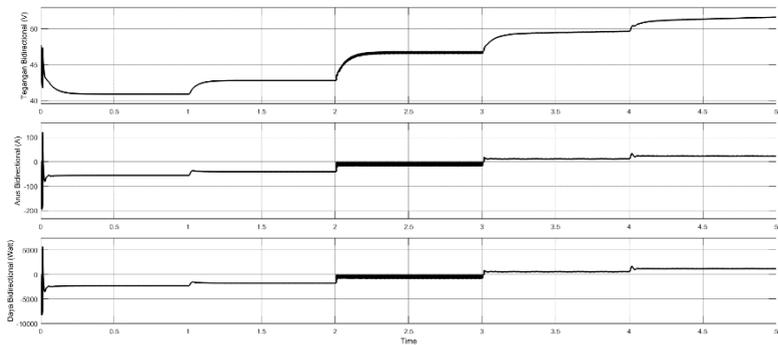
Dalam kerjanya, konverter *bidirectional* membutuhkan sebuah kontroler yang dapat mengatur proses *switching* transistor agar proses *charging* dan *discharging* penyimpan energi dapat dilakukan untuk menjaga keseimbangan daya. Kontroler *Proportional Integrator* (PI) dapat dipilih untuk mengatur proses tersebut berdasarkan perubahan arus yang dirasakan kontroler ini. Induktor dalam konverter *bidirectional* ditentukan sebesar 1 mH. Berdasarkan metode *trial and error*, Nilai parameter kontroler PI yang digunakan adalah $K_p = 300$ dan $K_i = 10$.

Kontroler PID bekerja menggunakan tegangan DC *link*, tegangan DC *link* referensi dan *error*. *Error* merupakan selisih antara tegangan DC *link* referensi dan hasil pengukuran tegangan DC *link*. Jika tegangan DC *link* lebih besar dari tegangan DC *link* referensi maka penyimpan energi akan melakukan proses *charging*, dan jika tegangan DC *link* lebih kecil dari tegangan DC *link* referensi maka penyimpan energi akan menyuplai daya ke DC *link* untuk mempertahankan tegangan DC *link* sesuai dengan referensi yang digunakan. Kontroler PI digambarkan dalam Gambar 3.9, dengan keluaran kontroler untuk mengontrol *switch* Q1 dan Q2 yang terdapat pada Gambar 3.9 .



Gambar 3. 9 Kontroler PI untuk Konverter *Bidirectional*

Konverter *bidirectional* melakukan proses *discharging* pada saat nilai dayanya menunjukkan nilai negatif dan akan melakukan proses *charging* pada saat nilai dayanya menunjukkan nilai positif. Hasil simulasi tegangan, arus, dan daya konverter *bidirectional* ditunjukan dalam Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Hasil Simulasi Tegangan, Arus, dan Daya Konverter *Bidirectional*

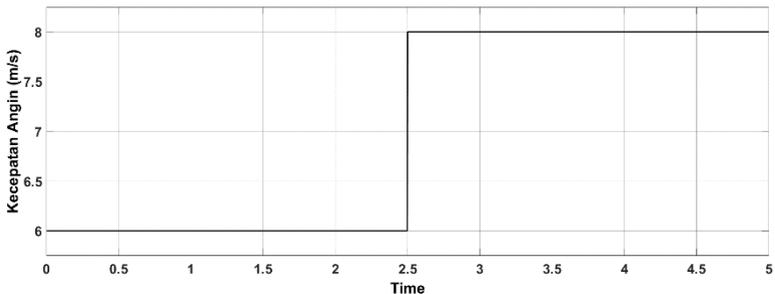
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil simulasi dan analisis dari sistem konversi energi angin yang terhubung dengan dua jenis penyimpanan energi yang berbeda, yaitu superkapasitor dan baterai, dengan membandingkan kedua jenis penyimpan energi tersebut dengan mempertimbangkan beberapa aspek seperti kapasitas energi, karakteristik tegangan, arus, daya, data *power density*, data *energy density*, *lifetime*, dan biaya, serta melakukan simulasi untuk kedua penyimpan energi untuk melakukan kinerja *power smoothing*.

Sistem konversi energi angin akan disimulasikan menggunakan masukan perubahan kecepatan angin yang ekstrem. Penentuan kapasitas dalam bab ini dipilih berdasarkan karakteristik kecepatan angin ekstrem yang dimodelkan seperti pada Gambar 4.1



Gambar 4. 1 Gambar Grafik Kecepatan Angin Berubah Ekstrem

Penentuan kapasitas energi untuk masing-masing penyimpan energi ditentukan dengan mempertimbangkan karakteristik daya yang dihasilkan berdasarkan karakteristik kecepatan angin di atas. Daya penyimpan energi dapat digambarkan dalam rumus berikut [3] :

$$P_{beban} = P_{angin} + P_{es} \quad (4.1)$$

Dimana :

- P_{beban} : daya beban sistem turbin angin (Watt)
- P_{angin} : daya keluaran turbin angin (Watt)
- P_{es} : daya *energy storage*/penyimpan energi (Watt)

Untuk jenis penyimpan energi jenis superkapasitor, penentuan kapasitas superkapasitor dituliskan dengan rumus berikut [5] :

$$C_{sup} = \frac{2 E_{sc}}{[(V_{sc})^2_{max} - (V_{sc})^2_{min}]} \quad (4.2)$$

Dimana : E_{sc} : energi superkapasitor (Ws)
 $V_{sc,max}$: tegangan maksimum superkapasitor (Volt)
 $V_{sc,min}$: tegangan minimum superkapasitor (Volt)

Untuk jenis penyimpan energi jenis baterai, penentuan kapasitas baterai dituliskan dengan :

$$Kapasitas\ baterai = \frac{P_{beban} \cdot t}{V_{baterai}} \quad (4.3)$$

Dimana : $V_{baterai}$: tegangan nominal baterai (Volt)
 P_{beban} : daya beban sistem turbin angin (Watt)
 t : waktu yang diperlukan baterai untuk menyuplai sistem (jam)

Dari hasil simulasi di atas maka dapat diamati bahwa untuk superkapasitor, berdasarkan persamaan (4.2) besar daya yang dibutuhkan superkapasitor untuk membuat daya total dapat terpenuhi sebesar 3000 Watt dan dipilih besarnya tegangan operasi superkapasitor sebesar 48 Volt. Maka kapasitas superkapasitor yang dibutuhkan adalah sebesar 17.36 F.

Untuk baterai, berdasarkan persamaan (4.3) besar daya yang dibutuhkan penyimpan energi untuk membuat daya total dapat terpenuhi sebesar 3000 Watt, waktu yang diperlukan baterai untuk menyuplai sistem selama 5 detik, dan dipilih besarnya tegangan nominal sebesar 48 Volt. Maka kapasitas baterai yang dibutuhkan adalah sebesar 0.0875 Ah.

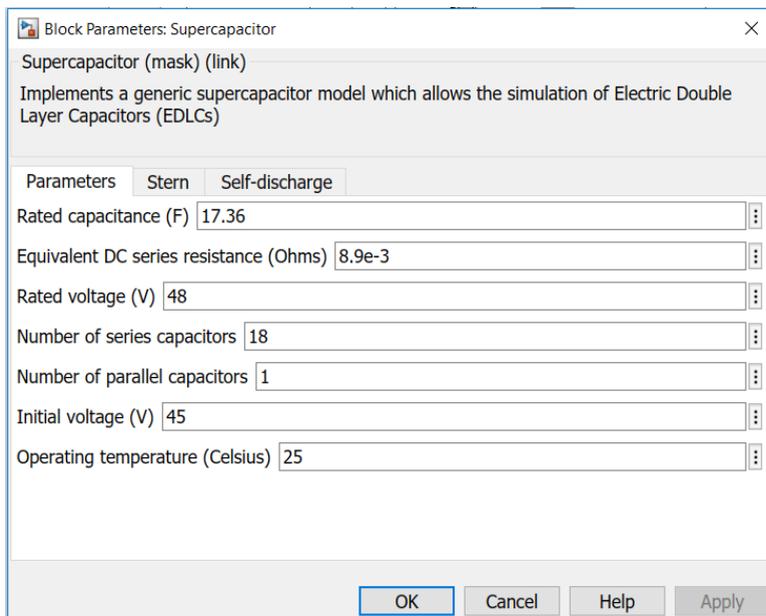
4.1 Perbandingan Kinerja Superkapasitor dengan Baterai

Dalam sub-bab ini akan dibandingkan kinerja dua jenis penyimpan energi yang berbeda, yaitu superkapasitor dan baterai. Perbandingan ini dilakukan untuk mendapatkan kelebihan dan kekurangan dari masing-masing jenis penyimpan energi. Parameter yang dibandingkan antara lain adalah karakteristik tegangan, arus, dan daya, data *power density*, data *energy density*, *lifetime*, hingga biaya yang dibutuhkan untuk melakukan proses *power smoothing* dalam permodelan angin yang telah ditentukan.

4.1.1. Karakteristik Tegangan, Arus, dan Daya

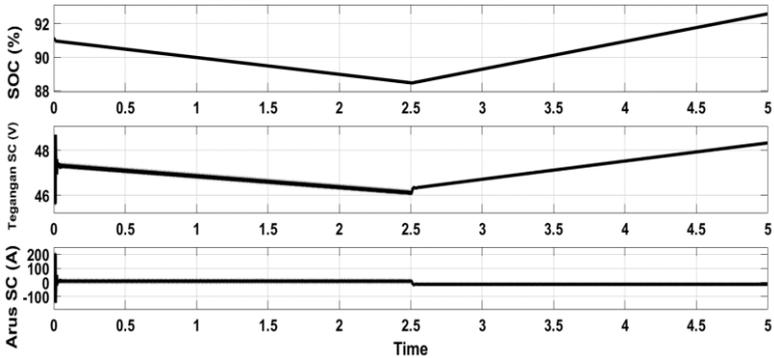
Dalam sub-bab ini akan dibandingkan karakteristik tegangan dua jenis penyimpan energi, yaitu superkapasitor dan baterai. Simulasi akan dilakukan berdasarkan kecepatan angin yang telah ditentukan. Simulasi akan dilakukan dengan mengamati perubahan *state of charge* (SOC), tegangan, dan arus masing-masing penyimpan energi.

Simulasi karakteristik superkapasitor dilakukan dengan menggunakan perubahan kecepatan angin yang berubah ekstrem seperti yang terdapat pada Gambar 4.1. Parameter dalam permodelan *generic* superkapasitor pada MATLAB/Simulink disesuaikan dengan penentuan kapasitas yang telah ditentukan pada awal bab 4. Gambar parameter superkapasitor yang diisi dalam permodelan *generic* MATLAB/Simulink ditunjukkan pada Gambar 4.2.



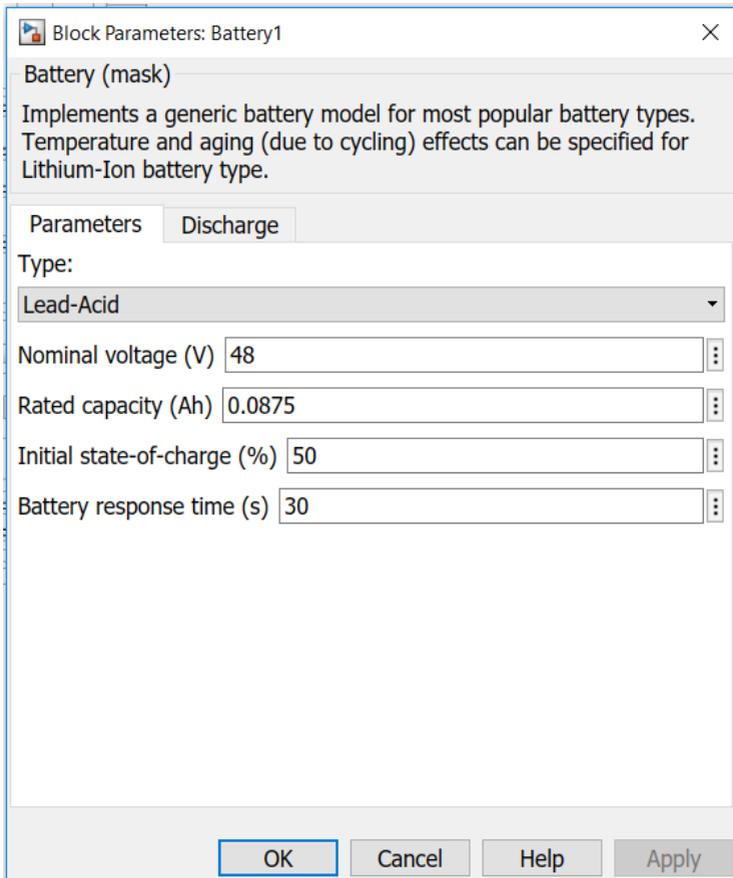
Gambar 4. 2 Parameter Superkapasitor pada Blok *Generic* MATLAB/Simulink

Dengan menggunakan kecepatan angin yang telah dimodelkan di atas mengakibatkan perubahan SOC superkapasitor. Hal ini juga berpengaruh pada perubahan nilai tegangan dan arus superkapasitor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.



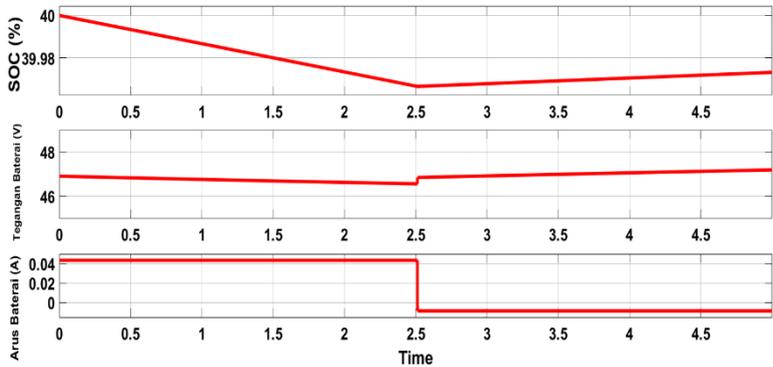
Gambar 4. 3 Hasil Simulasi SOC, Tegangan, Dan Arus Superkapasitor

Sedangkan simulasi karakteristik baterai dilakukan dengan melakukan pengisian parameter baterai dalam blok *generic* MATLAB/Simulink yang diisi berdasarkan besar penentuan kapasitas yang telah dijelaskan di awal bab 4. Pengisian parameter baterai pada blok *generic* MATLAB/Simulink ditunjukkan pada Gambar 4.4.



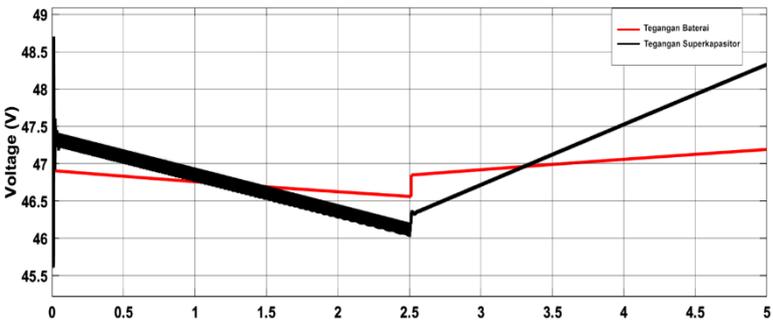
Gambar 4. 4 Parameter Baterai pada Blok *Generic* MATLAB/Simulink

Dengan menggunakan kecepatan angin yang telah dimodelkan di atas mengakibatkan perubahan SOC baterai. Hal ini juga berpengaruh pada perubahan nilai tegangan dan arus baterai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.

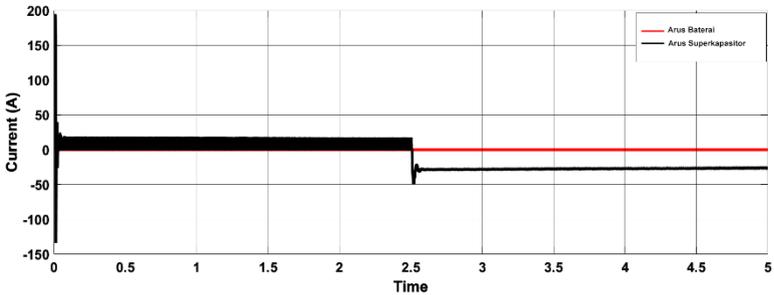


Gambar 4. 5 Hasil Simulasi SOC, Tegangan, Dan Arus Baterai

Berdasarkan hasil simulasi SOC, tegangan, dan arus pada kedua penyimpan energi, superkapasitor dan baterai, maka dapat diamati pengaruh perubahan kecepatan angin berdampak pada perubahan SOC yang juga berpengaruh pada tegangan dan arus yang dihasilkan oleh kedua penyimpan energi. Grafik yang menunjukkan perbandingan tegangan dan arus pada kedua penyimpan energi ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7.



Gambar 4. 6 Tegangan Gabungan Superkapasitor dan Baterai



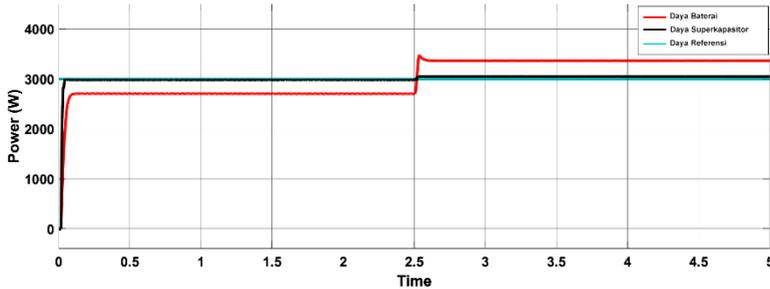
Gambar 4. 7 Arus Gabungan Superkapasitor dan Baterai

Dari hasil simulasi dapat diamati bahwa terdapat perbedaan pada karakteristik tegangan penyimpanan energi superkapasitor dan baterai. Ketika keadaan *discharging*, seperti yang ditunjukkan pada detik ke-0 sampai detik ke-2.5, tegangan superkapasitor turun dari 47.3 V sampai 46 V, sedangkan tegangan baterai turun dari 46.85 V sampai 46.55 V. Pada saat keadaan *charging*, seperti yang ditunjukkan pada detik ke-2.5 sampai detik ke-5, tegangan superkapasitor naik dari 46.4 V sampai 48.4 V, sedangkan tegangan baterai naik dari 46.8 V sampai 5.2 V. Berdasarkan hasil simulasi, maka dapat disimpulkan perubahan tegangan pada superkapasitor relatif linear terhadap perubahan SOC superkapasitor, sedangkan tegangan pada baterai relatif konstan terhadap perubahan SOC baterai. Hal itu menyebabkan tidak direkomendasikan menggunakan superkapasitor sebagai penyimpan energi yang mengakibatkan SOC superkapasitor bernilai 0, karena hal itu akan menyebabkan tegangan superkapasitor juga akan bernilai 0.

Sedangkan pada arus kedua penyimpanan energi, berdasarkan hasil simulasi pada saat kondisi *discharging*, seperti yang ditunjukkan pada detik ke-0 sampai detik ke-2.5, besar arus *discharging* superkapasitor sebesar 10 A, sedangkan besar arus *discharging* baterai sebesar 0.04375 A. Pada saat kondisi *charging*, seperti yang ditunjukkan pada detik ke-2.5 sampai detik ke-5, besar arus *charging* superkapasitor sebesar -28 A, sedangkan arus *charging* baterai sebesar 0.00875 A. Berdasarkan hasil simulasi dapat diamati bahwa besar arus *charging/discharging* pada baterai cenderung terbatas dibanding pada superkapasitor. Hal ini disebabkan baterai memiliki nilai *C rating* yang merupakan nilai *rating* arus *charge/discharge* dari sebuah baterai yang didapatkan dari perkalian nilai *C rating* dengan kapasitas baterai [17], hal ini membuat arus

charge/discharge pada baterai cenderung lebih terbatas dibanding pada superkapasitor.

Berdasarkan karakteristik tegangan dan arus pada kedua penyimpan energi yang telah disimulasikan, hal tersebut berdampak pada karakteristik sistem konversi energi angin yang terhubung dengan masing-masing penyimpan energi untuk memenuhi kebutuhan daya beban berdasarkan perubahan kecepatan angin yang ekstrem. Gambar yang menunjukkan hasil simulasi daya superkapasitor dan baterai dalam memenuhi kebutuhan daya beban terdapat pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Daya Beban Gabungan Superkapasitor, Baterai, dan Referensi

Dari hasil simulasi di atas, dapat diamati bahwa superkapasitor memiliki kemampuan lebih cepat untuk memenuhi kebutuhan daya beban sebesar 3000 W dibandingkan baterai. Hal ini disebabkan oleh pengaruh karakteristik tegangan dan arus masing-masing penyimpan energi yang berbeda terhadap perubahan kecepatan angin, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

4.1.2 Data Power Density, Energy Density, Lifetime, dan Biaya Penyimpan Energi

Dalam sub-bab ini akan dibandingkan beberapa parameter yang terdapat pada superkapasitor dan baterai. Parameter yang dibandingkan antara lain data *power density*, data *energy density*, *lifetime*, hingga biaya yang dibutuhkan untuk melakukan proses *power smoothing*. Untuk mendapatkan parameter-parameter tersebut maka dipilih satu *datasheet* yang relevan dengan kapasitas penyimpan energi yang telah dibahas

dalam sub-bab sebelumnya. Parameter penyimpanan energi tersebut terdapat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Parameter Penyimpanan Energi

	Superkapasitor	Baterai
Jenis Penyimpanan Energi	6 Module Maxwell BMOD0500 P016 B01	CSPOWER 12V7AH
Tegangan Nominal	16 Volt	12 Volt
Energi	84 Wh	84 Wh
<i>Power Density</i>	5000 W/l	700 W/l
<i>Energy Density</i>	6 Wh/l	90 Wh/l
<i>Lifetime</i>	10 tahun	3 tahun
Biaya	Rp. 7.215.000 (\$ 504.87)	Rp. 405.000 (\$ 28.2)

Dapat diamati dari tabel di atas bahwa dengan data kapasitas energi yang berasal dari kebutuhan daya yang sama, superkapasitor dan baterai memiliki karakteristik yang berbeda. Data *power density* yang dimiliki oleh superkapasitor bernilai lebih tinggi dibandingkan baterai, yakni sebesar 5000 W/l sedangkan baterai bernilai 700 W/l. Untuk data *energy density* baterai memiliki nilai yang lebih tinggi, yaitu sebesar 6 Wh/l sedangkan superkapasitor sebesar 90 Wh/l. Superkapasitor juga memiliki *lifetime* yang relatif lebih panjang dari baterai, yaitu 10 tahun sedangkan baterai 3 tahun. Biaya yang harus dikeluarkan untuk memperoleh superkapasitor adalah sebesar Rp. 7.215.000 sedangkan untuk mendapatkan baterai sebesar Rp. 405.000.

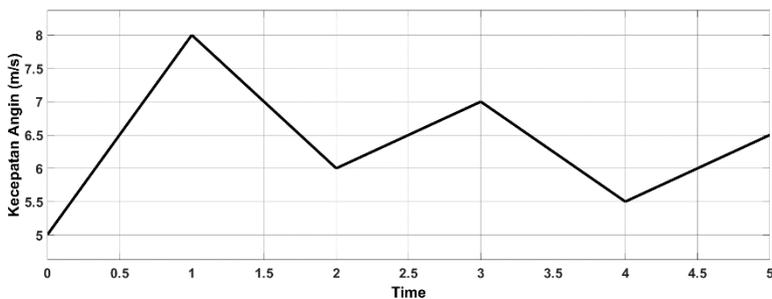
Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa superkapasitor adalah penyimpan energi yang memiliki profil daya yang lebih tinggi dibandingkan baterai. Namun jumlah energi yang bisa disimpan superkapasitor cenderung lebih rendah dibandingkan baterai. Jumlah siklus hidup yang dimiliki superkapasitor lebih lama dibanding baterai, hal itu membuat waktu pemakaian superkapasitor pun menjadi lebih tinggi dibanding baterai. Namun untuk mendapatkan jenis penyimpanan energi superkapasitor membutuhkan biaya yang lebih tinggi dibandingkan baterai.

4.2 Hasil Simulasi Superkapasitor sebagai *Power Smoothing* dalam Sistem Konversi Energi Angin

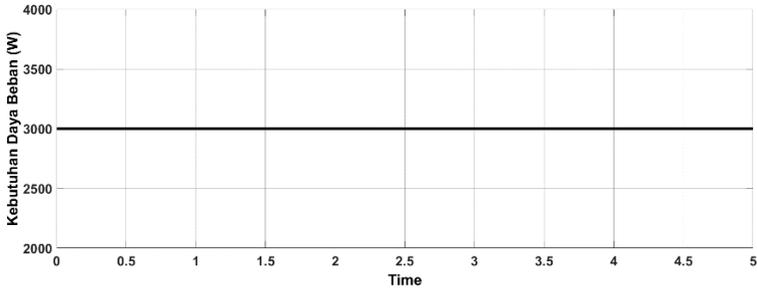
Dalam sub-bab ini, akan dilakukan simulasi penyimpanan energi sebagai *power smoothing* dalam sistem turbin angin. Kontroler yang digunakan untuk mengatur konverter *bidirectional* adalah kontroler PI. Untuk menganalisis kemampuan kontrol optimal untuk mempertahankan daya sesuai dengan daya yang dibutuhkan maka simulasi dilakukan dengan memberikan beberapa studi kasus yang berisi mengenai simulasi konversi energi angin dengan perubahan kecepatan angin secara acak maupun konstan untuk mempertahankan kebutuhan daya beban, baik yang berubah maupun konstan pula.

Kasus 1 : Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Konstan

Simulasi kontrol optimal pada sistem turbin angin menggunakan penyimpanan energi dilakukan dengan melakukan perubahan kecepatan angin secara acak untuk mempertahankan daya konstan pada beban. Permodelan kecepatan angin yang berubah secara acak ditunjukkan pada Gambar 4.9. Variasi kecepatan angin dilakukan secara acak dengan variasi antara 5 m/s hingga 8 m/s. Perubahan kecepatan angin mengakibatkan perubahan daya keluaran pula mengikuti perubahan kecepatan angin. Sedangkan kebutuhan daya beban konstan dapat diamati pada Gambar 4.10.

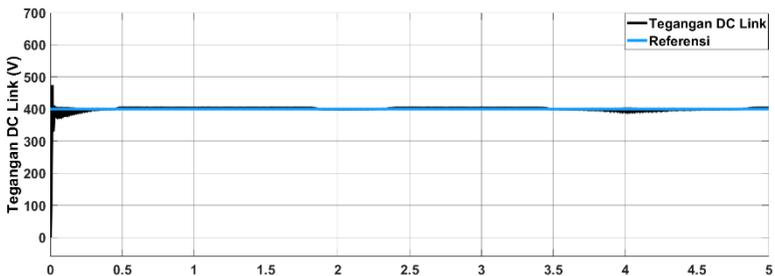


Gambar 4. 9 Permodelan Kecepatan Angin Berubah Acak

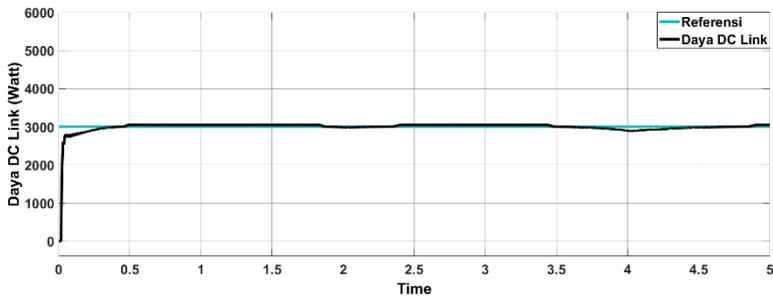


Gambar 4. 10 Permodelan Kebutuhan Daya Konstan

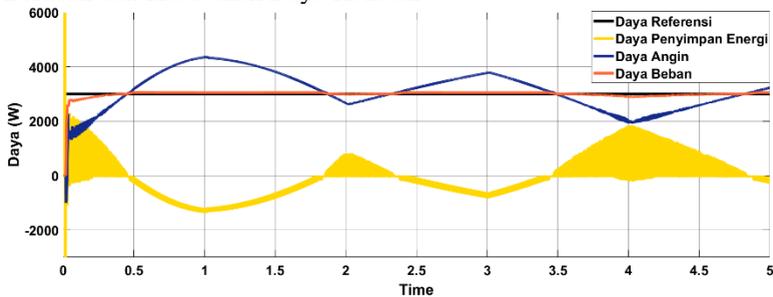
Dari hasil simulasi dapat diamati bahwa tegangan DC link dapat dipertahankan konstan 400 V meskipun dilalui oleh kecepatan angin yang berubah secara acak melalui proses *charging* dan *discharging* penyimpanan energi. Hasil simulasi tegangan DC link dapat diamati dalam gambar yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Kontroler akan merespon superkapasitor untuk melakukan proses *discharging* pada saat kondisi daya beban lebih tinggi daripada daya turbin angin. Lalu pada saat kondisi daya turbin angin lebih tinggi dibanding daya beban maka kontroler akan merespon penyimpanan energi untuk melakukan proses *charging*. Dengan demikian daya yang akan dikirim ke beban dapat dijaga konstan sebesar 3000 Watt melalui pengaturan konverter *bidirectional*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. Untuk mengamati hasil simulasi daya penyimpanan energi, daya konverter *boost*, daya beban, dan daya referensi dapat dilihat pada Gambar 4.13. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kontroler konverter *bidirectional* telah bekerja dengan baik pada kecepatan angin berubah acak.



Gambar 4. 11 Hasil Simulasi Tegangan DC Link pada Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Konstan



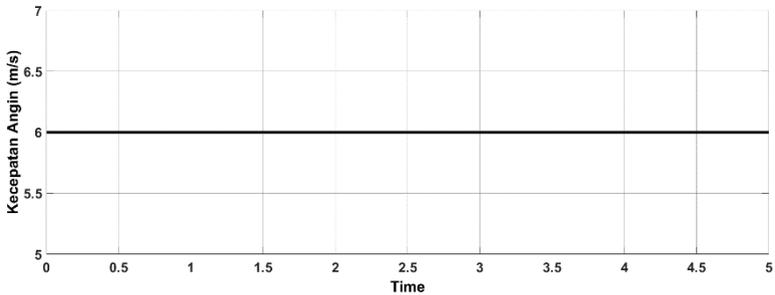
Gambar 4. 12 Hasil Simulasi Daya DC Link pada Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Konstan



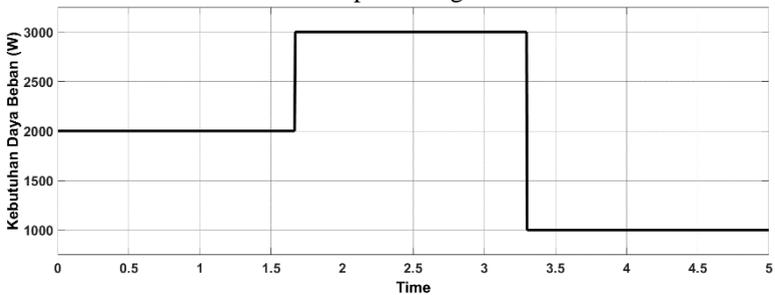
Gambar 4. 13 Hasil Simulasi Daya Penyimpan Energi, Daya Angin, Daya Beban, Dan Daya Referensi Kasus 1

Kasus 2 : Kecepatan Angin Konstan dan Kebutuhan Daya Berubah

Dalam kasus ini akan disimulasikan sistem konversi energi angin dengan kecepatan angin konstan dan kebutuhan daya berubah. Kontroler harus mampu mempertahankan daya sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan oleh beban. Permodelan kecepatan angin dalam kasus ini dipertahankan konstan sebesar 6 m/s yang ditunjukkan oleh Gambar 4.14. Sedangkan kebutuhan beban dimodelkan dengan perubahan dari 2000 Watt, 3000 Watt, dan 1000 Watt yang ditunjukkan pada Gambar 4.15.

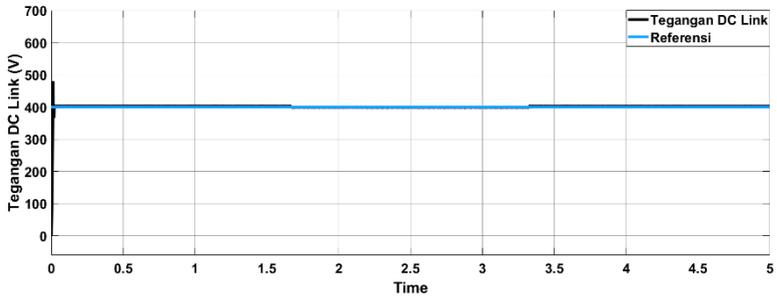


Gambar 4. 14 Permodelan Kecepatan Angin Konstan

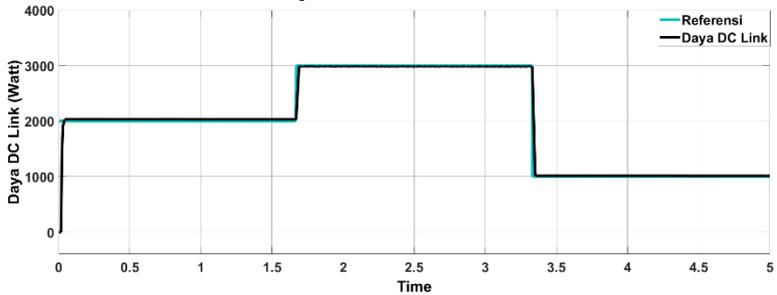


Gambar 4. 15 Permodelan Kebutuhan Daya Berubah

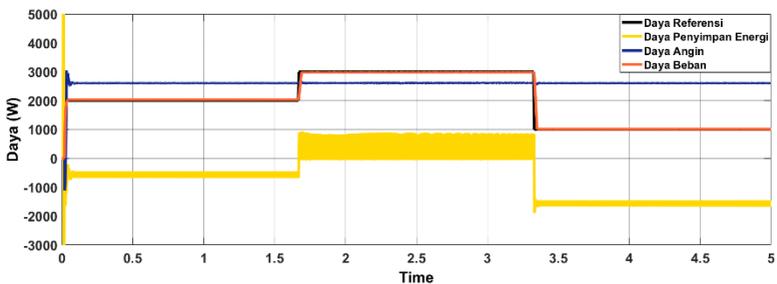
Hasil simulasi menunjukkan bahwa daya yang disuplai ke beban dapat tersuplai sesuai dengan kebutuhan yang dibutuhkan beban. Tegangan pada DC link juga dapat dipertahankan sebesar 400 V seperti yang dapat diamati pada Gambar 4.16. Hal ini dapat dilakukan melalui proses *charging* dan *discharging* yang diatur oleh kontroler *bidirectional* yang berupa kontroler PI. Hasil simulasi daya DC link dapat diamati pada Gambar 4.17. Untuk mengamati daya angin, daya penyimpan energi, daya beban, dan daya referensi yang harus disuplai dapat diamati pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 16 Hasil Simulasi Tegangan DC Link pada Kecepatan Angin Konstan dan Kebutuhan Daya Berubah



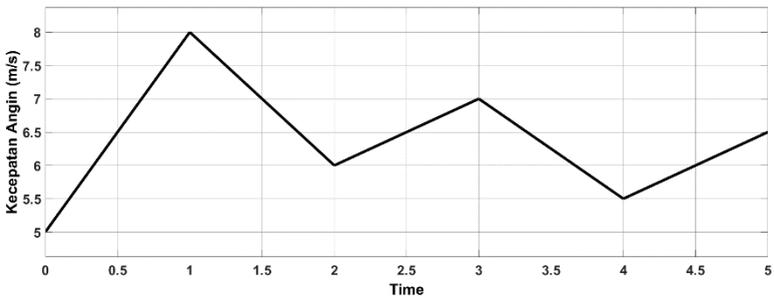
Gambar 4. 17 Hasil Simulasi Daya DC Link pada Kecepatan Angin Konstan dan Kebutuhan Daya Berubah



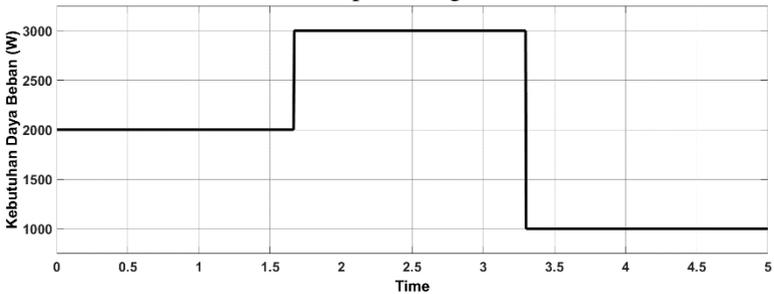
Gambar 4. 18 Hasil Simulasi Daya Penyimpan Energi, Daya Angin, Daya Beban, Dan Daya Referensi Kasus 2

Kasus 3 : Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Berubah

Simulasi kontrol optimal dalam kasus ini dilakukan dengan melakukan perubahan kecepatan angin dengan kebutuhan daya yang juga berubah. Kontroler harus mampu mempertahankan daya sesuai dengan kebutuhan dengan kecepatan angin yang berubah. Hasil simulasi menunjukkan semakin tinggi kecepatan angin maka daya yang dihasilkan akan semakin besar mengikuti kecepatan angin. Permodelan kecepatan angin berubah ditunjukkan pada Gambar 4.19. Sedangkan permodelan daya berubah ditunjukkan pada Gambar 4.20.



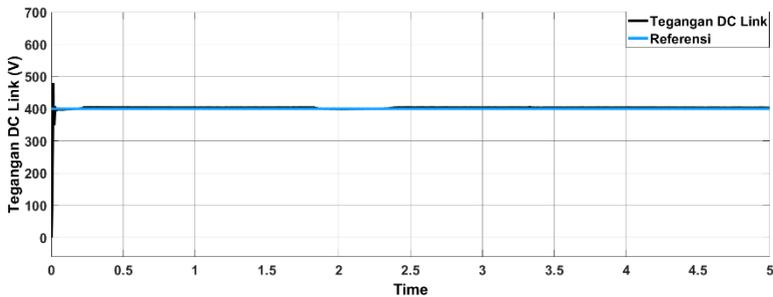
Gambar 4. 19 Permodelan Kecepatan Angin Berubah



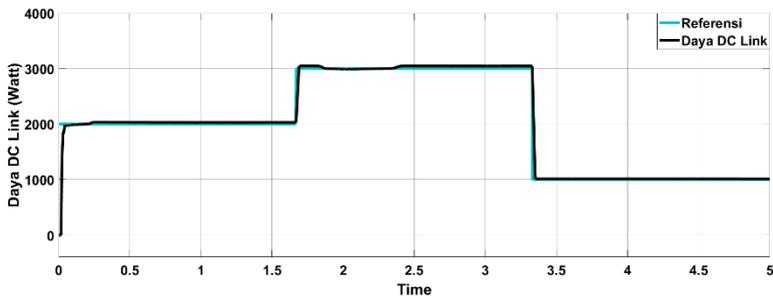
Gambar 4. 20 Permodelan Kebutuhan Daya Berubah

Hasil simulasi menunjukkan tegangan dapat dipertahankan konstan dengan adanya perubahan dari sisi masukan yang berupa angin maupun dari sisi beban seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.21. Lalu, daya yang disuplai menuju beban dapat dipertahankan sesuai dengan kebutuhan daya, melalui proses *charging* dan *discharging* daya sesuai

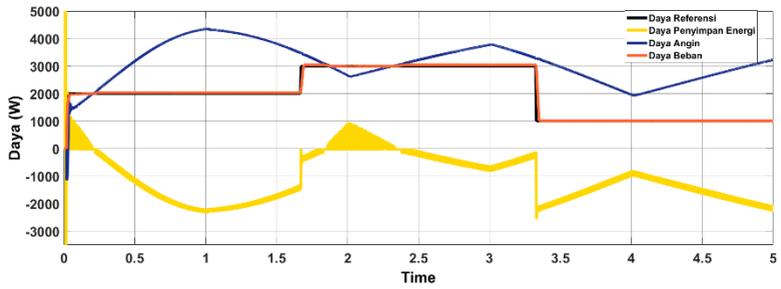
dengan kebutuhan seperti yang terdapat pada Gambar 4.22. Kontroler akan merespon menyimpan energi untuk melakukan proses *charging* ketika daya angin lebih tinggi dibanding daya yang dibutuhkan dan akan melakukan proses *discharging* ketika daya angin lebih rendah dari daya yang dibutuhkan. Pada simulasi ini, kontroler melakukan proses *charging* di detik ke-0.2 sampai detik ke-1.7 dan di detik ke-2.3 sampai detik ke-4.5. Kontroler akan melakukan proses *discharging* di detik ke-0 sampai ke-0.2 dan di detik ke-1.7 sampai detik ke-2.3. Hasil simulasi daya penyimpan energi, daya angin, daya beban, dan daya referensi dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4. 21 Hasil Simulasi Tegangan DC Link pada Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Berubah



Gambar 4. 22 Hasil Simulasi Daya DC Link pada Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Berubah



Gambar 4. 23 Hasil Simulasi Daya Penyimpan Energi, Daya Angin, Daya Beban, dan Daya Referensi Kasus 3

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi sistem turbin angin yang terhubung dengan dua jenis penyimpanan energi yang berbeda, yaitu superkapasitor dan baterai, didapatkan beberapa kesimpulan, diantaranya :

1. Superkapasitor mampu memenuhi kebutuhan daya lebih cepat dibanding baterai, karena dipengaruhi oleh karakteristik tegangan dan arus yang dimiliki masing-masing penyimpan energi.
2. Kerapatan daya yang dimiliki superkapasitor bernilai lebih tinggi dibanding baterai.
3. Kerapatan energi yang dimiliki superkapasitor bernilai lebih rendah dibanding baterai.
4. Jumlah siklus hidup yang dimiliki superkapasitor lebih tinggi dibanding baterai, hal ini membuat waktu pemakaian superkapasitor lebih tinggi dibanding baterai.
5. Biaya investasi yang harus dikeluarkan untuk mendapatkan superkapasitor lebih tinggi dibanding baterai.
6. Superkapasitor dapat digunakan sebagai penyimpan energi pada pembangkit listrik tenaga angin untuk *power smoothing*. Dengan energi angin yang konstan maupun berfluktuasi, superkapasitor dapat menjaga daya beban sesuai dengan permintaan, baik daya beban konstan maupun berubah.

5.2 Saran

Mempertimbangkan karakteristik masing-masing jenis penyimpanan energi, yaitu superkapasitor dan baterai yang memiliki keunggulan dan kekurangannya masing-masing dalam beberapa aspek, penelitian selanjutnya diharap dapat menggunakan *hybrid* penyimpan energi superkapasitor-baterai agar sistem dapat mengoptimalkan keunggulan dan mengurangi kekurangan dari masing-masing jenis penyimpanan energi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. D. A. R. Jha, *Wind Turbine Technology*. broken sound parkway NW, USA: CRC Press, 2010.
- [2] C. Abbey, "Supercapacitor Energy Storage for Wind Energy Applications," presented at the IEEE, 2007.
- [3] S. Teleke, "Control Methods for Energy Storage for Dispatching Intermittent Renewable Energy Sources," Doctor of Philosophy, Electrical Engineering, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina 2009.
- [4] R. I. Putri, "Pengembangan Strategi Kontrol Optimal Pada PMSG Wind Turbine Melalui Sistem Penyimpanan Energi Berbasis Algoritma Swarm Intelligence," Doctor, Electrical Engineering, ITS, 2017.
- [5] K. M. M. Nishad Mendis, Sarath Perera, "Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage and Synchronous Condenser for Isolated Operation of PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine Generating Systems," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 5, 2014.
- [6] P. N. R. Indonesia, "Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 30 Tahun 2007 Tentang Energi," ed. Jakarta, 2007.
- [7] K. E. d. S. D. Mineral, "Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 Tentang Rencana Umum Energi Nasional," ed, 2017.
- [8] L. A. Nusantara, "Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin," ed, 2014.
- [9] L. Y. Wu Bin, Zargari N., Kouro S, "Power Conversion and Control of Wind Energy System," *IEEE Press. John Wiley & Sons Publication*, 2011.
- [10] M. E. Prof. Ir. Mochamad Ashari, PhD., *Sistem Konverter DC* vol. 1. ITS: ITS Press, 2012.
- [11] N. U. Abdul Motin Howlader, Atsushi Yona, Tomonobu Senjyu, Ahmed Yousuf Saber, "A Review of Output Power Smoothing Methods for Wind Energy Conversion Systems," *Elsevier*, 2013.
- [12] Q. W. Haoran Zhao, Shuju Hu, Honghua Xu, Claus Nygaard Rasmussen, "Review of Energy Storage System for Wind Power Integration Support," *Elsevier*, 2014.

- [13] S. M. M. M. Rosyadi, R. Takahashi, J. Tamura, "Transient Stability Enhancement of Variable Speed Permanent Magnet Wind Generator Using Adaptive PI-Fuzzy Controller," *IEEE Trondheim*, 2011.
- [14] M. R2017a, "Battery," in *Implement Generic Battery Model*, ed, 2017.
- [15] J. M. Miller, *Ultracapacitor Applications*. The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, Six Hills Way, Stevenage, Herts, SG1 2AY, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2011.
- [16] M. R2017a, "Supercapacitor," in *Implement Generic Supercapacitor Model*, ed, 2017.
- [17] C. B. T. C. Ltd., "SEALED LEAD-ACID BATTERY OPERATION MANUAL," ed, 2003.

BIODATA PENULIS



Octavian Nur Fauzi, dilahirkan di Bandung, 30 Oktober 1996. Penulis adalah putra dari pasangan Napsiyah dan Ir. S. Joko Triyono. Penulis memulai jenjang pendidikan SDN Polisi 4 Bogor, SMPN 4 Bogor, dan SMAN 1 Bogor hingga lulus tahun 2014. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi dan diterima di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di Departemen Teknik Elektro melalui jalur SNMPTN. Semasa kuliah, penulis aktif sebagai anggota Kalpataru

Elektro ITS, anggota komunitas ITS JAZZ, staf Hubungan Luar HIMATEKTRO ITS, Wakil Ketua 1 HIMATEKTRO ITS, dan asisten Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST). Penulis dapat dihubungi melalui email : onurfauzi@gmail.com