

Pemanfaatan SFCL tipe *Bridge* untuk Meningkatkan Stabilitas Transien *Microgrid* dan *Economic Feasibility*

Roy Bayu Negara¹, Fransisco Danang Wijaya², Lesnanto Multa Putranto³, Mohd. Brado Frasetyo⁴

^{1,2,3,4} Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika No.2, Kampus UGM, Yogyakarta, 55281, INDONESIA (tel: 0274-552305; email: ¹roybayunegara92@mail.ugm.ac.id, ²danangwijaya@ugm.ac.id, ³lesnanto@ugm.ac.id, ⁴mohd.brado41@mail.ugm.ac.id)

[Diterima: 28 Juni 2022, Revisi: 17 Mei 2023]

Corresponding Author: Roy Bayu Negara

INTISARI — Pembangkit energi terbarukan (*renewable energy*, RE) saat ini banyak digunakan oleh masyarakat sebagai upaya untuk mengurangi emisi. Untuk itu, dikembangkan sistem *microgrid* bersumber pada RE yang berdampingan dengan energi konvensional. Akan tetapi, sistem energi listrik tersebut cenderung mengalami gangguan transien seperti hubung singkat, beban bertambah, dan turunnya keluaran generator. Gangguan tersebut dapat menyebabkan turunnya tegangan dan tidak stabilnya frekuensi, sehingga diperlukan upaya untuk mempertahankan stabilitas sistem dengan menggunakan *superconducting fault current limiter* (SFCL). Pemilihan SFCL didasari oleh kemampuannya membatasi arus gangguan serta kecepatannya dalam memberikan perlindungan selama terjadinya gangguan transien. Model SFCL yang digunakan adalah SFCL tipe *bridge* dengan komponen utamanya adalah dua induktor. Pada model ini, dalam kondisi normal, arus mengalir melalui dua induktor. Ketika terjadi gangguan (*fault*), arus akan mengalir melalui satu induktor. Penelitian ini dilakukan dalam skenario terjadi gangguan. Pada saat kondisi terjadi gangguan, nilai tegangan tanpa SFCL tipe *bridge* adalah 2,5 V. Ketika SFCL tipe *bridge* digunakan, nilai tegangannya sebesar 207 V. Nilai arus terukur pada kondisi tanpa SFCL tipe *bridge* adalah 30 kA dan ketika menggunakan SFCL tipe *bridge* adalah 1,1 kA. Nilai frekuensi pada kondisi tanpa SFCL tipe *bridge* adalah 49,7 Hz hingga 50,2 Hz dan ketika menggunakan SFCL tipe *bridge* adalah 49,9 Hz sampai 50,1 Hz. Penelitian ini juga menambahkan perhitungan *economic feasibility* untuk mengetahui kelayakan sistem *microgrid* saat menggunakan SFCL tipe *bridge*. Perhitungannya terdiri atas empat bagian, yaitu *net present value* (NPV), *profitability index* (PI), *discounted payback period* (DPP), dan *internal rate of return* (IRR). *Economic feasibility* yang diperoleh yaitu nilai NPV sebesar US\$6.865.405, nilai PI sebesar 2,4, nilai DPP selama empat tahun, dan nilai IRR sebesar 28,59%. Nilai yang diperoleh dibandingkan dengan standar kelayakan dan disimpulkan bahwa *microgrid* dengan adanya SFCL dapat dikatakan layak.

KATA KUNCI — *Microgrid*, Gangguan, Pembatas Arus, Energi Terbarukan, Transien, SFCL Tipe *Bridge*, *Economic Feasibility*.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi yang terus meningkat saat ini memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, salah satunya adalah efek gas rumah kaca dari penggunaan energi fosil [1]. Pembakaran energi fosil sudah seharusnya ditinggalkan karena menimbulkan pemanasan global. Maka, dibutuhkan energi lain dari sumber energi terbarukan (*renewable energy*, RE) yang ramah terhadap lingkungan [2]. Pemasangan pembangkit yang bersumber dari RE pada *microgrid* semakin gencar dilakukan. Di Indonesia, target capaian keseluruhan pembangkit RE pada akhir tahun 2025 adalah sebesar 23% [3]. Penggunaan sumber RE seperti angin, saat ini, meningkat secara signifikan. Penggunaan RE seperti ini baik untuk lingkungan dan dapat digunakan di daerah terpencil [4].

Untuk mengintegrasikan energi dari sumber RE seperti *wind turbine* (WT), dibutuhkan sebuah sistem, yaitu *microgrid*. *Microgrid* merupakan sekelompok beban yang saling berhubungan dengan berbagai macam sumber daya energi sebagai suatu kesatuan tunggal yang dapat dikendalikan [5]. Di sisi lain, *microgrid* dengan sumber RE memiliki sifat sulit mempertahankan keadaan *steady-state*, sehingga rawan mengalami gangguan. Penyebab gangguan yang sering terjadi pada sistem di antaranya adalah hubung singkat (*short circuit*), beban bertambah, dan turunnya keluaran daya generator atau generator lepas. Gangguan tersebut merupakan faktor penyebab terjadinya gangguan transien. Permasalahan yang utama pada *microgrid* berhubungan dengan faktor terjadinya gangguan transien, yaitu untuk mempertahankan kestabilan setelah mengalami gangguan besar seperti kesalahan hubung

singkat, perubahan beban secara drastis, pengalihan mode operasi, dan daya masukan intermiten pada pembangkit RE. Stabilitas transien adalah sebuah respons sistem saat terjadi gangguan besar dalam waktu singkat [6]. Maka, pengertian dari stabilitas transien adalah kemampuan generator untuk mempertahankan atau melanjutkan operasi setelah terjadi gangguan. Penyebab terganggunya stabilitas transien adalah gangguan rangkaian sirkuit, pemutusan saluran, dan gangguan pada generator.

Pada penelitian sebelumnya, *superconducting fault current limiter* (SFCL) digunakan untuk melindungi sebuah *microgrid* dalam menekan arus gangguan serta mengompensasi penurunan tegangan bus. Tipe SFCL yang digunakan adalah tipe SFCL resistif. Hasil penelitian ini menyatakan bahwa SFCL dapat membatasi penurunan tegangan dan arus gangguan, sehingga dapat memenuhi persyaratan *fault ride through* (FRT) pada generator yang bersumber RE. Akan tetapi, penelitian ini menggunakan skenario *grid-connected* yang terkoneksi paralel dengan SFCL tipe resistif, sehingga dibutuhkan pengujian tambahan menggunakan skenario *microgrid* dalam keadaan *grid-connected* dengan menggunakan SFCL tipe *bridge* [7].

Pada penelitian yang lain, SFCL digunakan untuk mengendalikan operasi dan melindungi sistem saat terjadi gangguan. SFCL yang digunakan juga bertipe SFCL resistif. Penelitian ini menyimpulkan bahwa SFCL dapat membatasi arus gangguan yang terjadi antara generator terdistribusi (*distributed generator*, DG) dan *grid* dengan memantau aliran arus melalui SFCL resistif yang dipasang. Namun, penelitian ini menggunakan skenario *grid-connected* dengan SFCL

diletakkan antara *grid* dan sumber DG, sehingga dibutuhkan pengujian tambahan dengan skenario *microgrid* menggunakan SFCL tipe *bridge* [8].

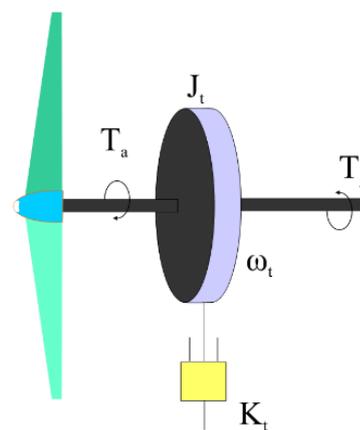
Tipe SFCL lain juga telah digunakan untuk mengendalikan operasi dan melindungi sistem saat terjadi gangguan. Tipe pembatas arus (*current limiter*) yang digunakan adalah tipe *solid state fault current limiter* (SSFCL). Pada penelitian ini, SSFCL dapat mengendalikan arus gangguan dengan kinerja yang baik. Akan tetapi, penelitian ini hanya berfokus pada skenario menggunakan pembangkit tunggal saja yang terkoneksi dengan SSFCL, sehingga dibutuhkan pengujian tambahan dengan skenario *microgrid* menggunakan SFCL tipe *bridge* serta pengaplikasian dengan model pembangkit ganda [9].

Referensi [10] menggunakan SFCL bertipe resistif untuk mengendalikan operasi dan melindungi sistem saat terjadi gangguan. Hasilnya adalah SFCL dapat membatasi arus gangguan yang terjadi dengan efektif. Namun, penelitian ini menggunakan kondisi *grid-connected* dengan SFCL tipe resistif diletakkan antara *grid* dan sumber DG. Dibutuhkan pengujian tambahan dengan skenario *microgrid* dalam keadaan penambahan SFCL tipe *bridge* dan perhitungan *economic feasibility* [10].

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan, penelitian tentang stabilitas pada *microgrid* menggunakan pembatas arus telah dilakukan sebelumnya oleh beberapa peneliti. Saat ini, pembatas arus mempunyai beberapa klasifikasi, di antaranya *current limiting reactor*, SFCL, *solid state fault current limiter*, *electromagnetic fault current limiter*, *pyrotechnic fault current limiter*, dan *hybrid fault current limiter* [11]. Pada penelitian ini, model SFCL dipilih untuk dijadikan sebagai kendali stabilitas gangguan transien. Pemilihan SFCL didasari oleh kemampuannya dalam membatasi arus gangguan serta kecepatannya dalam memberikan perlindungan selama terjadi gangguan transien [12]. Terdapat dua tipe SFCL, yaitu resistif dan induktif. Pada tipe resistif, digunakan komponen resistif yang dapat menahan arus. Kelemahan SFCL tipe ini adalah ketika arus tinggi mengalir, akan terjadi peningkatan temperatur dan saat mencapai temperatur kritis, akan dibutuhkan pendingin (*cooler*). Pada SFCL tipe induktif, tidak diperlukan pendingin. Maka, pada penelitian ini digunakan SFCL tipe induktif.

Model SFCL tipe induktif dapat mengatasi keadaan tidak stabil ketika terjadi gangguan, terutama saat gangguan transien. SFCL tipe ini dapat digunakan juga sebagai pengendali stabilitas tegangan maupun frekuensi yang digunakan dalam sistem *microgrid*.

Pada penelitian ini, stabilitas transien sistem *microgrid* berbasis WT dapat ditingkatkan menggunakan SFCL tipe induktif dengan konfigurasi tipe *bridge*. Terdapat dua variabel dalam melihat stabilitas sebuah *microgrid*. Variabel pertama adalah frekuensi, yang harus dikendalikan untuk menjaga stabilitas frekuensi *microgrid*. Variabel kedua adalah tegangan, yang juga harus dikendalikan untuk menjaga stabilitas tegangan *microgrid* [13], [14]. Salah satu variabel yang dapat digunakan adalah variabel tegangan, yang akan diamati ketika beroperasinya sebuah sistem tenaga listrik. Kemudian, dilakukan pengendalian untuk mengatasi gangguan yang dapat menyebabkan tegangan turun atau naik [15]. Maka, pada penelitian ini digunakan variabel frekuensi dan tegangan. Pada bagian kendali, digunakan SFCL tipe *bridge* yang dikendalikan oleh komparator. Arus diukur untuk melihat kinerja SFCL tipe *bridge* yang berfungsi sebagai pembatas arus.



Gambar 1. Model WT.

II. METODOLOGI

A. ALUR RANCANGAN METODE PENGENDALIAN

Sistem kendali yang dirancang adalah kendali stabilitas saat terjadi gangguan transien pada *microgrid*. Setelah sistem kendali dibuat, sistem dapat menyesuaikan perubahan amplitudo arus yang terjadi pada *microgrid*. Ketika terjadi gangguan, amplitudo arus akan tinggi, sehingga diperlukan penahan arus agar arus tidak mengalami lonjakan.

Sensor membaca variabel tegangan ketika terjadi gangguan, sehingga saat terjadi penurunan atau kenaikan di luar batas standar Perusahaan Listrik Negara (PLN), SFCL akan aktif. Selanjutnya, SFCL akan menjadi penahan arus supaya tidak terjadi lonjakan arus. Skema kendali pembatas arus tipe SFCL yang dirancang mempunyai tahapan sebagai berikut.

Penelitian dilakukan dari perancangan sistem sampai analisis *economic feasibility*. Penelitian dimulai melalui perancangan sistem. Sistem untuk *microgrid* dibuat menggunakan dua buah sumber daya. Sumber daya pertama berasal dari PLTD dan sumber daya kedua berasal dari WT.

Perancangan kendali transien dilakukan untuk memperoleh komponen yang akan digunakan sebagai pengendali tegangan dan frekuensi. Setelah tahapan perancangan dilakukan, ditemukan bahwa SFCL dapat digunakan sebagai pengendali. SFCL yang digunakan adalah SFCL tipe *bridge*.

Selanjutnya, dilakukan penambahan komponen berupa komparator. Komparator berfungsi untuk menganalisis aliran daya pada sistem. Pembacaan komparator hanya dilakukan pada sisi tegangan, sebagai pemicu sakelar yang terdapat pada SFCL.

Tahapan-tahapan dari perancangan yang telah dilakukan akan menghasilkan stabilitas *microgrid*. Setelah stabilitas diperoleh, dilakukan perhitungan *economic feasibility*. Namun, jika stabilitas *microgrid* belum tercapai, perancangan pengendali stabilitas transien akan diulangi kembali.

B. WIND TURBINE

Komponen yang membentuk WT untuk memperoleh energi angin terdiri atas turbin dan *gearbox*. Penggunaan *gearbox* dihilangkan jika WT menggunakan metode disambung langsung (tanpa *gearbox*).

Gambar 1 adalah model dari WT, sedangkan persamaan dari WT ditunjukkan pada (1) dan (2).

$$J_t \omega_t = T_a - K_t \omega_t - T_g \quad (1)$$

$$J_t = J_r + n_g^2 J_g \quad (2a)$$

$$K_t = K_r + n_g^2 K_g \quad (2b)$$

$$T_g = n_g T_{em} \quad (2c)$$

dengan J_t adalah momen inersia rotor turbin (kg m^2); ω_t adalah kecepatan sudut poros rendah (rad sec^{-2}); K_t adalah koefisien redaman turbin ($\text{Nm rad}^{-1} \text{sec}^{-1}$), yang merepresentasikan resistansi aerodinamis; K_g adalah koefisien redaman generator ($\text{Nm rad}^{-1} \text{sec}^{-1}$), yang merepresentasikan friksi mekanik; J_g adalah momen inersia dari rotor generator (kgm^2); T_g adalah torsi elektromagnetik; dan T_{em} adalah torsi turbin (Nm).

Persamaan daya sistem mekanik pada WT dapat dihitung menggunakan (3).

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

dengan ρ adalah densitas udara (kg/m^3), A adalah luas area bilah (m^2), dan V adalah rata-rata kecepatan angin (m/s). Luas area bilah pada WT dapat dihitung menggunakan (4).

$$A = \pi R^2 \quad (4)$$

dengan R adalah radius dari turbin (m) dan π menunjukkan konstanta π . Energi yang dihasilkan WT dapat dihitung menggunakan (5).

$$Q_w = P \times \text{waktu} \quad (5)$$

dengan Q_w adalah energi (kWh), P adalah daya (W), dan waktu dinyatakan dalam jam.

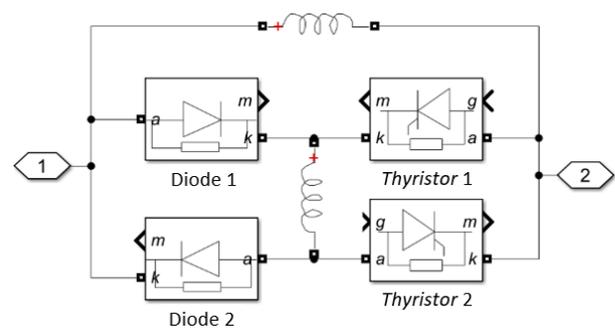
WT mengonversi energi angin dengan memutar generator untuk memperoleh arus listrik. Pada penelitian ini, generator induksi digunakan pada WT sebagai penghasil arus listrik. Generator induksi memiliki fungsi seperti motor induksi, tetapi cara kerjanya berbeda. Jika berperan sebagai motor induksi, kecepatan putaran rotor lebih kecil daripada kecepatan putaran sinkron. Jika kecepatan rotor melebihi kecepatan sinkron, motor induksi akan berperan menjadi generator induksi. Generator induksi dan motor induksi bersifat reversibel [16].

C. SFCL

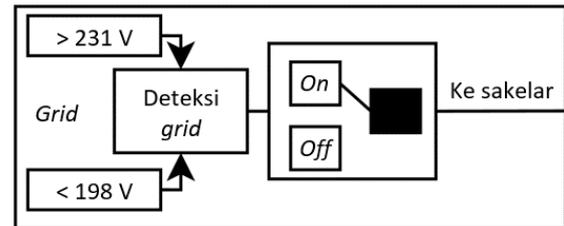
SFCL adalah komponen kendali untuk membatasi arus gangguan pada sistem tenaga listrik yang bertujuan mengikat arus gangguan supaya tidak terjadi jatuh tegangan dan fluktuasi frekuensi pada sistem. Selanjutnya, SFCL akan meminimalkan terjadinya gangguan dengan membatasi nilai arus menjadi lebih kecil dari arus sebelum digunakannya SFCL. Pemilihan SFCL didasari oleh kemampuannya membatasi arus gangguan serta kecepatan dalam memberikan perlindungan selama terjadi gangguan, terutama ketika keadaan transien.

Pada Gambar 2 diperlihatkan bentuk SFCL yang terhubung dengan *microgrid* melalui *port 1* dan *port 2*. SFCL tipe *bridge* diletakkan pada masing-masing *line*. Peletakan mengikuti *line* R, S, dan T yang terdapat pada sistem *microgrid* [17]. SFCL tipe *bridge* memiliki bagian utama, yaitu dua buah induktor, L1 dan L2, sebagai jalur yang akan dilewati arus listrik, dan memiliki sakelar. Sakelar berfungsi mengaktifkan jalur pada induktor L2. Saat terjadi gangguan pada sistem, arus akan mengalir pada induktor L1 saja. Jika tidak ada gangguan yang terjadi, L1 dan L2 akan dialiri arus semua. Selanjutnya, jalur pada induktor L1, yang berperan sebagai pembatas (*limiter*), akan terkoneksi paralel dengan induktor L2.

Gambar 3 menunjukkan bentuk skema kendali SFCL yang berfungsi untuk mengendalikan *thyristor 1* dan *thyristor 2*. Keadaan tanpa gangguan akan mengaktifkan pemacu ke



Gambar 2. Bentuk SFCL tipe *bridge* yang terhubung dengan *microgrid*.



Gambar 3. Bentuk skema kendali SFCL.

gerbang *thyristor 1* dan *thyristor 2*. Sementara itu, ketika terjadi gangguan, *thyristor 1* dan *thyristor 2* tidak aktif. Deteksi gangguan transien pada *grid* ditentukan oleh tegangan pada sistem dengan nominal lebih dari 231 dan kurang dari 198. Jika tegangan berada di luar batas yang telah ditentukan, sakelar akan *on*. Selanjutnya, sinyal akan masuk ke *thyristor* sebagai sakelar untuk melakukan *switch-on* dan menghidupkan *thyristor*, sehingga dapat mengaktifkan *limiter* untuk menahan gangguan transien yang terjadi.

Arah arus pada saat terjadi gangguan dan saat keadaan normal akan berbeda nilainya. Pada saat keadaan normal arus tidak mengalami lonjakan, sedangkan ketika terjadi gangguan arus akan naik secara tiba-tiba dan memiliki nilai yang sangat tinggi. Lonjakan arus tersebut akan mengakibatkan sistem mengalami gangguan. SFCL tipe *bridge*, dengan konfigurasi dua buah induktor, dua buah diode, dan dua buah *thyristor*, akan mengarahkan aliran arus sesuai dengan keadaan sistem. Pada keadaan normal, arus mengalir pada kedua induktor, kedua diode, dan kedua *thyristor*. Ketika mengalami gangguan, *thyristor 1* dan *thyristor 2* akan menjadi *normally open*. Karena *thyristor 1* dan *thyristor 2* dalam keadaan mati, arus tidak dapat mengalir pada *thyristor 1* dan *thyristor 2*, sehingga arus hanya melewati induktor 1 saja.

Pada model analisis SFCL, diasumsikan kumparan SFCL sebagai induktor padat. Pemodelan dibagi menjadi dua keadaan operasi, yaitu keadaan induktor pada L1 dan induktor L2.

Model SFCL yang digunakan adalah SFCL tipe *bridge*. Perhitungan untuk menentukan nilai induktor pada SFCL ditunjukkan pada (6).

$$X_L = 2\pi \times f \times L \quad (6)$$

dengan X_L adalah reaktansi induktif (ohm), f adalah frekuensi AC dari sistem kelistrikan (Hz), dan L adalah nilai induktansi koil (H).

Dari nilai L pada (6) tidak diketahui, nilai L dapat dihitung menggunakan (7).

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (7)$$

Jika nilai X_L pada (7) juga tidak diketahui, X_L dihitung menggunakan (8).

$$X_L = \frac{V}{I} \quad (8)$$

dengan V adalah tegangan sistem (V) dan I adalah arus nominal gangguan (A).

D. ECONOMIC FEASIBILITY

Rancangan yang telah dilakukan dan disimulasikan telah memperoleh stabilitas sistem, sehingga dibutuhkan analisis perhitungan *economic feasibility*. Analisis ini merupakan perhitungan-perhitungan untuk menentukan kelayakan sebuah investasi yang dilakukan dalam sebuah rancangan sistem. Proyek dapat dikatakan layak jika memenuhi beberapa kriteria. Kriteria-kriteria ini diperoleh dengan melakukan analisis yang berupa kelayakan investasi. Terdapat empat bagian yang dianalisis, yaitu perhitungan nilai *net present value* (NPV), *profitability index* (PI), *discounted payback period* (DPP), dan *internal rate of return* (IRR).

Penghitungan kelayakan investasi dengan menganalisis NPV, PI, DPP, dan IRR dapat dilakukan jika nilai-nilai dari biaya siklus hidup (*life cycle cost*, LCC) dan biaya energi (*cost of energy*, COE) telah diperoleh. LCC dapat dihitung menggunakan (9).

$$LCC = II + O\&M \quad (9)$$

dengan LCC adalah biaya siklus hidup, II adalah biaya investasi awal yang dikeluarkan, dan $O\&M$ adalah biaya operasi dan perawatan.

Untuk menghitung nilai LCC, terlebih dahulu dicari nilai P . P adalah *present value* biaya tahunan selama umur proyek. P dihitung menggunakan (10).

$$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (10)$$

dengan A adalah biaya tahunan, i adalah tingkat diskonto, dan n adalah umur proyek.

Tingkat diskonto merupakan penerimaan pada masa yang akan datang didiskonto ke *present value*, sehingga dapat dibandingkan dengan pengeluaran saat ini. Nilai diskonto merujuk pada tingkat suku bunga pasar atau bank. Faktor diskonto dapat dihitung menggunakan (11).

$$DF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (11)$$

dengan DF adalah faktor diskonto.

Selanjutnya, $O\&M$ serta *present value* dari $O\&M$ dihitung berdasarkan biaya $O\&M$ dalam masa satu tahun per kW. Perhitungan $O\&M$ dan $O\&Mp$ dapat dilihat pada (12).

$$O\&Mp = O\&M \left[\frac{(1+i)^n}{i(1+i)^n} \right] \quad (12)$$

dengan $O\&M$ adalah biaya operasi dan perawatan dan $O\&Mp$ adalah *present value* dari $O\&M$.

Setelah perhitungan II dan $O\&Mp$ dilakukan, nilai LCC dapat dihitung. Perhitungan selanjutnya, setelah diperoleh nilai LCC , adalah mencari nilai biaya energi COE. Nilai COE dapat dihitung menggunakan (13).

$$COE = \frac{LCC \times CRF}{A \text{ kWh}} \quad (13)$$

dengan COE adalah biaya energi dihitung dalam rupiah atau dolar per kWh, CRF adalah faktor pemulihan modal, dan $A \text{ kWh}$ adalah energi yang dibangkitkan dalam satu tahun.

Setelah nilai LCC dan COE diperoleh, perhitungan nilai-nilai kelayakan investasi dapat dilakukan. Nilai NPV, PI, dan DPP dapat dihitung menggunakan (14) hingga (16).

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NFC_t}{(1+i)^t} - II \quad (14)$$

dengan NFC_t adalah *net cash flow* pada periode tahun pertama sampai tahun ke- n , i adalah nilai diskonto, dan n adalah umur investasi n tahun.

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{NFC_t}{(1+i)^t}}{II} \quad (15)$$

$$0 = \sum_{t=0}^t \frac{X_t}{(1+IRR)^t} \quad (16)$$

dengan X_t adalah *cashflow* pada tahun ke- t .

Perhitungan menggunakan persamaan-persamaan di atas akan menghasilkan nilai-nilai yang menentukan sebuah proyek dapat dikatakan layak atau tidak layak. NPV berfungsi menganalisis seluruh aliran keuangan berdasarkan faktor diskonto. Pada analisis NPV, ketika diperoleh nilai negatif, proyek menjadi tidak layak, sedangkan jika nilai yang diperoleh bernilai positif, proyek akan menjadi layak.

Analisis selanjutnya setelah menghitung nilai NPV adalah menghitung nilai PI. Sebuah proyek akan dikatakan layak jika nilai $PI > 1$. Sebaliknya, proyek menjadi tidak layak jika nilai $PI < 0$. PI memiliki fungsi untuk membandingkan antara keuangan saat ini dengan nilai investasi awal.

Analisis selanjutnya adalah menghitung nilai DPP. Nilai DPP merujuk pada jarak waktu proyek (*time span*) untuk memperoleh keuntungan, yaitu ketika dari nilai investasi awal telah diperoleh laba, sehingga *payback* keuntungan telah diperoleh. Jika keuntungan diperoleh lebih cepat daripada keseluruhan waktu proyek, investasi dapat dikatakan layak. Sebaliknya, jika keuntungan yang diperoleh melebihi keseluruhan waktu proyek, investasi dapat dikatakan tidak layak.

Analisis berikutnya adalah menghitung nilai IRR. IRR merupakan rujukan level suku bunga yang menghasilkan nilai $NPV = 0$. Apabila IRR bernilai lebih besar dari investasi awal, proyek dapat dikatakan layak. Sebaliknya, jika IRR lebih kecil dari investasi awal, proyek dapat dikatakan tidak layak.

III. SIMULASI MICROGRID

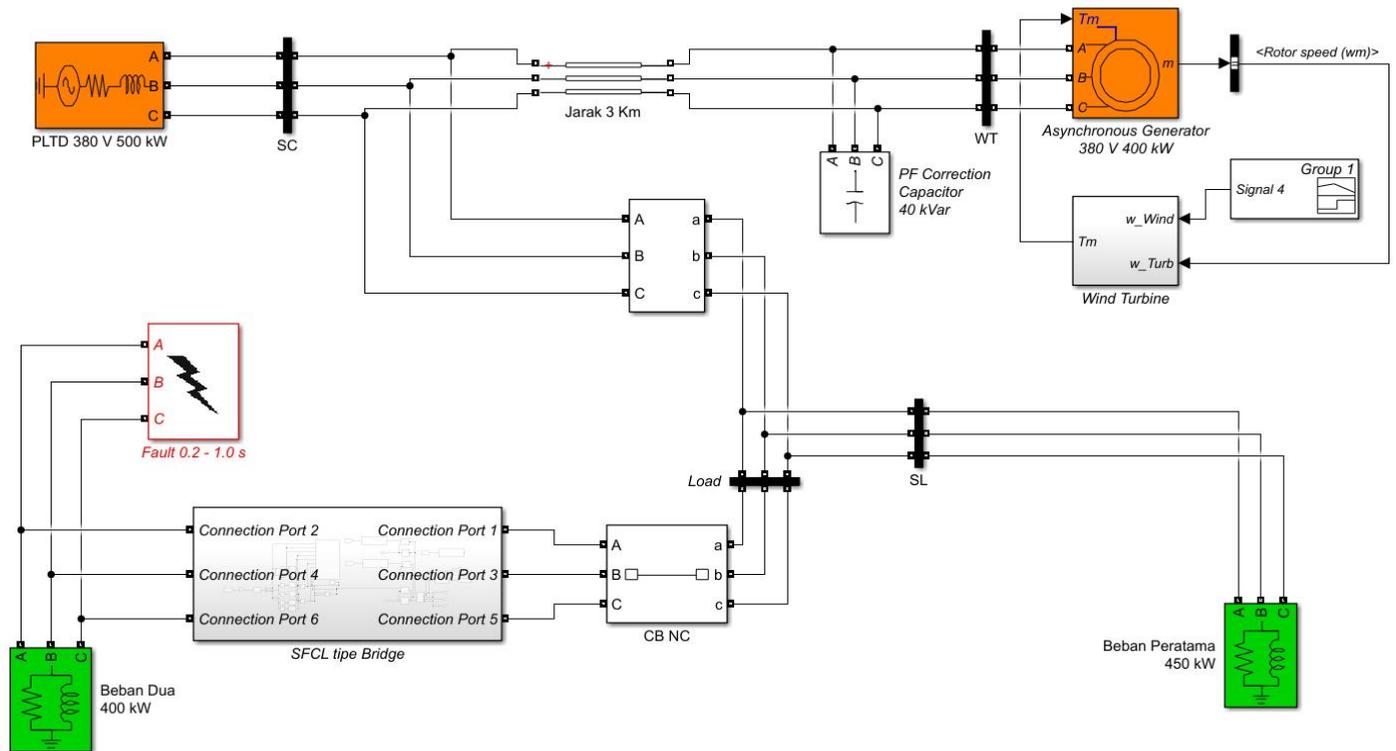
A. PARAMETER

Komponen yang digunakan adalah dua buah generator dengan total daya sebesar 900 kW. Generator satu merupakan generator tiga fase, yang merupakan generator sinkron sebagai pembangkit utama berkapasitas 500 kW yang terkoneksi dengan bus SC. Generator dua adalah generator induksi berkapasitas 400 kW. Tipe generator induksi yang digunakan adalah *squirrel-cage induction generator* (SCIG), sebagai generator pada pembangkit WT.

Pada sisi beban terdapat dua buah beban dengan total beban sebesar 850 kW. Beban satu sebesar 450 kW dan beban dua sebesar 400 kW. Selanjutnya, terdapat juga SFCL tipe *bridge* sebagai pengendali gangguan. SFCL tipe *bridge* ini memiliki komponen internal yang terdiri atas diode, *thyristor*, dan induktor. Nilai induktor L1 berbeda berbeda dengan nilai induktor L2. Nilai L1 lebih besar daripada nilai L2, yaitu L1 sebesar 0,21 mH dan L2 sebesar 0,07 mH.

Pada sisi sumber daya angin, diperoleh data kecepatan angin yang akan digunakan sebagai acuan untuk menghitung analisis dari sisi ekonomi. Data ini diambil dari Badan Pusat Statistik Kabupaten Ketapang pada tahun 2019 [18].

Parameter yang digunakan dalam simulasi merujuk pada standar aturan *grid code* PLN. Nilai yang memenuhi standar stabilitas dari *grid code* terdapat di dalam bagian penjelasan



Gambar 4. Simulasi Simulink MATLAB dari model yang diusulkan.

connection code (CC), yaitu jika frekuensi sistem dapat beroperasi secara terus-menerus di antara 49 Hz sampai 51 Hz [19]. Sementara itu, untuk standar acuan pada sisi tegangan, digunakan Standar PLN tahun 1995 dengan standar variasi tegangan 220 V +5% pada batas atas dan -10% pada batas bawah [20].

B. SIMULASI MENGGUNAKAN SIMULINK MATLAB

Simulasi sistem dibuat menggunakan Simulink MATLAB. Gambar 4 memperlihatkan hasil secara keseluruhan simulasi menggunakan Simulink MATLAB. Simulasi dilakukan dengan skenario gangguan (*fault*), yaitu terjadi gangguan pada beban dua. Skenario ini dilakukan dengan menjadikan keadaan gangguan pada beban dua pada detik 0,2 sampai 0,7, dengan simulasi selama satu detik.

IV. SIMULASI MICROGRID

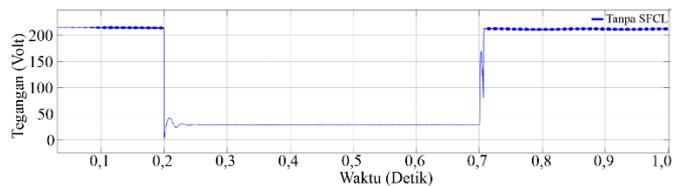
A. PEMBAHASAN SIMULASI MENGGUNAKAN SIMULINK MATLAB

Standar tegangan menurut Standar PLN adalah +5% dan -10% dari 220 V, yaitu 231 V untuk batas atas dan 198 V untuk batas bawah. Rentang antara 198 V sampai 231 V adalah standar dari PLN agar sistem masih dapat dikategorikan layak untuk beroperasi.

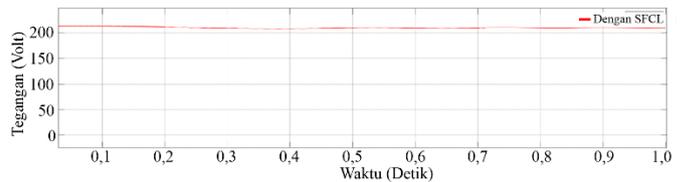
Simulasi pada *microgrid* menggunakan skenario pengujian yaitu gangguan terjadi pada beban dua. Skenario ini terjadi pada detik 0,2 sampai 0,7 dengan simulasi selama satu detik.

Ketika SFCL tipe *bridge* tidak digunakan saat gangguan terjadi, gangguan mengakibatkan penurunan tegangan. Tegangan turun sangat jauh di bawah standar kestabilan. Penurunan tegangan terendah adalah 2,5 V dan sistem tidak dapat mengendalikan gangguan yang terjadi karena tegangan terlalu rendah. Tegangan ketika terjadi gangguan tanpa SFCL tipe *bridge* ditunjukkan pada Gambar 5.

Ketika SFCL tipe *bridge* digunakan saat terjadi gangguan, tegangan pada sistem *microgrid* tetap stabil. Tegangan berada



Gambar 5. Tegangan ketika gangguan terjadi tanpa SFCL tipe *bridge*.

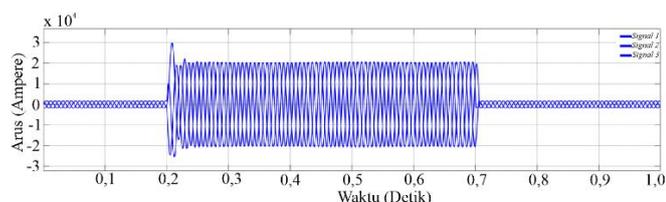


Gambar 6. Tegangan ketika gangguan terjadi dengan SFCL tipe *bridge*.

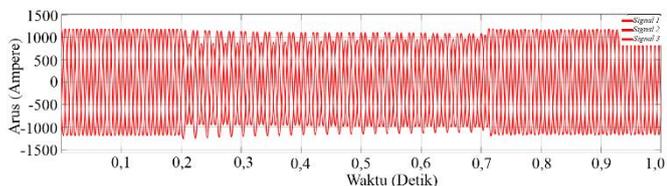
pada rentang standar kestabilan yang diperbolehkan ketika beroperasi. Penurunan tegangan tidak terjadi karena tegangan ketika gangguan adalah 207 V dan sistem dapat mengendalikan gangguan yang terjadi. Gambar 6 memperlihatkan tegangan ketika terjadi gangguan saat digunakannya SFCL tipe *bridge*.

Ketika SFCL tipe *bridge* tidak digunakan saat terjadi gangguan, akan terjadi kenaikan arus. Arus melonjak naik sangat tinggi, sehingga dapat mengakibatkan terganggunya stabilitas. Kenaikan arus tertinggi adalah 30 kA dan sistem tidak dapat mengendalikan gangguan yang terjadi karena arus terlalu tinggi. Arus ketika terjadi gangguan tanpa SFCL tipe *bridge* ditunjukkan pada Gambar 7.

Ketika SFCL tipe *bridge* digunakan saat terjadi gangguan, arus yang mengalir pada sistem *microgrid* dibatasi. Pembatasan arus mengakibatkan tidak terjadinya lonjakan arus yang sangat tinggi saat terjadi gangguan. Arus dapat dibatasi dengan sangat signifikan, dengan nilai tertinggi adalah 1,1 kA dan sistem dapat dikendalikan karena arus telah dibatasi, sehingga tidak terjadi penurunan tegangan. Gambar 8 memperlihatkan arus ketika terjadi gangguan dengan SFCL tipe *bridge*.



Gambar 7. Arus ketika gangguan terjadi tanpa SFCL tipe *bridge*.



Gambar 8. Arus ketika gangguan terjadi dengan SFCL tipe *bridge*.

Ketika SFCL tipe *bridge* tidak digunakan saat terjadi gangguan, frekuensi menjadi berfluktuasi. Fluktuasi frekuensi tidak berada di luar standar yang diperbolehkan karena nilai terendah adalah 49,7 Hz dan nilai tertinggi adalah 50,2 Hz. Frekuensi ketika terjadi gangguan tanpa SFCL tipe *bridge* ditunjukkan pada Gambar 9.

Ketika SFCL tipe *bridge* digunakan saat terjadi gangguan, frekuensi juga menjadi berfluktuasi. Fluktuasi frekuensi tidak berada di luar standar yang diperbolehkan karena nilai terendah adalah 49,9 Hz dan nilai tertinggi adalah 50,1 Hz. Frekuensi ketika terjadi gangguan dengan SFCL tipe *bridge* diperlihatkan pada Gambar 10.

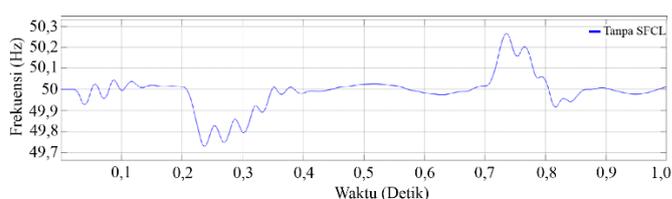
B. PEMBAHASAN ECONOMIC FEASIBILITY

Pada penelitian ini, *economic feasibility* digunakan sebagai tolok ukur sebuah proyek. Analisis kelayakan diuji setelah semua perhitungan dilakukan. Perhitungan dimulai dari nilai LCC, O&M, O&Mp, COE, NPV, PI, DPP, dan IRR. Semua bagian tersebut menjelaskan hasil dari sebuah proyek dikategorikan layak atau tidak. Berikut ini adalah hasil yang diperoleh dari perhitungan yang telah dilakukan. Pada Tabel I terdapat delapan jenis analisis yang diperoleh dari perhitungan analisis kelayakan investasi dan data angin dari Kabupaten Ketapang pada tahun 2019 [18]. Selanjutnya, Gambar 10 menunjukkan hasil secara keseluruhan simulasi menggunakan Simulink MATLAB.

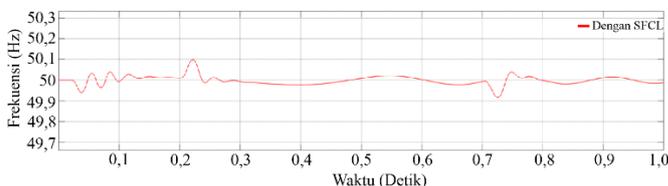
Data angin digunakan untuk memperoleh kecepatan rata-rata angin dalam rentang periode selama satu tahun. Dari rata-rata kecepatan angin dalam rentang satu tahun tersebut, dilakukan perhitungan daya yang dapat dihasilkan oleh WT.

Perhitungan pertama adalah LCC. Diperoleh nilai LCC sebesar US\$4.879.341, yang didapatkan dari penjumlahan antara nilai investasi awal dan biaya operasi serta perawatan. Nilai O&M diperoleh dari perhitungan nilai biaya operasi dan perawatan, dengan nilai US\$463.006. Nilai O&Mp diperoleh dari perhitungan O&M dengan lama proyek yang akan dijalankan, sehingga diperoleh nilai US\$3.941.834. Lalu, nilai COE diperoleh dari biaya siklus dikalikan faktor pemulihan modal dibagi energi (dalam kWh) yang dihasilkan oleh pembangkit.

Perhitungan analisis kelayakan investasi selanjutnya adalah menghitung nilai NPV. Nilai NPV diperoleh dari jumlah keuntungan dikurangi jumlah investasi, yaitu sebesar US\$6.865.405. Nilai NPV yang diperoleh tersebut memiliki nilai positif, sehingga proyek dapat dikatakan layak. Nilai PI merupakan nilai indeks keuntungan, yaitu sebesar 2,4. Tampak bahwa nilai $PI > 1$, sehingga proyek dapat dikatakan layak.



Gambar 9. Frekuensi ketika gangguan terjadi tanpa SFCL tipe *bridge*.



Gambar 10. Frekuensi ketika gangguan terjadi dengan SFCL tipe *bridge*.

TABEL I
ANALISIS INVESTMENT FEASIBILITY DAN DATA ANGIN WILAYAH KETAPANG
TAHUN 2019

Parameter	Nilai
LCC (US\$)	4.879.341
O&M (US\$)	463.006
O&Mp (US\$)	3.941.834
COE (US\$/kWh)	0,078
NPV(US\$)	6.865.405
PI	2,4
DPP (tahun)	4
IRR (%)	28,59
Rata-rata kecepatan angin (m/s)	8,5

Selanjutnya, nilai DPP merupakan rentang waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal. Diperoleh nilai DPP sebesar empat tahun pengembalian modal. Nilai DPP sebesar empat tahun tersebut merupakan indikator bahwa kelayakan terpenuhi dari sisi DPP.

Nilai IRR merupakan nilai untuk mengetahui persentase keuntungan yang diperoleh selama rentang waktu proyek dengan perolehan nilai sebesar 28,59%. Nilai tersebut lebih besar dari 10%, sehingga proyek dapat dikatakan layak.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, tegangan dan frekuensi menjadi standar kestabilan pada simulasi yang dilakukan. Tegangan dan frekuensi pada sistem dapat dikendalikan dengan baik ketika SFCL tipe *bridge* digunakan, dengan berpedoman pada standar CC dan Standar PLN. Skenario yang dilakukan adalah terjadinya gangguan pada beban dua. Skenario yang telah dibuat dengan menggunakan SFCL tipe *bridge* terbukti dapat mengatasi gangguan transien yang terjadi dan memungkinkan tegangan maupun frekuensi tidak keluar dari standar kelayakan operasi. Oleh karena itu, penggunaan SFCL tipe *bridge* ini dapat mengendalikan gangguan transien pada sistem *microgrid* dengan baik. Kemudian, arus gangguan dapat ditahan dengan signifikan, terutama saat terjadi gangguan.

Di sisi lain, dilakukan perhitungan untuk mengetahui kelayakan proyek dari sisi ekonomi ketika menggunakan SFCL. Kelayakan dihitung dari nilai LCC, O&M, O&Mp, COE, NPV, PI, DPP, dan IRR. Dari nilai-nilai yang diperoleh, dapat dinyatakan bahwa proyek memiliki kualifikasi layak.

Kelayakan dari sisi ekonomi telah diperoleh, sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan SFCL tipe *bridge* ini menguntungkan dari sisi ekonomi. Selain itu, keuntungan

lainnya adalah adanya stabilitas pada sistem karena penggunaan SFCL tipe *bridge*. Sisi ekonomi akan terpengaruh jika terjadi gangguan karena tidak diperolehnya kestabilan dan akan terjadi kehilangan pendapatan (*losses*), baik dari sisi pembangkit maupun daya listrik yang disalurkan. Akibatnya, pendapatan berkurang dan terjadi penurunan nilai pada sisi kelayakan.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tim penulis menyatakan bahwa artikel yang berjudul “Pemanfaatan SFCL Tipe *Bridge* untuk Meningkatkan Stabilitas Transien *Microgrid* dan *Economic Feasibility*” ini ditulis dengan bebas dari konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Roy Bayu Negara dan Fransisco Danang Wijaya; metodologi, Roy Bayu Negara, Fransisco Danang Wijaya, dan Lesnanto Multa Putranto; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Roy Bayu Negara dan Mohd. Brado Frasetyo; persiapan penulisan—penyusunan draf asli, Roy Bayu Negara; penulisan—penyusunan draf asli, Roy Bayu Negara, Fransisco Danang Wijaya, Lesnanto Multa Putranto, dan Mohd. Brado Frasetyo; perangkat lunak, Roy Bayu Negara, Fransisco Danang Wijaya, Lesnanto Multa Putranto, dan Mohd. Brado Frasetyo.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Fransisco Danang Wijaya, Lesnanto Multa Putranto, dan Mohd. Brado Frasetyo atas kontribusi dan bimbingannya dalam proses penelitian ini sehingga penelitian berjalan dengan baik. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Universitas Gadjah Mada.

REFERENSI

- [1] “Diseminasi RUPTL 2021-2030,” PT PLN (Persero), 2021.
- [2] Y. Sawle, S.C. Gupta, dan A.K. Bohre, “Review of Hybrid Renewable Energy Systems with Comparative Analysis of Off-Grid Hybrid System,” *Renew., Sustain. Energy Rev.*, Vol. 81, hal. 2217–2235, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.03
- [3] “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030,” PT. PLN (Persero), 2021.
- [4] Y.A. Medvedkina dan A.V. Khodochenko, “Renewable Energy and Their Impact on Environmental Pollution in the Context of Globalization,” *2020 Int. Multi-Conf. Ind. Eng., Modern Technol., (FarEastCon)*, 2020, hal. 1–4, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271508.
- [5] M. Ahmed, L. Meegahapola, A. Vahidnia, dan M. Datta, “Stability and Control Aspects of Microgrid Architectures-A Comprehensive Review,” *IEEE Access*, Vol. 8, hal. 144730–144766, Agu. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014977.
- [6] L. Sun, X. Zhao, dan Y. Lv, “Stability Analysis and Performance Improvement of Power Sharing Control in Islanded Microgrids,” *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 13, No. 6, hal. 4665–4676, Nov. 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3178593.
- [7] L. Chen dkk., “Application of a Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter for a DC Microgrid System,” *2018 IEEE Int. Conf. Appl. Supercond., Electromagn. Devices (ASEMD)*, 2018, hal. 1–2, doi: 10.1109/ASEMD.2018.8558931.
- [8] M.S. Alam dkk., “An Efficient Protection and Control Schemes for IBDG System with Resistive Superconducting Current Limiter,” *2021 5th Int. Conf. Elect. Eng., Inf. Commun. Technol. (ICEEICT)*, 2021, hal. 1-5, doi: 10.1109/ICEEICT53905.2021.9667917.
- [9] M.S. Alam dkk., “An Efficient Adjustable Duty Control Based Current Limiter for Grid-Connected Solar PV System,” *2021 5th Int. Conf. Elect. Eng., Inf. Commun. Technol. (ICEEICT)*, 2021, hal. 1-5, doi: 10.1109/ICEEICT53905.2021.9667899.
- [10] L. Chen dkk., “Application and Design of a Resistive-Type Superconducting Fault Current Limiter for Efficient Protection of a DC Microgrid,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 29, No. 2, hal. 1-7, Mar. 2019, doi: 10.1109/TASC.2018.2882228.
- [11] M. Chewale dkk., “A Comprehensive Review on Fault Current Limiter for Power Network,” *2019 Int. Conf. Recent Adv. Energy-Efficient Comput., Commun. (ICRAECC)*, 2019, hal. 1-7, doi: 10.1109/ICRAECC43874.2019.8995098.
- [12] I.K. Okakwu, P.E. Orukpe, dan E.A. Ogujor, “Application of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) in Power Systems: A Review,” *Eur. J. Eng. Res., Sci.*, Vol. 3, No. 7, hal. 28-32, Jul. 2018, doi: 10.24018/ejeng.2018.3.7.799.
- [13] J. Xu, X. Cao, dan Z. Hao, “A Droop Control Strategy Based on Synchronous Rectifier to Modulate the Frequency and Voltage in AC Microgrid,” *2019 22nd Int. Conf. Elect. Mach., Syst. (ICEMS)*, 2019, hal. 1-5, doi: 10.1109/ICEMS.2019.8921702.
- [14] S. Ullah, L. Khan, I. Sami, dan J.-S. Ro, “Voltage/Frequency Regulation with Optimal Load Dispatch in Microgrids Using SMC Based Distributed Cooperative Control,” *IEEE Access*, Vol. 10, hal. 64873–64889, Jun. 2022, doi: 0.1109/ACCESS.2022.3183635.
- [15] R. Tan, Y. Wang, dan S. Zhang, “Coordination Scheme of SFCL and SMES in the DC Microgrid for Fault Current Limiting and Voltage Stability,” *2020 IEEE Int. Conf. Appl. Supercond., Electromagn. Devices (ASEMD)*, 2020, hal. 1–2, doi: 10.1109/ASEMD49065.2020.9276114.
- [16] I. Boldea, “Electric Generators and Motors: An Overview,” *CES Trans. Elect. Mach. Syst.*, Vol. 1, No. 1, hal. 3–14, Mar. 2017, doi: 10.23919/TEMS.2017.7911104.
- [17] M. Satish dan H.S. Veena, “Transient Stability Enhancement of a Microgrid Consisting of Solar PV and DFIG Based Wind Turbine System Using Bridge Type SFCL,” *2020 Int. Conf. Smart Technol. Comput. Elect. Electron. (ICSTCEE)*, 2020 hal. 408–411, doi: 10.1109/ICSTCEE49637.2020.9277174.
- [18] Badan Pusat Statistik Kabupaten Ketapang, “Rata-Rata Kecepatan Angin Kabupaten Ketapang (Knot), 2018-2019,” 2020, [Online], <https://ketapangkab.bps.go.id/indicator/151/123/1/rata-rata-kecepatan-angin-kabupaten-ketapang.html>
- [19] “Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code),” Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, No. 2, 2020..
- [20] “Standar-Standar Tegangan,” PT PLN (Persero), 1995.