

Peningkatan Stabilitas Transien pada Turbin Angin Berbasis DFIG Menggunakan SFCL tipe *Bridge*

Doane Puri Mustika¹, Sasongko Pramono Hadi², Mokhammad Isnaeni B³, Mohd. Brado Frasetyo⁴, Tumiran⁵

Intisari—Produksi energi listrik saat ini banyak dilakukan dengan pembakaran fosil secara besar yang mengakibatkan efek negatif untuk bumi, yaitu *global warming*. Langkah yang dapat dilakukan dalam sektor listrik untuk meminimalkan emisi adalah dengan melakukan pergantian pembangkit konvensional ke terbarukan. Energi angin menjadi salah satu jenis energi baru terbarukan (EBT) yang berpotensi untuk meminimalkan emisi. Pembangkit energi angin yang banyak digunakan saat ini adalah pembangkit energi angin berkecepatan variabel, seperti *doubly fed induction generator* (DFIG). DFIG memiliki banyak keunggulan, seperti lebih fleksibel dan dapat mengontrol daya aktif maupun reaktif. Akan tetapi, DFIG sering mengalami masalah ketidakstabilan dalam sistem ketika mengalami transien. Oleh karena itu, dibutuhkan solusi yang dapat meningkatkan stabilitas transien pada DFIG. *Superconducting fault current limiter* (SFCL) tipe *bridge* digunakan dalam penelitian ini untuk menjadi solusi peningkatan stabilitas transien pada DFIG, yang terdiri atas dua diode dan dua induktor. SFCL tipe *bridge* ini bekerja dengan membatasi arus ketika sistem mengalami gangguan, sehingga tidak terjadi turun tegangan atau *trip*. Hasil simulasi dianalisis dalam dua keadaan. Pada keadaan yang pertama, sistem turbin angin DFIG 9 MW yang diberi gangguan dengan dipasangkan SFCL menghasilkan nilai tegangan 219 V, dengan nilai frekuensi yang lebih stabil, yaitu 50 Hz, dan nilai daya aktifnya adalah 9 MW. Sementara itu, ketika sistem yang tidak menggunakan SFCL diberi gangguan, terjadi turun tegangan dari keadaan normal 219 V menjadi 100 V. Nilai frekuensinya kurang stabil, yaitu naik turun antara 49,75-50,25 Hz, sedangkan daya aktifnya mengalami penurunan menjadi 6 MW dari sebelumnya 9 MW. Hal ini membuktikan bahwa metode SFCL tipe *bridge* efektif meningkatkan stabilitas transien pada DFIG.

Kata Kunci—*Global Warming*, EBT, DFIG, SFCL.

I. PENDAHULUAN

Produksi energi listrik banyak dilakukan dengan cara pembakaran fosil secara besar-besaran yang mengakibatkan efek negatif untuk bumi, yaitu *global warming* [1], [2]. Hasil pembakaran batu bara menciptakan produksi karbon dioksida dalam jumlah yang banyak, sehingga membuat lapisan ozon menjadi rusak, mengakibatkan suhu di bumi tidak menentu, dan memunculkan berbagai penyakit bagi makhluk hidup [3], [4]. Oleh karena itu, dunia saat ini melalui Paris Agreement juga

mencanangkan pengurangan emisi sebesar 25% pada sektor listrik di tahun 2030 karena sektor listrik dianggap lebih mudah dikendalikan daripada sektor transportasi dan yang lainnya [5]. Untuk mengurangi pembakaran fosil dari produksi energi listrik, Indonesia sendiri telah mencanangkan minimal 23% pasokan energi listrik harus berasal dari sumber energi terbarukan pada tahun 2025 [6].

Hal yang dapat dilakukan dalam sektor listrik untuk meminimalkan emisi adalah dengan mengganti pembangkit listrik konvensional menjadi pembangkit listrik energi terbarukan [7]. Salah satu pembangkit listrik energi terbarukan adalah pembangkit listrik yang bersumber pada angin [8]. Di benua Eropa, pembangkit listrik tenaga angin menjadi pembangkit yang paling cepat pertumbuhannya dibandingkan dengan pembangkit energi terbarukan yang lain [9], [10]. Selanjutnya, tenaga angin juga diposisikan sebagai sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan. Hal ini dinyatakan berdasarkan pertimbangan dalam perencanaan dan pembangunan energi yang sedang berlangsung di beberapa negara di seluruh dunia [11]-[13].

Salah satu pembangkit tenaga angin yang saat ini banyak digunakan adalah pembangkit berkecepatan variabel, karena dianggap lebih fleksibel dibandingkan yang lain [14]. Pembangkit listrik tenaga angin berbasis *doubly fed induction generator* (DFIG) merupakan teknologi berkecepatan variabel [15]. DFIG memiliki banyak keunggulan, di antaranya mampu mengendalikan daya aktif dan reaktif [16]. Kemudian, DFIG juga lebih unggul dalam hal kemampuannya menangkap energi dalam jumlah besar dan kemampuan kontrol yang lebih baik [17]. Di sisi lain, masalah yang sering terjadi pada pembangkit listrik tenaga angin berbasis DFIG adalah ketidakstabilan atau *trip* ketika ada gangguan (*fault*) pada sistem, yang disebut dengan gangguan transien [18]. Transien merupakan peristiwa yang terjadi karena adanya perubahan nilai pada tegangan atau arus secara tiba-tiba dalam waktu yang cepat pada saat kondisi tunak (*steady state*) [19].

Oleh karena itu, dibutuhkan teknologi terbaru yang dapat mengatasi masalah penurunan stabilitas transien. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan stabilitas transien adalah *current limiter* [20]. *Current limiter* merupakan sebuah metode yang dapat membatasi arus pada sistem. Hal ini yang menyebabkan sebuah sistem tidak akan mengalami *drop* tegangan dan *trip* ketika terjadi gangguan. Jenis *current limiter* yang paling banyak digunakan saat ini adalah *superconducting fault current limiter* (SFCL). SFCL mampu menaikkan stabilitas transien yang lebih baik dan mampu merespons gangguan dengan cepat [21].

Telah banyak penelitian sebelumnya yang berusaha meningkatkan stabilitas transien pada power sistem. Sebuah penelitian meneliti cara untuk mengatasi DFIG ketika

^{1,2,3,4,5} Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Bulaksumur, Caturtunggal, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281, INDONESIA (tel.: (0274)588688; fax: (0274)565223; email: ¹doane.puri.mustika@mail.ugm.ac.id, ²sasongko@ugm.ac.id, ³mokhammad.isnaeni.b.s@mail.ugm.ac.id, ⁴mohd.brado@mail.ugm.ac.id, ⁵tumiran@ugm.ac.id)

[Diterima: 9 Juli 2022, Revisi: 20 September 2022]

mengalami *drop* tegangan dan fluktuasi acak. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *three level NPC converter*, dibandingkan dengan sistem konvensional dua level. Hasil simulasi menunjukkan bahwa menggunakan tiga level lebih baik daripada dua level. Hal ini terjadi karena metode tiga level dapat merespons lebih cepat dan memiliki kemampuan kontrol untuk merespons selama kondisi gangguan, serta kembali ke tegangan awal dalam waktu yang singkat [22]. Namun, perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan metode SFCL tipe *bridge* untuk hasil yang lebih optimal.

Penelitian yang lain menguji cara untuk mengatasi turbin angin DFIG agar dapat melewati patahan atau gangguan yang sesuai kode *grid* Swedia. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah mengimplementasikan SFCL dengan *high temperature superconductor* (HTS) untuk memungkinkan DFIG melewati gangguan yang terhubung ke jaringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa DFIG tanpa *ride through* dapat mengganggu margin stabilitas transien. Ketika menggunakan *ride through*, DFIG dengan penerapan SFCL dengan HTS dapat meningkatkan stabilitas transien *small power producer* (SPP) [23]. Akan tetapi, perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan metode SFCL tipe *bridge* untuk hasil yang lebih optimal.

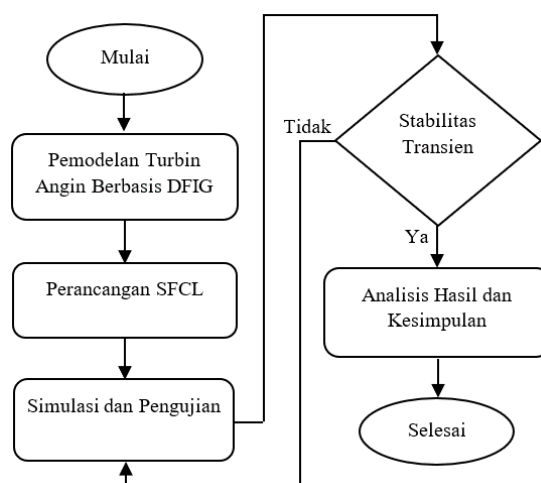
Sebuah penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan stabilitas transien pada DFIG. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *fault current limiter* (FCL) dengan HTS. Hasil penelitian menunjukkan skema yang dibuat, yaitu FCL dengan HTS bertindak sebagai penguat tegangan yang baik dengan biaya yang rendah [24]. Skema menggunakan HTS ini memerlukan waktu untuk melakukan pendinginan pada resistor, sehingga diperlukan metode yang lebih cepat dalam mengatasi stabilitas transien.

Penelitian yang lain dilakukan dengan tujuan membuat turbin angin berbasis DFIG dapat melewati gangguan dalam durasi waktu yang singkat. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *superconducting magnetic energy storage-fault current limiter* (SMES-FCL). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode SMES-FCL membuat turbin angin berbasis DFIG dapat melewati gangguan, sehingga tidak mengalami *trip*. Metode tersebut juga dapat menaikkan stabilitas transien [25]. Maka, perlu dilakukan penelitian menggunakan metode SFCL tipe *bridge* agar sistem lebih cepat dalam melewati arus gangguan.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, hendak dikembangkan dan dianalisis metode *current limiter* pada pembangkit listrik tenaga angin berbasis DFIG dalam skala besar untuk melihat keefektifannya. Oleh karena itu, dilakukan analisis dan peningkatan stabilitas transien dengan menggunakan metode SFCL tipe *bridge* pada pembangkit listrik tenaga angin berbasis DFIG. Dengan menggunakan metode SFCL tipe *bridge* ketika sebuah sistem mengalami gangguan besar, sistem akan kembali pada keadaan semula tanpa terjadi *trip* dalam waktu yang cepat dan tidak akan melebihi batas nilai yang telah ditentukan sesuai dengan *grid code* Indonesia.

II. METODOLOGI

Penelitian ini membahas sistem turbin angin berbasis DFIG dengan kapasitas 9 MW yang dimodelkan dalam Simulink



Gbr. 1 Diagram alir penelitian.

MATLAB. Penelitian ini memiliki beberapa tahap, yaitu pemodelan pembangkit listrik tenaga angin berbasis DFIG, perancangan metode SFCL tipe *bridge* pada sistem pembangkit tenaga angin berbasis DFIG, pengujian kinerja, analisis, dan kesimpulan.

A. Alur Rancangan Metode Penelitian

Gbr. 1 menunjukkan diagram alir penelitian pemodelan turbin angin berbasis DFIG yang dilakukan menggunakan Simulink MATLAB, dengan menggunakan parameter-parameter yang ada pada Simulink. Tujuan perancangan metode SFCL tipe *bridge* pada sistem turbin angin berbasis DFIG ini adalah untuk meningkatkan stabilitas transien ketika sistem mengalami gangguan besar, sehingga sistem tidak akan mengalami *trip* dan akan kembali ke keadaan semula dengan cepat dalam melewati gangguan tersebut. Sistem pada penelitian ini adalah pembangkit listrik tenaga angin berbasis DFIG yang diparalelkan dengan teknologi SFCL tipe *bridge*. Dengan pengaruh teknologi SFCL terhadap sistem ketika mengalami gangguan besar, sistem akan melewati gangguan secara otomatis sehingga tidak terjadi *trip* pada sistem.

Simulasi dan pengujian metode SFCL pada sistem turbin angin berbasis DFIG ini dilakukan dengan dua keadaan. Keadaan yang pertama adalah sebuah sistem turbin angin berbasis DFIG diuji tanpa teknologi SFCL ketika mengalami gangguan besar, sedangkan keadaan kedua adalah sistem turbin angin berbasis DFIG diuji menggunakan teknologi SFCL tipe *bridge* ketika mengalami gangguan besar. Tahap analisis berusaha membuktikan bahwa metode yang diusulkan, yaitu metode SFCL tipe *bridge*, merupakan metode yang paling baik untuk digunakan dalam peningkatan stabilitas transien. Metode SFCL diharapkan mampu melewati gangguan dengan cepat sehingga tidak terjadi *trip* pada sistem.

B. Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat digunakan untuk menghasilkan listrik [26], [27]. Energi angin dan energi terbarukan lainnya diperkirakan akan menjadi sumber energi yang cepat pertumbuhannya [28]. Energi angin juga merupakan alternatif energi yang ramah

lingkungan yang dapat mengurangi emisi. Emisi yang dihasilkan pada pembangkitan energi listrik dari pembakaran bahan bakar fosil menjadi salah satu faktor yang paling tinggi selain transportasi. Jika emisi dibiarkan tanpa adanya upaya untuk menguranginya, lapisan ozon akan menjadi rusak sehingga suhu di bumi tidak menentu dan dapat menyebabkan beberapa penyakit baru bagi makhluk hidup. Pembangkit listrik tenaga angin ini bekerja menggunakan bantuan kincir angin yang dipasang dalam jumlah banyak di suatu tempat atau ladang yang jauh dari pemukiman. Kincir angin ini akan memutar peralatan mekanik pada turbin angin. Kemudian, sebuah generator akan mengubah energi gerak menjadi energi listrik menggunakan teori medan elektromagnetik. Pada poros generator dipasang secara permanen feromagnetik dan di sekeliling poros dibentuk kumparan-kumparan kawat. Saat poros berputar karena angin, akan terjadi fluks yang akhirnya menjadi arus dan tegangan. Kemudian, daya listrik tersebut dapat disalurkan melalui jaringan transmisi dan sistem distribusi kepada masyarakat banyak.

Komponen-komponen turbin angin meliputi rotor, baling-baling, *gearbox*, generator, poros kecepatan rendah, poros kecepatan tinggi, dan *tower*. Rotor berfungsi sebagai bagian yang menerima energi kinetik dari hembusan angin yang diubah menjadi energi gerak untuk berputar. Baling-baling atau bilah berfungsi untuk menangkap angin yang masuk atau mengenai bagiannya kemudian berubah menjadi energi putar untuk diteruskan ke dalam generator. Baling-baling biasanya terdiri atas tiga bilah. *Gearbox* berfungsi sebagai pengatur kecepatan turbin angin agar bergerak secara konstan. Generator memiliki fungsi yang paling penting, yaitu mengubah energi putar yang masuk menjadi energi listrik. Poros kecepatan rendah berfungsi sebagai poros yang menghubungkan antara *gearbox* dengan rotor, sedangkan poros kecepatan tinggi berfungsi memutar generator untuk membangkitkan energi listrik. *Tower* merupakan penyangga turbin angin untuk menopang beban yang ada pada kesatuan turbin angin di atas.

Besar kecilnya nilai daya yang dihasilkan dari turbin angin dipengaruhi oleh energi kinetik yang diperoleh. Persamaan energi kinetik pada turbin angin ditunjukkan pada (1).

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

dengan Ek merupakan energi kinetik, m adalah massa, dan v adalah kecepatan angin dalam m/s. Untuk mencari nilai massa, digunakan (2).

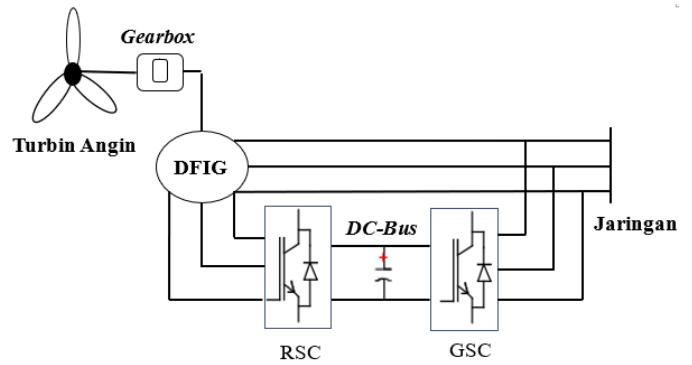
$$m = \rho Av \tag{2}$$

dengan m merupakan nilai massa, ρ adalah nilai kerapatan udara dalam kg/m^3 , dan v merupakan nilai kecepatan angin dalam m/s.

Dari (1) dan (2) dapat dihasilkan persamaan untuk mencari nilai daya pada turbin angin, yang ditunjukkan pada (3).

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \tag{3}$$

dengan P merupakan nilai daya angin, ρ adalah nilai kerapatan udara dalam kg/m^3 , A merupakan luas area turbin yang disapu oleh angin dalam m^2 , dan v adalah kecepatan angin dalam m/s.



Gbr. 2 Turbin angin berbasis DFIG.

Selanjutnya, daya turbin angin diperoleh dari daya angin menggunakan (4) dan (5), dengan melibatkan parameter koefisien daya atau Cp .

$$Cp = \frac{P \text{ turbin angin}}{P \text{ angin}} \tag{4}$$

$$P \text{ turbin angin} = Cp \frac{1}{2} \rho Av^3. \tag{5}$$

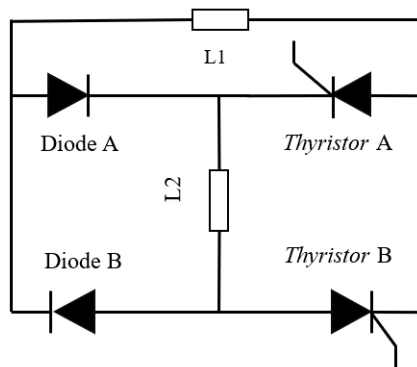
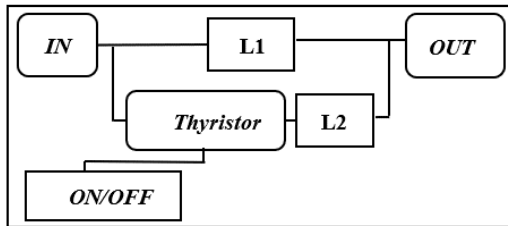
C. Doubly Fed Induction Generator (DFIG)

Pembangkit listrik tenaga angin yang saat ini banyak digunakan adalah jenis turbin angin berkecepatan variabel. Salah satunya adalah DFIG. DFIG merupakan sebuah generator distribusi ganda yang dihubungkan dengan jaringan pembangkit listrik. Kinerja DFIG ini dibuat dengan skema yang ramah lingkungan, sehingga dapat mengendalikan daya aktif dan reaktif serta menjadi alat ukur tegangan pada turbin angin yang ada dalam sistem pembangkit tenaga angin tersebut. DFIG memiliki banyak keunggulan dibandingkan jenis lainnya, di antaranya mampu bekerja lebih fleksibel sesuai dengan kebutuhan beban dan juga dapat menyuplai energi dalam jumlah yang besar. Sistem pembangkit tenaga angin berbasis DFIG ini menggabungkan mesin induksi rotor yang dioperasikan sebagai generator dengan menerapkan metode torsi negatif ke dalam poros utamanya. Bagian stator dihubungkan ke *grid* dengan transformator, sedangkan bagian rotor dihubungkan dengan konverter arah bolak-balik [29].

Pembangkit listrik tenaga angin berbasis DFIG pada Gbr. 2 ini terdiri atas *gearbox*, *rotor side converter* (RSC), *grid side converter* (GSC), dan *DC bus*. *Gearbox* berfungsi untuk meningkatkan kecepatan putar agar konstan. DFIG merupakan generator yang memanfaatkan konverter, yaitu untuk mengontrol daya aktif dan daya reaktif. Kemudian, RSC digunakan untuk mengatur daya aktif dan reaktif, yaitu aliran arus masuk melalui RSC dikontrol agar sesuai dengan beban. Selanjutnya, GSC berfungsi untuk menstabilkan tegangan DC, sedangkan *DC bus* berfungsi untuk menyimpan energi sementara guna memperlancar aliran daya. Persamaan daya masukan turbin angin ditunjukkan pada (6).

$$Pwt = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho Vw^3 \tag{6}$$

dengan Pwt merupakan daya masukan pada turbin angin, yang berupa daya mekanik (W); R adalah diameter turbin (m), ρ adalah kerapatan udara (kg/m^3), dan Vw merupakan kecepatan

Gbr. 3 SFCL tipe *bridge*.Gbr. 4 Kontrol SFCL tipe *bridge*.

udara (m/s). Daya turbin angin yang dihasilkan pada sistem ini dipengaruhi oleh kecepatan angin yang memutar bilah pada turbin angin. Bilah turbin angin tersebut memutar generator untuk menghasilkan listrik. Arus yang dihasilkan generator masuk ke dalam konverter untuk dikontrol agar daya yang dihasilkan sesuai dengan beban.

Dalam sistem DFIG, energi listrik dihasilkan dari stator maupun rotor. Daya listrik yang dihasilkan oleh stator dapat dihitung menggunakan (7).

$$P_s = T_{em} \omega_s \quad (7)$$

dengan P_s merupakan daya yang dihasilkan stator (W), T_{em} adalah torka elektromagnetik (N.m), dan ω_s merupakan kecepatan medan putar stator (rad/s).

Total daya elektrik yang dihasilkan oleh generator bernilai sama dengan daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin. Dengan demikian, daya elektrik yang dihasilkan oleh rotor P_r dapat dihitung berdasarkan (8).

$$P_r = P_m - P_s \quad (8)$$

dengan P_r adalah daya rotor, P_m adalah daya mekanik, dan P_s adalah daya stator.

D. Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)

Current limiter merupakan teknologi pembatas arus yang digunakan untuk membatasi arus ketika sistem mengalami gangguan. SFCL tipe *bridge* merupakan salah satu jenis *current limiter* yang merupakan gabungan antara diode dan *thyristor* secara paralel. SFCL tipe *bridge* dalam pembangkit listrik tenaga angin berbasis DFIG berfungsi sebagai pembatas arus. Dengan adanya SFCL, sebuah sistem tidak akan mengalami *drop* tegangan dan arus puncak ketika terjadi transien. Kemudian, *thyristor* pada SFCL berfungsi sebagai pengontrol arus listrik, sedangkan diode berfungsi sebagai pembatas

TABEL I
PARAMETER SISTEM

Parameter	Nilai
Daya aktif generator 1	3 MW
Daya aktif DFIG	9 MW
V_s _nom DFIG	380 V
V_r _nom DFIG	380 V
Frekuensi DFIG	50 Hz
L1 SFCL	400 mH
L2 SFCL	600 mH

tegangan. Hal inilah yang menyebabkan SFCL digunakan untuk meningkatkan stabilitas transien pada power sistem [30]. Diagram blok SFCL tipe *bridge* ditunjukkan pada Gbr. 3, sedangkan cara kerja pengontrolan ditunjukkan pada Gbr. 4. Dalam keadaan normal, *thyristor A* dan *thyristor B* akan *off*, sehingga arus hanya dapat melewati L1 saja. Ketika terjadi gangguan atau *fault*, diode B dan *thyristor A* akan *on*, sehingga arus akan melewati dua bagian, yaitu melewati L1 400 mH dan melewati L2 600 mH. *Thyristor* akan *on* atau *off* sesuai dengan waktu yang ditentukan oleh *sequence* dengan mengikuti waktu gangguannya. Ketika sistem diberi gangguan pada detik ke 0,5-0,7, *sequence* akan disesuaikan pada detik tersebut. Peristiwa ini disebut dengan membatasi arus ketika gangguan, dengan membagi aliran arus menjadi dua supaya tidak terjadi arus puncak yang menyebabkan *drop* tegangan.

E. Stabilitas Transien

Stabilitas transien merupakan kestabilan peralihan atau kemampuan sebuah sistem tenaga untuk mencapai titik keseimbangannya agar kembali ke keadaan normal atau *steady state* setelah mengalami gangguan yang besar. Contoh gangguan besar ini adalah terlepasnya beban secara tiba-tiba atau terjadinya hubung singkat yang mengakibatkan perubahan arus dan tegangan dengan cepat. Perubahan arus dan tegangan yang cepat ini dapat mengakibatkan sistem tenaga kehilangan stabilitasnya dan menyebabkan sistem mengalami *drop* tegangan dan *trip*. Jenis gangguan besar ini dapat terjadi ketika ada penambahan atau pengurangan daya yang sangat besar pada beban secara tiba-tiba, sehingga menyebabkan terputusnya saluran transmisi dan gangguan hubung singkat, seperti gangguan tiga fase, dua fase, dan satu fase.

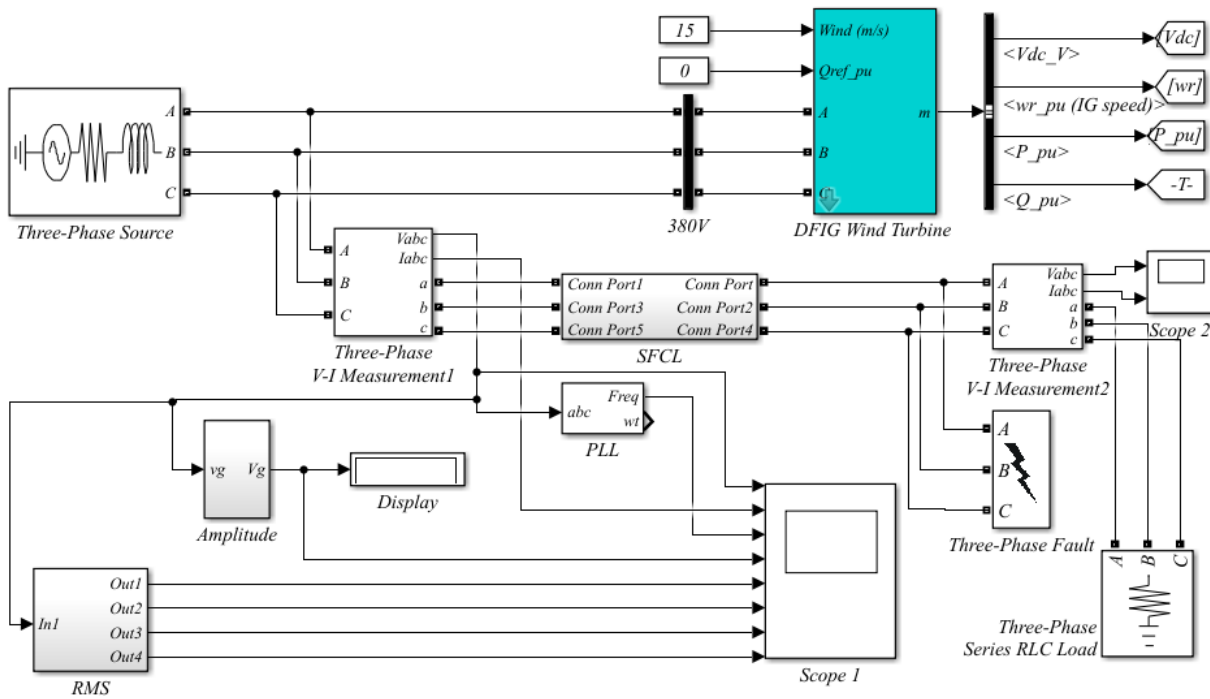
III. SIMULASI SISTEM

A. Parameter

Pada penelitian ini, sistem yang digunakan adalah generator sinkron berkapasitas 3 MW yang diparalelkan dengan DFIG berkapasitas 9 MW. Tegangan stator memiliki nilai nominal 380 V, tegangan rotor bernilai nominal 380 V, dengan frekuensi 50 Hz. Kemudian, ditambahkan beban berkapasitas 11 MW, dengan frekuensi 50 Hz. SFCL tipe *bridge* yang digunakan memiliki nilai L1 sebesar 400 mH dan L2 sebesar 600 mH. Data parameter sistem dirangkum dalam Tabel I.

B. Pengujian Simulink MATLAB

Penelitian ini melakukan pengujian sistem dengan memberikan gangguan pada detik ke 0,5-0,7 yaitu dengan dua



Gbr. 5 Sistem turbin angin berbasis DFIG.

keadaan. Pada keadaan yang pertama, sistem diuji dengan menggunakan SFCL tipe *bridge*, sedangkan pada keadaan kedua, sistem diuji tanpa menggunakan SFCL tipe *bridge*.

IV. METODOLOGI

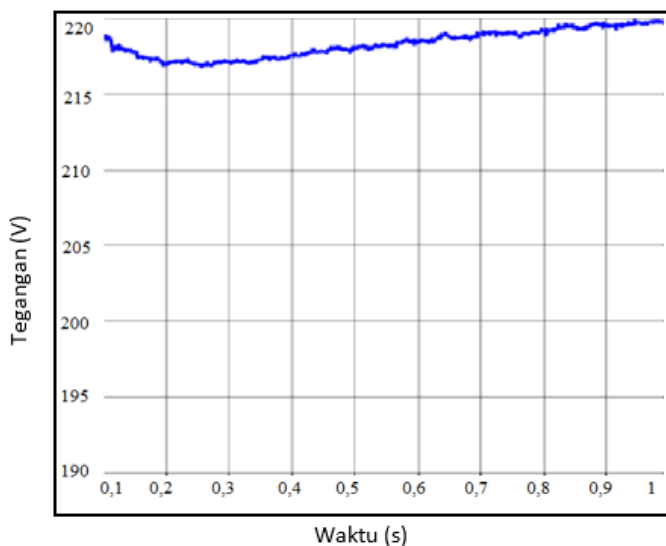
Pada penelitian ini, digunakan sistem pembangkit listrik tenaga angin 9 MW berbasis DFIG. Sistem ini dirancang dalam Simulink MATLAB. Pada Gbr. 5 ditunjukkan hasil model dalam Simulink. Penelitian ini dilakukan dalam dua keadaan. Keadaan pertama adalah keadaan sistem ketika diberi gangguan dalam beberapa detik dengan menggunakan SFCL tipe *bridge*. Keadaan kedua adalah keadaan sistem diberi gangguan beberapa detik tanpa menggunakan SFCL tipe *bridge*. Teknologi SFCL ini dirancang juga dalam Simulink dengan komponen utama diode dan *thyristor*. Diode merupakan komponen pasif dan *thyristor* merupakan komponen aktif. SFCL tipe *bridge* digunakan untuk meningkatkan stabilitas transien pada sistem. Ketika sistem mengalami gangguan, sistem tidak akan *trip* karena sudah diatur dengan SFCL tipe *bridge* dengan membagi arus melewati dua jalur, untuk mengontrol terjadinya arus puncak yang menyebabkan *drop* tegangan secara tiba-tiba.

Gbr. 6 menunjukkan hasil simulasi pembangkit listrik tenaga angin berbasis DFIG 9 MW yang diberi *fault* atau gangguan pada detik ke 0,5-0,7, dengan menggunakan SFCL tipe *bridge* untuk meminimalkan terjadinya *trip*. Hasil menunjukkan bahwa ketika sistem dalam keadaan normal, dihasilkan tegangan 219 V dan ketika diberi gangguan, sistem tidak mengalami penurunan tegangan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dengan SFCL tipe *bridge* mampu melewati gangguan tanpa adanya *drop* tegangan atau *trip*. Hal ini terjadi karena pada sistem yang menggunakan SFCL tipe *bridge* ini arus dapat melewati dua induktor (arus dibatasi oleh dua induktor), yang

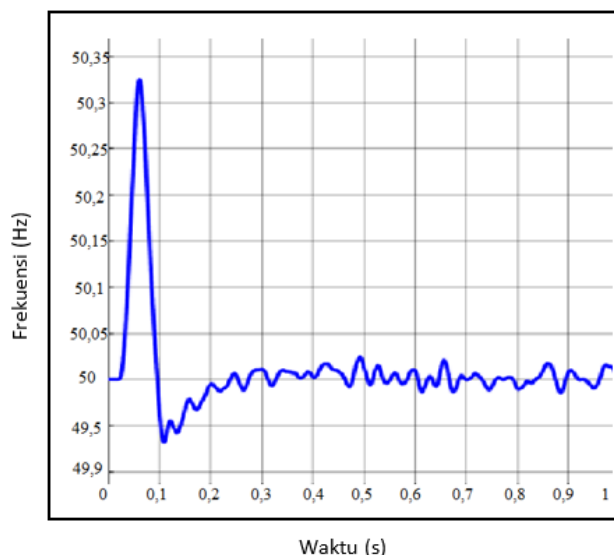
tidak menyebabkan arus puncak dan nilai tegangan menjadi stabil. Keadaan ini juga masih dianggap normal yang sesuai dengan *grid code* 2007, yaitu tegangan 220 V memiliki rentang antara +5% dan -10%. Jadi, sistem 219 V dikatakan normal jika memiliki nilai tegangan dalam rentang 198-231 V.

Gbr. 7 menunjukkan tegangan ketika sistem pembangkit tenaga angin berbasis DFIG ini diberi gangguan pada detik ke 0,5-0,7 tanpa menggunakan model teknologi SFCL tipe *bridge*. Hasilnya menunjukkan bahwa ketika sistem diberi gangguan pada detik ke 0,5-0,7, nilai tegangan menjadi 120 V atau sistem mengalami keadaan mati dengan nilai tegangan ketika normal adalah 219 V. Ketika diberi gangguan tanpa menggunakan SFCL, tegangan langsung turun secara drastis dan tiba-tiba karena terjadi arus puncak akibat adanya gangguan dan tidak adanya teknologi yang digunakan untuk membatasi arus tersebut. Selisih antara tegangan nominal dan keadaan transien tanpa menggunakan SFCL adalah 100 V. Sesuai dengan standar kualitas operasi sistem di Indonesia, kondisi tersebut dikategorikan sebagai kondisi gangguan karena tegangan berada di bawah rentang tegangan kondisi normal, yaitu 198-231 V.

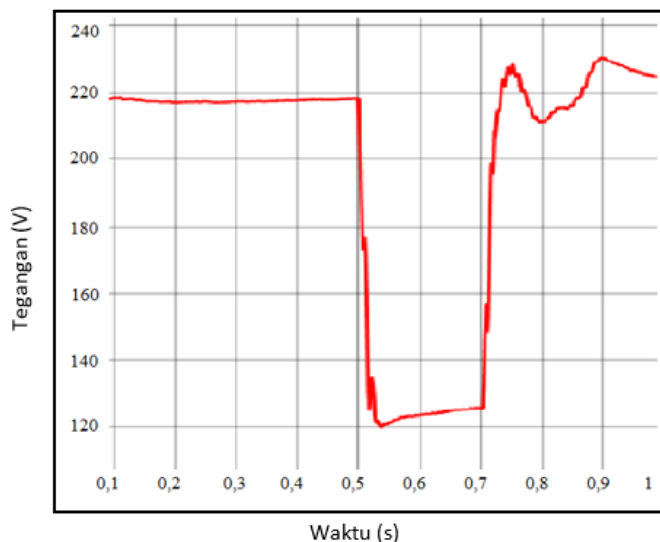
Gbr. 8 menunjukkan nilai frekuensi yang diperoleh sistem pembangkit listrik tenaga angin berbasis DFIG dengan menggunakan SFCL tipe *bridge*. Hasil simulasi menunjukkan hasil yang baik ketika SFCL digunakan. Hal ini terjadi karena ketika SFCL tipe *bridge* digunakan ketika terjadi gangguan, sistem mampu menjaga kestabilan putaran rotor yang menyebabkan nilai frekuensi tetap berada pada nilai nominal. Hal ini dibuktikan ketika sistem diberi gangguan pada detik ke 0,5-0,7, yaitu nilai frekuensi masih stabil, sebesar 50 Hz. Menurut standar kualitas operasi sistem *grid code* Indonesia, kondisi ini masih dikatakan normal, yaitu masih berada pada rentang $49,00 \text{ Hz} \leq f \leq 51,00 \text{ Hz}$.



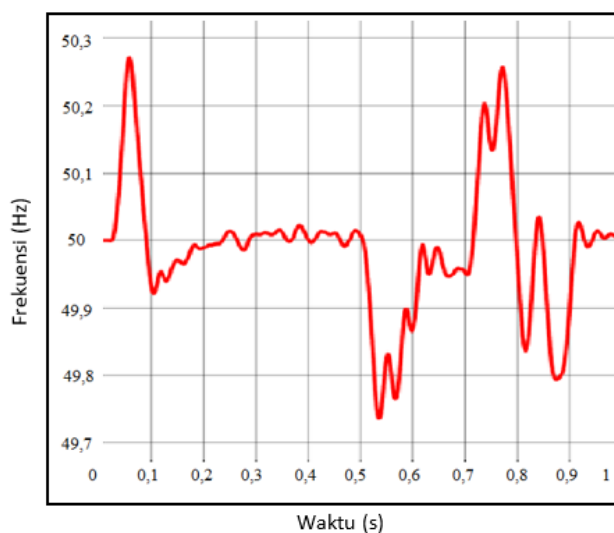
Gbr. 6 Nilai tegangan dengan menggunakan SFCL tipe *bridge*.



Gbr. 8 Nilai frekuensi dengan menggunakan SFCL tipe *bridge*.



Gbr. 7 Nilai tegangan tanpa menggunakan SFCL tipe *bridge*.



Gbr. 9 Nilai frekuensi tanpa menggunakan SFCL tipe *bridge*.

Gbr. 9 menunjukkan nilai frekuensi pada sistem pembangkit tenaga angin berbasis DFIG ini tanpa menggunakan SFCL tipe *bridge*. Ketika sistem diberi gangguan, yaitu pada detik ke 0,5-0,7, hasil simulasi tidak lebih stabil dibandingkan yang menggunakan SFCL. Nilai frekuensi berada di antara nilai 49,75-50,25 Hz. Hal ini terjadi karena ketika ada gangguan dalam sistem tanpa SFCL tipe *bridge*, sistem tidak mampu menjaga kestabilan putaran rotor dengan baik, yang menyebabkan nilai frekuensi menjadi tidak sesuai standar. Namun, kondisi tersebut masih sesuai dengan kondisi normal yang sesuai dengan *grid code* Indonesia, meskipun hasilnya tidak jauh lebih baik daripada sistem menggunakan SFCL ketika diberi gangguan.

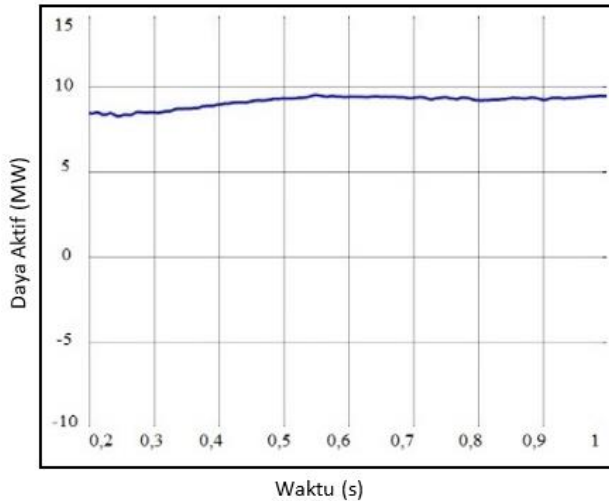
Gbr. 10 menunjukkan nilai daya aktif pada sistem pembangkit tenaga angin berbasis DFIG yang diberi gangguan pada detik ke 0,5-0,7 dengan menggunakan SFCL tipe *bridge*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai daya aktif yang diberi gangguan menggunakan SFCL adalah 9 MW. Nilai tersebut

sesuai dengan kapasitas sistemnya, yaitu 9 MW. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang diberi gangguan pada detik ke 0,5-0,7 dengan menggunakan SFCL tidak mengalami perubahan kapasitas daya aktif yang dihasilkan sebelum diberikannya gangguan. Dengan kata lain, SFCL tipe *bridge* mampu melewati gangguan dengan baik karena dengan SFCL tipe *bridge*, sistem tidak akan mengalami arus puncak sehingga nilai daya aktif tetap berada pada nilai kapasitas sistem tersebut. Hal ini juga sesuai dengan nilai tegangan yang dihasilkan ketika terjadi gangguan oleh sistem yang menggunakan SFCL. Nilai tegangan tetap pada kondisi nilai awal atau normal, sehingga nilai daya aktifnya juga tetap berada pada nilai yang sesuai dengan kapasitasnya.

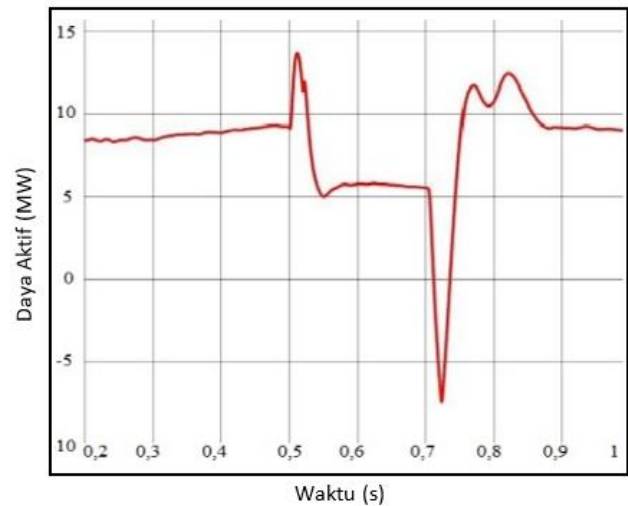
Gbr. 11 menunjukkan nilai daya aktif pada sistem ketika diberi gangguan pada detik ke 0,5-0,7 tanpa menggunakan SFCL tipe *bridge*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai daya aktif adalah 6 MW, dengan nilai kapasitas sistem sebelum gangguan sebesar 9 MW. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi

TABEL II
TRANSIENT STABILITY IMPROVEMENT DARI TIGA SKENARIO

No.	Skenario	Tegangan (V)	TSI	Frekuensi (Hz)	TSI	Daya Aktif (MW)	TSI
1	Gangguan 3 fase	Dengan SFCL	219	1,84	50,00	1,005	9
		Tanpa SFCL	117				5
2	Gangguan 2 fase	Dengan SFCL	219	1,22	50,00	1,003	9
		Tanpa SFCL	180				7
3	Gangguan 1 fase	Dengan SFCL	219	1,03	50,00	1,003	9
		Tanpa SFCL	212				9



Gbr. 10 Nilai daya aktif dengan menggunakan SFCL tipe *bridge*.



Gbr. 11 Nilai daya aktif tanpa menggunakan SFCL tipe *bridge*.

penurunan secara signifikan kapasitas daya aktif yang dihasilkan sebelum dan sesudah diberikannya gangguan, dibandingkan dengan sistem yang menggunakan SFCL. Hal ini terjadi karena sistem tanpa SFCL tipe *bridge* akan mengalami arus puncak ketika terjadi gangguan dan sistem mengalami *drop* tegangan, sehingga nilai daya aktif juga menjadi turun dari nilai kapasitas sistem.

Tabel II menyajikan hasil perhitungan rasio *transient stability improvement* (TSI) yang dihitung dengan melakukan perbandingan antara transien *improvement* dengan transien tanpa SFCL. Pada tabel tersebut juga ditampilkan beberapa nilai tegangan, frekuensi, dan daya aktif yang diuji dengan tiga skenario, yaitu skenario gangguan tiga fase, gangguan dua fase, dan gangguan satu fase. Jika dilihat dari tabel tersebut, sistem dengan SFCL tipe *bridge* memberikan hasil lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa SFCL.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian sistem tenaga angin berbasis DFIG berkapasitas 9 MW. Sistem ini diberi gangguan yang menyebabkan ketidakstabilan sistem sehingga mengakibatkan adanya penurunan stabilitas transien. Untuk mengatasi penurunan stabilitas transien tersebut, digunakan SFCL tipe *bridge*.

Sistem mengalami gangguan pada detik ke 0,5-0,7. Gangguan tersebut diuji dengan dua keadaan. Keadaan yang pertama adalah sistem menggunakan SFCL tipe *bridge*, sedangkan keadaan yang kedua adalah sistem tidak

menggunakan SFCL tipe *bridge*. Dari pengujian tersebut diperoleh hasil bahwa sistem yang menggunakan SFCL tipe *bridge* dapat melewati gangguan karena arus dibatasi oleh SFCL sehingga tidak menyebabkan penurunan stabilitas transien.

Pada keadaan pengujian yang menggunakan SFCL tipe *bridge* diperoleh nilai tegangan dan frekuensi yang tidak keluar dari standar stabilitas *grid code* Indonesia. Di sisi lain, pada keadaan tanpa SFCL tipe *bridge*, diperoleh nilai tegangan yang tidak memenuhi standar *grid code* Indonesia, tetapi dengan nilai frekuensi masih sesuai standar *grid code* Indonesia, meskipun terjadi fluktuasi. Maka, disimpulkan bahwa ketika sistem menggunakan SFCL tipe *bridge*, sistem dapat mengendalikan stabilitas transien dengan baik.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penyusunan penelitian dengan judul “Peningkatan Stabilitas Transien pada Turbin Angin Berbasis DFIG Menggunakan SFCL tipe *Bridge*” ini..

KONTRIBUSI PENULIS

Tema penelitian, Doane Puri Mustika dan Sasongko Pramono Hadi; perangkat lunak, Doane Puri Mustika; analisis formal, Doane Puri Mustika, Sasongko Pramono Hadi, dan Mokh Isnaeni B; penyiapan data parameter, Doane Puri Mustika dan Mohd Brado Frasetyo; penulisan—penyusunan draf asli, Doane Puri Mustika; penulisan—peninjauan dan

penyuntingan, Doane Puri Mustika, Sasongko Pramono Hadi, dan Tumiran; pemrograman, Doane Puri Mustika, Sasongko Pramono Hadi, dan Mohd Brado Frasetyo; pengawasan, Doane Puri Mustika, Sasongko Pramono Hadi, Mokh Isaeni B, dan Tumiran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih untuk semua orang yang terlibat dalam penyusunan penelitian ini. Kepada orangtua dan keluarga yang selalu memberikan semangat dan dorongan dalam penyusunan penelitian ini, kepada dosen pembimbing 1 Bapak Sasongko, pembimbing 2 Bapak Isaeni yang selalu memberikan arahan-arahan serta saran dalam penyusunan penelitian ini, teman-teman diskusi yang selalu memberikan masukan dan semangat dalam penyusunan penelitian ini, dan tim DTETI Universitas Gadjah Mada yang memberikan bantuan dalam hal akademik untuk penyelesaian penelitian ini.

REFERENSI

- [1] F. Ueckerdt, dkk., "Potential and Risks of Hydrogen-Based E-Fuels in Climate Change Mitigation," *Nature Clim. Change*, Vol. 11, No. 5, hal. 384–393, Mei 2021.
- [2] B.D. Patterson, dkk., "Renewable CO₂ Recycling and Synthetic Fuel Production in a Marine Environment," *Proc. Nat. Acad. Sci.*, Vol. 116, No. 25, hal. 12212–12219, Jun. 2019.
- [3] K.H. El-Torky, T. Ottief, M. Elsohghier, dan Y.M. Abdelaal (2019) "Air Pollution, Its Consequences and Solving It," [Online], https://www.researchgate.net/profile/KareemHamdyElTorky/publication/344353036_AIR_POLLUTION_ITS_CONSEQUENCES_AND_SOLVING_IT/links/5f6b67e8a6f6dc0086362c26/AIRPOLLUTIONITSCONSEQUENCES-AND-SOLVING-IT.pdf. tanggal akses: 13-Jun-2022.
- [4] Y. Khadka, "Carbon Compounds: Pollution Aspects," *Patan Pragma*, Vol. 6, No. 1, hal. 127–135, Des. 2020.
- [5] (2015) "The Paris Agreement | UNFCCC," [Online], <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>, tanggal akses: 14-Jun-2022.
- [6] (2019) "Rancangan Undang-Undang tentang Energi Baru dan Terbarukan," [Online], <https://berkas.dpr.go.id/pusatpuu/draft-ruu/public-file/draft-ruu-public-19.pdf>, tanggal akses: 14-Jun-2022.
- [7] A.K. Karmaker, dkk., "Exploration and Corrective Measures of Greenhouse Gas Emission from Fossil Fuel Power Stations for Bangladesh," *J. Clean. Prod.*, Vol. 244, hal. 1–11, Sep. 2019.
- [8] S.A. Vargas, dkk., "Wind Power Generation: A Review and a Research Agenda," *J. Clean. Prod.*, Vol. 218, hal. 850–870, Mei 2019.
- [9] A. Fernández-Guillamón, E. Gómez-Lázaro, E. Muljadi, dan Á. Molina-García, "Power Systems with High Renewable Energy Sources: A Review of Inertia and Frequency Control Strategies Over Time," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 115, hal. 1–12, Nov. 2019.
- [10] B.M.S. Hodge, dkk., "Addressing Technical Challenges in 100% Variable Inverter-Based Renewable Energy Power Systems," *Wiley Interdiscip. Rev. Energy, Environ.*, Vol. 9, No. 5, hal. 1–19, Sep./Okt. 2020.
- [11] S.I. Sharif, M.A.R. Anik, M. Al-Amin, dan M.A.B. Siddique, "The Prospect of Renewable Energy Resources in Bangladesh: A Study to Achieve the National Power Demand," *Energy, Pow.*, Vol. 8, No. 1, hal. 1–6, Agu. 2018.
- [12] M. Satir, F. Murphy, dan K. McDonnell, "Feasibility Study of an Offshore Wind Farm in the Aegean Sea, Turkey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 81, hal. 2552–2562, Jan. 2018.
- [13] J.G. Rueda-Bayona, dkk., "Renewables Energies in Colombia and the Opportunity for the Offshore Wind Technology," *J. Clean. Prod.*, Vol. 220, hal. 529–543, Mei 2019.
- [14] O. Zamzoum, dkk., "Power Control Of Variable Speed Wind Turbine Based on Doubly Fed Induction Generator Using Indirect Field-Oriented Control with Fuzzy Logic Controllers For Performance Optimization," *Energy Sci., Eng.*, Vol. 6, No. 5, hal. 408–423, Okt. 2018.
- [15] A.F. Shehu, A.S. Abubakar, S. Musayyibi, dan K. Idris, "Doubly Fed Induction Generator Based Wind Energy Conversion System: A Review," *J. Sci. Technol., Educ.*, Vol. 7, No. 3, hal. 145–150, Agu. 2019.
- [16] F. Mazouz, S. Belkacem, dan C. Ilhami "DPC-SVM of DFIG Using Fuzzy Second Order Sliding Mode Approach," *Int. J. Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, hal.174–182, Des. 2021.
- [17] D.A. Kez, dkk., "A Critical Evaluation of Grid Stability and Codes, Energy Storage and Smart Loads in Power Systems with Wind Generation," *Energy*, Vol. 205, hal. 1–14, Agu. 2020.
- [18] N.Y. Abed, M.M. Kabhsa, dan G.M. Abdlsalam, "Low Voltage Ride-Through Protection Techniques For DFIG Wind Generation," *2013 IEEE Power, Energy Soc. Gen. Meeting*, 2013, hal. 1–6.
- [19] E. Metin, Ö. Karagülle, K. Kamişli, dan E. Çam, "The Importance of Energy Quality in Medical Devices and Evaluation of Measurements Made in Kırıkkale University Medical Faculty MRI Device within the Scope of TS EN 50160," *Int. J. Eng. Res., Dev.*, Vol. 12, No. 2, hal. 700–710, Jun. 2020.
- [20] M.R. Islam, dkk., "Neuro Fuzzy Logic Controlled Parallel Resonance Type Fault Current Limiter to Improve the Fault Ride Through Capability of DFIG Based Wind Farm," *IEEE Access*, Vol. 8, hal. 115314–115334, Jun. 2020.
- [21] K. Peddakapu, dkk., "Design and Simulation of Resistive Type SFCL in Multi-Area Power System for Enhancing the Transient Stability," *Phys. C Supercond. Its Appl.*, Vol. 573, hal. 1–11, Jun. 2020.
- [22] B. Hossain, H. Rahman, dan R.I. Sheikh, "Transient Stability Analysis of a DFIG-Based Wind Turbine Using Three Level NPC Converter," *2018 Int. Conf. Comput. Commun. Chem. Mater., Electron. Eng. (IC4ME2)*, 2018, hal. 1–4.
- [23] S. Romphochai dan K. Hongesombut, "Effect of Low Voltage Ride-Through Capability of Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbines for Transient Stability of Small Power Producer," *2018 5th Int. Conf. Elect. Power, Energy Convers. Syst. (EPECS)*, 2018, hal. 1–6.
- [24] A.R.A. Jerin, P. Kaliannan, U. Subramaniam, dan M.S. El Moursi, "Review on FRT Solutions for Improving Transient Stability in DFIG-WTs," *IET Renew. Power Gener.*, Vol. 12, No. 15, hal. 1786–1799, Okt. 2018.
- [25] X.-Y. Xiao, dkk., "Enhancing Fault Ride-Through Capability of DFIG with Modified SMES-FCL and RSC Control," *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, Vol. 12, No. 1, hal. 258–266, Jan. 2018.
- [26] T. Lehtola dan A. Zahedi, "Solar Energy and Wind Power Supply Supported by Storage Technology: A Review," *Sustain. Energy Technol., Assess.*, Vol. 35, hal. 25–31, Okt. 2019.
- [27] P.A. Østergaard, dkk., "Sustainable Development Using Renewable Energy Technology," *Renew. Energy*, Vol. 146, hal. 2430–2437, Feb. 2020.
- [28] F. Porté-Agel, M. Bastankhah, dan S. Shamsoddin, "Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review," *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 174, No. 1, hal. 1–59, Jan. 2020.
- [29] K. Makhoba dan D. Dorrell, "Consideration of the Effects of Symmetrical and Asymmetrical Voltage Dips in the Control and Operation of a Grid-Connected Doubly-Fed Induction Generator," Tesis, University of KwaZulu-Natal, KwaZulu-Natal, South Africa, 2020.
- [30] M.A. Shobug dan M.R.I. Sheikh, "Fault Management in DFIG Based Wind Turbine Using Sophisticated Advanced Solid State Fault Current Limiter," *2020 IEEE Reg. 10 Symp. (TENSYMP)*, 2020, hal. 1660-1663.