

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai hubungan antara kecepatan rotor dan stabilitas frekuensi pada turbin angin dengan generator sinkron magnet permanen (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) telah banyak dilakukan dalam beberapa tahun terakhir. Beragam studi menunjukkan bahwa kecepatan rotor memegang peranan penting dalam menentukan kemampuan sistem pembangkit untuk merespons perubahan beban atau gangguan frekuensi pada jaringan listrik.

Penelitiannya berjudul *Assessment of System Frequency Support Effect of PMSG-WTG Using Torque-Limit Based Inertial Control* menyoroti pengaruh perubahan kecepatan rotor terhadap kemampuan sistem dalam mendukung stabilitas frekuensi jaringan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa energi kinetik yang tersimpan dalam rotor dapat dimanfaatkan untuk mendukung sistem ketika terjadi gangguan frekuensi. Semakin besar energi kinetik yang dilepaskan melalui penurunan kecepatan rotor yang terkontrol, semakin baik kemampuan sistem dalam menahan penurunan frekuensi. Dengan demikian, dinamika kecepatan rotor memiliki hubungan langsung dengan kualitas dukungan frekuensi sistem.[6]

Penelitian berjudul *Adaptive Frequency Control Strategy for PMSG-based Wind Power Plants* mengembangkan strategi kontrol frekuensi adaptif yang secara cerdas memanfaatkan energi kinetik rotor sebagai cadangan daya. Studi ini menunjukkan bahwa besarnya cadangan energi yang dapat dimanfaatkan sangat bergantung pada kecepatan rotor saat itu. Artinya, kecepatan turbin menjadi parameter kunci dalam pengendalian frekuensi adaptif, karena menentukan berapa banyak energi yang dapat disalurkan ke jaringan tanpa mengganggu kestabilan mekanik sistem.[7]

Penelitian *Voltage and Frequency Control of a Stand-alone WECS Based on PMSG* meneliti sistem turbin angin PMSG yang beroperasi secara mandiri (stand-alone), tanpa terhubung ke jaringan listrik. Hasilnya menunjukkan bahwa tanpa sistem pengaturan inverter, frekuensi keluaran generator akan langsung mengikuti perubahan kecepatan rotor. Hal ini menyebabkan fluktuasi frekuensi yang signifikan seiring dengan perubahan kecepatan angin. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, digunakan kontrol

inverter berbasis Proportional-Integral (PI) yang berfungsi menstabilkan tegangan dan frekuensi keluaran, memastikan kualitas daya tetap terjaga.[8]

Dalam tesisnya yang berjudul *Dynamic Modelling and Control of PMSG-Based Wind Turbines* menyusun model dinamis lengkap dari sistem turbin angin berbasis PMSG. Ia menjelaskan hubungan matematis antara kecepatan rotor dan frekuensi stator melalui persamaan sinkronisasi yang menunjukkan bahwa frekuensi listrik yang dihasilkan sebanding dengan kecepatan mekanik rotor. Hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa pada sistem tanpa konverter, perubahan kecepatan rotor akan langsung mempengaruhi frekuensi keluaran. Namun, dengan adanya konverter, frekuensi dapat dipertahankan konstan meskipun terjadi variasi kecepatan rotor, sehingga kestabilan sistem tetap terjaga.[9]

Penelitian dengan judul *A General Dynamic State Estimation Framework for Monitoring and Control of Permanent Magnetic Synchronous Generators- Based Wind Turbines* juga memperkuat temuan tersebut. Mereka menganalisis performa turbin PMSG yang terhubung ke jaringan (grid-connected) dan menemukan bahwa meskipun kecepatan rotor bervariasi akibat perubahan kecepatan angin, frekuensi keluaran tetap konstan karena dikendalikan oleh konverter yang mengikuti frekuensi grid. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan fundamental antara sistem stand-alone dan sistem grid-connected, di mana pada sistem terhubung jaringan, kontrol konverter berperan menjaga sinkronisasi dengan frekuensi grid.[10]

Secara keseluruhan, berbagai penelitian tersebut menegaskan bahwa kecepatan rotor memiliki peran sentral dalam kestabilan frekuensi sistem PMSG. Sistem kontrol, baik dalam bentuk kontrol inersia maupun kontrol adaptif, dirancang untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi kinetik rotor agar dapat mendukung kestabilan sistem, baik dalam kondisi terhubung jaringan maupun beroperasi secara mandiri.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Energi angin

Energi angin adalah energi kinetik massa udara yang dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui turbin angin. Daya angin yang tersedia berbanding pangkat-tiga terhadap kecepatan angin, sehingga perubahan kecil pada kecepatan angin menghasilkan perubahan besar pada potensi daya. Variabilitas angin umumnya dimodelkan secara statistik (mis. distribusi Weibull) untuk mengestimasi peluang kecepatan dan densitas daya

di suatu lokasi. Pendekatan ini lazim dipakai pada kajian potensi angin di Indonesia, misalnya untuk Pulau Jawa.

Sumber daya (resource) dipengaruhi oleh kondisi orografis (kontur pegunungan/pesisir), rugositas permukaan, dan dinamika monsun. Di wilayah Indonesia yang beriklim tropis-maritim, angin cenderung rendah–menengah dan sangat dipengaruhi musim (timur–barat), sehingga pemetaan statistik (Weibull/Rayleigh) plus data reanalisis/observasi BMKG sering digunakan sebelum perancangan sistem. Kajian-kajian domestik terkini memakai data observasi dan/atau reanalisis untuk menduga parameter bentuk k dan skala c Weibull sebagai dasar estimasi energi.

Potensi daya yang mengenai rotor dapat dituliskan sebagai

$$P_{\text{angin}} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan ρ kerapatan udara, A luas sapuan rotor, dan V kecepatan angin. Daya listrik keluaran turbin $\approx C_p \eta_{\text{mek}} \eta_{\text{elek}} \times P_{\text{angin}}$, di mana C_p adalah koefisien daya turbin ($<$ batas Betz). Formula ini menjadi acuan umum dalam studi potensi dan telah diaplikasikan pada penelitian-penelitian pemetaan potensi angin Indonesia [11]

Secara umum, Indonesia memiliki potensi energi angin dengan kategori rendah hingga menengah, namun disertai sejumlah lokasi prospektif yang tersebar di wilayah pesisir selatan Jawa, Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Selatan, Kalimantan Barat, serta beberapa titik di Kalimantan Utara. Kondisi geografis tersebut menunjukkan bahwa meskipun potensi angin tidak merata, terdapat kantong-kantong daerah dengan kecepatan angin yang cukup untuk dimanfaatkan secara ekonomis. Kajian literatur nasional tahun 2024 menegaskan bahwa peluang pengembangan energi baru terbarukan (EBT), termasuk energi angin, masih terbuka lebar di Indonesia, namun di sisi lain menghadapi tantangan berupa kebutuhan akan kebijakan yang konsisten, dukungan infrastruktur, serta peningkatan investasi untuk mewujudkan pemanfaatan energi angin yang optimal dan berkelanjutan.[12]

2.2.2. Turbin Angin

Turbin angin merupakan perangkat mekanik yang berfungsi mengubah energi kinetik dari aliran angin menjadi energi listrik melalui proses konversi energi mekanik putar pada rotor yang dihubungkan ke generator. Prinsip kerjanya didasarkan pada pergerakan udara yang melewati bilah turbin sehingga menciptakan gaya angkat dan gaya dorong yang

menyebabkan rotor berputar. Sebagai teknologi konversi energi terbarukan, turbin angin berperan penting dalam menghasilkan listrik yang bersih dan ramah lingkungan serta menjadi solusi strategis untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, terutama di Indonesia yang memiliki potensi besar karena kondisi anginnya yang stabil dan wilayahnya yang luas sebagai negara kepulauan.[13]



Gambar 2. 1 Wind Turbin

Secara umum, prinsip kerja turbin angin didasarkan pada pemanfaatan energi gerak dari aliran udara untuk menghasilkan energi mekanik yang kemudian diubah menjadi energi listrik. Ketika angin bertiup dan melewati area sapuan rotor dengan luas tertentu, udara yang memiliki massa jenis ρ dan kecepatan V membawa energi yang dapat dimanfaatkan oleh sistem turbin. Energi ini digunakan untuk memutar rotor, yang kemudian dihubungkan dengan generator untuk menghasilkan energi listrik.

Secara matematis, besarnya daya yang dibawa oleh angin dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{angin} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \dots \dots \dots (2.2)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa daya angin (P_{angin}) berbanding lurus dengan kerapatan udara (ρ), luas area sapuan rotor (A), dan pangkat tiga dari kecepatan angin (V^3). Dengan demikian, semakin tinggi kecepatan angin dan semakin besar diameter rotor, maka semakin besar pula potensi daya yang dapat dihasilkan oleh turbin.

Meskipun demikian, tidak semua energi kinetik dari angin dapat dikonversi menjadi energi mekanik. Sebagian energi harus tetap tersisa agar udara dapat terus bergerak melewati bilah turbin. Menurut Hukum Betz, yang dikemukakan oleh Albert Betz pada tahun 1919, turbin angin hanya mampu memanfaatkan maksimal sekitar 59,3% dari energi angin yang tersedia. Nilai ini dikenal sebagai batas Betz dan menjadi acuan utama dalam perancangan turbin angin modern.

Oleh karena itu, dalam proses perancangan turbin angin, diperlukan perhatian terhadap berbagai faktor yang memengaruhi efisiensi konversi energi, seperti kecepatan dan arah angin di lokasi pemasangan, desain rotor, bentuk bilah, serta jenis generator yang digunakan. Dengan mempertimbangan aspek-aspek tersebut, turbin angin dapat beroperasi secara optimal dan menghasilkan energi listrik secara efisien pada berbagai kondisi kecepatan angin.[14]

2.2.3. Permanent magnet synchronous generator (PMSG)

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) merupakan jenis generator sinkron di mana medan eksitasinya dihasilkan oleh magnet permanen, bukan oleh kumparan medan yang dialiri arus listrik sebagaimana pada generator sinkron konvensional. Medan magnet permanen tersebut menghasilkan fluks magnetik tetap yang berfungsi untuk menginduksi tegangan listrik pada kumparan stator ketika rotor berputar. Karena tidak memerlukan arus eksitasi eksternal, PMSG memiliki rugi-rugi eksitasi yang sangat kecil, sehingga tingkat efisiensinya lebih tinggi dibandingkan generator biasa. Karakteristik ini membuat PMSG sangat cocok digunakan pada berbagai sistem pembangkit energi terbarukan, seperti pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pembangkit listrik tenaga angin (PLTB), maupun pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Selain efisiensinya yang tinggi, PMSG juga memiliki keunggulan dalam hal struktur yang sederhana, keandalan tinggi, serta kemampuan beroperasi pada kecepatan variabel, menjadikannya salah satu teknologi generator yang paling banyak diteliti dan diterapkan dalam sistem energi bersih modern. [15]

Generator sinkron magnet permanen (PMSG) bekerja berdasarkan prinsip yang sama dengan generator sinkron konvensional, namun perbedaannya terletak pada sumber medan magnetnya. Pada PMSG, medan magnet dihasilkan oleh magnet permanen yang terpasang pada rotor, menggantikan kumparan medan yang biasa diberi arus listrik. Ketika rotor berputar dengan kecepatan tertentu, fluks magnet dari magnet permanen akan berubah terhadap waktu dan memotong kumparan stator. Perubahan fluks

magnet ini menyebabkan timbulnya gaya gerak listrik (GGL) atau tegangan induksi pada kumparan stator sesuai dengan Hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik, yang secara matematis dapat dituliskan sebagai:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \dots \dots \dots (2.3)$$

di mana:

e = Tegangan induksi (Volt)

N = Jumlah lilitan kumparan

$\frac{d\phi}{dt}$ = Laju perubahan fluks magnet terhadap waktu

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa besar tegangan yang dihasilkan bergantung pada jumlah lilitan kumparan serta seberapa cepat perubahan fluks magnet yang terjadi. Semakin tinggi kecepatan putaran rotor atau semakin besar medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen, maka semakin besar pula tegangan induksi yang timbul pada stator. Dengan prinsip ini, PMSG mampu menghasilkan energi listrik secara efisien tanpa memerlukan sistem eksitasi eksternal, sehingga banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin dan sistem energi terbarukan lainnya.[16]

2.2.4. Hubungan Kecepatan Turbin dan Frekuensi Keluaran

Pada mesin sinkron, termasuk Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), kecepatan medan putar stator atau kecepatan sinkron n_s (dalam rpm) memiliki hubungan langsung dengan frekuensi listrik f (dalam Hz) dan jumlah kutub magnet P pada mesin. Hubungan ini dinyatakan dengan persamaan:

$$n_s = \frac{120f}{P} \leftrightarrow f = \frac{Pn_s}{120} \dots \dots \dots (2.4)$$

di mana:

n_s = Kecepatan sinkron (RPM)

f = Frekuensi listrik (Hz)

P = Jumlah kutub magnet pada PMSG

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi listrik akan berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan medan putar, sedangkan penambahan jumlah kutub akan menurunkan kecepatan sinkron. Hubungan matematis ini secara luas digunakan dalam literatur teknik elektro modern di Indonesia untuk menjelaskan keterkaitan antara kecepatan dan frekuensi pada mesin arus bolak-balik (AC), serta menjadi dasar dalam analisis dan perancangan mesin sinkron agar diperoleh performa operasi yang stabil dan efisien.[17]

Pada Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), frekuensi keluaran listrik berbanding lurus dengan kecepatan putar rotor, sesuai persamaan dasar $f = \frac{P \times n}{120}$, di mana f adalah frekuensi (Hz), P jumlah kutub, dan n kecepatan rotor (rpm). Semakin cepat rotor berputar, semakin tinggi pula frekuensi listrik yang dihasilkan. Dalam sistem turbin angin, kondisi ini menyebabkan frekuensi keluaran ikut berubah seiring dengan variasi kecepatan angin. karena kecepatan rotor sangat dipengaruhi oleh kekuatan hembusan angin. Kestabilan kecepatan medan magnet menjadi kunci dalam menjaga kestabilan frekuensi listrik, sehingga pengendalian kecepatan rotor diperlukan agar frekuensi keluaran tetap konstan, terutama pada sistem turbin angin yang beroperasi dengan kecepatan variabel.[18]

2.2.5. Teori Konverter AC-AC dan Variable Speed Drive (VSD)

Pada generator sinkron magnet permanen (PMSG), frekuensi listrik keluaran f_e berbanding lurus dengan kecepatan mekanik rotor n dan jumlah kutub P :

$$f_c = \frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60} \dots \dots \dots (2.5)$$

di mana:

f_c = Frekuensi keluaran PMSG (Hz)

P = Jumlah kutub magnet

n = Kecepatan putar rotor (RPM)

Artinya, perubahan kecepatan angin yang mengubah putaran turbin langsung memodulasi frekuensi tegangan 3-fasa PMSG. Karena beban/jaringan biasanya memerlukan frekuensi tertentu, diperlukan pengkondisi daya (konverter) untuk mengatur amplitudo dan/atau frekuensi agar sesuai spesifikasi beban atau standar grid. Studi PMSG modern di

Indonesia menegaskan keunggulan PMSG untuk sistem kecepatan variabel dan kebutuhan penyesuaian elektronik daya pada sisi keluaran[19].

Konverter AC–AC Tiga Fasa (Matrix Converter & 3-Phase Controllers)

a) Matrix converter (MC).

MC mewujudkan konversi AC-AC langsung dengan sembilan sakelar bidirectional (3×3) sehingga amplitudo dan frekuensi keluaran dapat diatur tanpa tahap DC link. Keunggulannya: faktor daya input dapat dikendalikan, aliran daya dua arah, serta ukuran lebih ringkas karena tanpa komponen penyimpan energi DC. Implementasi Indirect/Space Vector Modulation (SVM/ISVM) umum dipakai untuk menghasilkan tegangan sinusoidal dengan THD rendah. Publikasi nasional mutakhir menunjukkan MC efektif sebagai drive tiga fasa dan dapat menurunkan frekuensi dari 50 Hz sesuai kebutuhan aplikasi kecepatan variabel[20].

b) Pengatur tegangan 3-fasa berbasis thyristor/TRIAC.

Untuk soft-starting dan pengaturan torsi awal motor 3-fasa, konverter AC–AC 3-fasa dengan kontrol sudut fasa menurunkan tegangan efektif pada frekuensi dasar (50 Hz). Studi terkini menunjukkan rancangan dengan jangkauan 0–220 VAC, dikendalikan mikrokontroler (mis. Arduino), menghasilkan bentuk gelombang sesuai sudut penyalan yang diatur—berguna sebagai tahap pra-ramp sebelum pengaturan frekuensi lebih lanjut[21].

Variable Speed Drive (VSD)

VSD—sering disebut Variable Frequency Drive (VFD)—mengatur kecepatan motor AC dengan mengubah frekuensi dan tegangan suplai melalui pensaklaran berkecepatan tinggi (PWM). Skema kendali populer: V/f konstan (skalar), Vector Control/FOC, dan Direct Torque Control (DTC). VSD memberi start-up halus, efisiensi energi lebih baik, dan fleksibilitas pengaturan proses industri; riset lokal menekankan penghematan energi dan opsi kendali (V/f, DTC) dalam implementasi praktis[22].

c) Konverter AC – AC Back to Back

Back-to-back converter merupakan sistem konversi daya yang tersusun dari dua buah voltage source converter (VSC) yang dihubungkan melalui satu DC-link bersama, sehingga VSC pada kedua sisi dapat mengatur keluaran daya aktif maupun daya reaktif dan menjadikan konverter tipe ini memiliki kinerja dinamik serta statik yang baik pada sistem tenaga tiga fasa modern. Dalam penerapannya, tidak semua beban pasif yang disuplai adalah tiga fasa simetris, sehingga ketika back-to-back converter digunakan untuk menyuplai beban tak seimbang, strategi kontrol yang lazim dipakai dapat menyebabkan tegangan keluaran tiga fasa menjadi tidak seimbang. Secara umum, konfigurasi kendali yang digunakan pada sistem ini membentuk double closed-loop, yaitu inner loop pengendali arus dengan transformasi d-q yang didekupling, kemudian di luar itu terdapat pengendali tegangan DC konstan pada sisi rectifier serta pengendali tegangan AC konstan pada sisi inverter, yang bersama-sama bertugas menjaga kestabilan tegangan DC-link dan kualitas tegangan AC tiga fasa pada sisi keluaran. Dengan susunan ini, back-to-back converter dapat diintegrasikan sebagai antarmuka AC/DC/AC yang andal antara sumber dan beban tiga fasa, sekaligus menjadi dasar pengembangan strategi kendali lanjutan untuk mengatasi masalah ketidakseimbangan tegangan dan arus pada jaringan dengan beban tak simetris. Pada penelitian ini, prinsip rectifier-DC link-inverter tersebut diterapkan melalui rectifier thyristor pada sisi generator dan inverter IGBT pada sisi keluaran, sehingga frekuensi keluaran dapat dipertahankan mendekati 50 Hz meskipun kecepatan putar PMSG berubah-ubah akibat variasi kecepatan angin. [23]

2.2.6. Low Pass Filter

Low Pass Filter (LPF) merupakan jenis filter yang meloloskan komponen sinyal dengan frekuensi di bawah frekuensi batas potong (cutoff frequency) dan meredam komponen di atasnya, sehingga banyak digunakan dalam sistem kendali dan pemrosesan sinyal untuk menekan derau (noise) frekuensi tinggi. Respons frekuensi ideal LPF dengan waktu tunda τ dinyatakan sebagai:

$$H_L(f) = K \Pi \left(\frac{f}{2B} \right) e^{-j2\pi f \tau} \dots\dots\dots (2.6)$$

di mana:

$H_L(f)$ = Respons frekuensi LPF

K = Konstanta penguatan

B = Frekuensi batas potong

τ = Waktu tunda

Penundaan waktu pada respons impuls tidak mengubah magnitudo transformasi Fourier, melainkan hanya menimbulkan pergeseran fase yang linear terhadap besarnya waktu tunda. Dalam implementasi pada sistem konverter daya, LPF orde pertama dengan fungsi transfer $H(s) = 1/(s+1)$ dan time constant $\tau = 1$ detik umum digunakan untuk meredam komponen harmonisa akibat pensaklaran (switching) konverter, sehingga sinyal umpan balik yang masuk ke pengendali lebih bersih dan sistem dapat bekerja stabil mendekati nilai referensi yang ditetapkan.[24]