



ANALISIS RESPONS ARUS D-Q UNTUK EVALUASI STABILITAS TRANSIEN GENERATOR SELAMA GANGGUAN JARINGAN

d-q Current Response Analysis for Generator Transient Stability Evaluation during Grid Disturbances

Nurul Chairunnisa Noor

Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie

Email: nurulnoor@ith.ac.id

Abstract

The integration of wind power plants into Indonesia's electrical grid requires a high level of operational reliability, particularly during network disturbances that trigger temporary voltage dips. Low Voltage Ride Through (LVRT) conditions pose a major challenge, as they can induce transient instability in the generator and potentially lead to turbine disconnection from the grid. This study aims to evaluate the transient stability of a wind turbine generator during grid disturbances by analyzing the current response in the d and q axes, which serves as a key dynamic indicator within the wind energy conversion system. To enhance the turbine's ability to remain connected during LVRT events, a STATCOM controlled by a Linear Quadratic Regulator (LQR) is employed to provide rapid and adaptive reactive power compensation. Simulations are conducted to observe the oscillation patterns, damping behavior, and steady-state conditions of both current components following the disturbance. The results demonstrate that the d - q axis currents exhibit well-damped oscillations, return smoothly to steady-state values, and show no signs of divergence. These findings confirm that the LQR-controlled STATCOM significantly improves transient stability, enhances the operational reliability of wind power plants, and supports the safer and more sustainable integration of renewable energy into the electrical grid.

Keywords: Low Voltage Ride Through (LVRT), Linear Quadratic Regulator (LQR), STATCOM, Wind Turbines, Transient Stability, d - q Current

Abstrak

Integrasi pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) ke dalam sistem tenaga Indonesia memerlukan keandalan operasional yang tinggi, terutama ketika terjadi gangguan jaringan yang menyebabkan penurunan tegangan sesaat. Gangguan Low Voltage Ride Through (LVRT) merupakan salah satu tantangan utama karena dapat memicu ketidakstabilan transien pada generator dan meningkatkan risiko pemutusan turbin angin dari jaringan listrik. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi stabilitas transien generator selama gangguan jaringan melalui analisis respons arus pada sumbu d dan q , yang menjadi indikator dinamis utama dalam sistem konversi energi angin. Untuk meningkatkan kemampuan PLTB dalam mempertahankan koneksi selama LVRT, digunakan STATCOM yang dikendalikan dengan algoritma Linear Quadratic Regulator (LQR) sebagai penyedia kompensasi daya reaktif secara cepat dan adaptif. Simulasi dilakukan untuk mengamati pola osilasi, proses redaman, serta kondisi tunak komponen arus d - q setelah gangguan diberikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa respons arus pada kedua sumbu mengalami redaman osilasi yang stabil, mencapai kondisi tunak tanpa divergensi, serta menunjukkan peningkatan kemampuan pemulihan sistem. Temuan ini menegaskan bahwa penerapan LQR-STATCOM efektif dalam memperkuat stabilitas transien generator,

meningkatkan keandalan operasional PLTB, dan mendukung integrasi energi terbarukan secara lebih aman dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *Low Voltage Ride Through (LVRT), Turbin Angin, STATCOM, Linear Quadratic Regulator (LQR), Stabilitas transien, arus d-q*

PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi terbarukan terus meningkat di Indonesia seiring dengan kebutuhan memperkuat ketahanan energi nasional dan menekan emisi karbon. Di antara berbagai sumber energi baru dan terbarukan, pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) di Provinsi Sulawesi Selatan menempati posisi strategis berkat kondisi geografisnya yang kaya akan potensi angin. Kehadiran PLTB Sidrap dan PLTB Jeneponto menjadi bukti bahwa wilayah ini memiliki sumber daya angin yang konsisten dan dapat diandalkan. Namun, integrasi pembangkit angin ke dalam sistem tenaga nasional masih menghadapi tantangan teknis, terutama terkait stabilitas transien ketika terjadi gangguan tegangan pada jaringan listrik.

Turbin angin tipe doubly-fed induction generator (DFIG), yang banyak digunakan pada PLTB skala besar, dikenal memiliki sensitivitas tinggi terhadap voltage dip dan gangguan sesaat pada jaringan. Kondisi ini dapat memicu ketidakseimbangan torsi elektromagnetik, lonjakan serta distorsi pada arus sumbu-d (d -axis current) dan sumbu-q (q -axis current), serta menurunkan kemampuan Low Voltage Ride Through (LVRT). Respons arus d - q menjadi indikator utama dalam evaluasi stabilitas transien karena menggambarkan dinamika fluks dan aliran daya aktif-reaktif ketika sistem berada di bawah tekanan operasional. Literatur menunjukkan bahwa kegagalan arus d - q untuk kembali ke keadaan tunak dengan cepat sering berujung pada hilangnya sinkronisasi rotor dan pelepasan turbin dari jaringan, terutama pada DFIG yang memiliki kopling elektrik-mekanik kompleks [1], [7], [8].

Sejumlah studi juga menegaskan bahwa karakteristik dinamika d - q berperan langsung dalam menentukan efektivitas metode LVRT, termasuk ketika sistem menggunakan peredam eksternal seperti STATCOM [3] atau strategi kontrol lanjutan seperti LQR dan variannya [2], [6]. Penelitian terbaru dalam konteks PLTB Indonesia turut menunjukkan bahwa kontrol berbasis LQR pada STATCOM dapat meningkatkan kemampuan sistem untuk menstabilkan arus d - q dan meredam osilasi secara lebih cepat selama gangguan [9]. Temuan tersebut memperkuat bahwa analisis mendalam terhadap respons arus d - q bukan hanya relevan secara teoretis, tetapi menjadi fondasi penting dalam memastikan stabilitas transien generator saat terjadi fault pada jaringan.

Sejumlah penelitian global menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif melalui STATCOM mampu memperkuat stabilitas turbin angin selama gangguan jaringan, tetapi efektivitasnya sangat bergantung pada strategi kendali yang digunakan. Celah penelitian yang masih terbuka adalah bagaimana merancang kontrol yang mampu mengendalikan dinamika arus d - q secara optimal sehingga osilasi dapat diredam dan sistem kembali stabil tanpa gejala divergensi. Pendekatan kontrol optimal seperti Linear Quadratic Regulator (LQR) menawarkan potensi untuk mencapai respons dinamis yang lebih cepat dan lebih terkontrol, namun penerapannya pada STATCOM dalam konteks peningkatan LVRT PLTB di Indonesia masih jarang dibahas secara mendalam.

Penelitian ini disusun untuk menjawab kebutuhan tersebut dengan menganalisis respons arus d-q generator DFIG selama gangguan tegangan rendah serta mengevaluasi kontribusi kendali LQR pada STATCOM dalam meningkatkan stabilitas transien. Melalui pemodelan sistem PLTB dan simulasi berbagai skenario gangguan, penelitian ini menilai sejauh mana kombinasi LQR-STATCOM mampu memperbaiki redaman osilasi arus, mempertahankan sinkronisasi generator, dan meningkatkan kemampuan LVRT. Pendekatan ini diharapkan memberikan kontribusi bagi pengembangan metode kendali yang lebih efektif dalam integrasi PLTB ke sistem tenaga Indonesia. Selain itu, penelitian ini memperkuat basis ilmiah bagi peningkatan keandalan operasi PLTB di wilayah berpotensi angin tinggi seperti Sulawesi Selatan, sekaligus mendukung agenda transisi energi bersih nasional.

METODE

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis stabilitas transien generator turbin angin tipe DFIG dengan menitikberatkan pada respons arus d-axis dan q-axis selama terjadinya gangguan jaringan. Pemodelan sistem dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink, yang memungkinkan representasi simultan antara dinamika aerodinamika turbin, konversi energi mekanik-elektrik, serta interaksi generator dengan jaringan.

Tahap pertama adalah membangun model daya mekanik yang dihasilkan rotor. Daya mekanik dihitung berdasarkan hubungan aerodinamika antara kecepatan angin, luas sapuan rotor, rapat massa udara, serta koefisien daya turbin. Secara umum, daya mekanik turbin dapat dinyatakan melalui bentuk matematis:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p (\lambda \beta) v^3$$

Persamaan ini digunakan untuk menangkap perubahan daya input yang memengaruhi dinamika arus d-q ketika gangguan tegangan terjadi. Variasi daya masuk menjadi pemicu utama fluktuasi arus id dan iq yang dianalisis sebagai indikator kestabilan transien. Model DFIG dan konverter kemudian dinyatakan dalam bentuk ruang keadaan (state-space) untuk memudahkan analisis respons arus d-q selama kondisi LVRT. Formulasi state-space memungkinkan parameter kritis seperti arus d-axis, arus q-axis, torsi elektromagnetik, serta tegangan terminal dipantau secara simultan. Untuk meningkatkan stabilitas sistem, dirancang pengendali optimal berbasis Linear Quadratic Regulator (LQR). LQR bekerja dengan meminimalkan fungsi biaya kuadratik:

$$J = \int (x^T Q x + u^T R u) dt$$

Persamaan tersebut menjadi dasar dalam mengamati perubahan daya masuk ke generator saat terjadi gangguan tegangan pada jaringan.

Penyelesaian persamaan Riccati menghasilkan matriks P yang menentukan gain optimal:

$$K = R^{-1} B^T P$$

Gain ini digunakan sebagai umpan balik pada STATCOM, sehingga perangkat tersebut mampu memberikan kompensasi daya reaktif secara adaptif selama gangguan.

STATCOM ditempatkan pada bus yang terhubung dengan turbin angin. Gangguan tegangan rendah dimodelkan sebagai fault sesaat untuk menguji respons

transien. Arus d-axis dan q-axis direkam untuk menilai apakah sistem mampu meredam osilasi, kembali ke kondisi tunak tanpa divergensi, serta mempertahankan sinkronisasi dengan jaringan.

Tahap selanjutnya adalah merancang pengendali optimal berbasis Linear Quadratic Regulator (LQR). Untuk merumuskan pengendali tersebut, sistem dinyatakan ke dalam bentuk ruang keadaan (state-space). LQR meminimalkan fungsi biaya kuadratik yang melibatkan matriks bobot Q untuk keadaan sistem dan matriks R untuk sinyal kendali. Parameter optimal diperoleh melalui penyelesaian persamaan Riccati, yang menghasilkan matriks P. Matriks ini menentukan dinamika sistem terkontrol melalui relasi:

$$u(t) = -Kx(t) = R^{-1}B * Px(t)$$

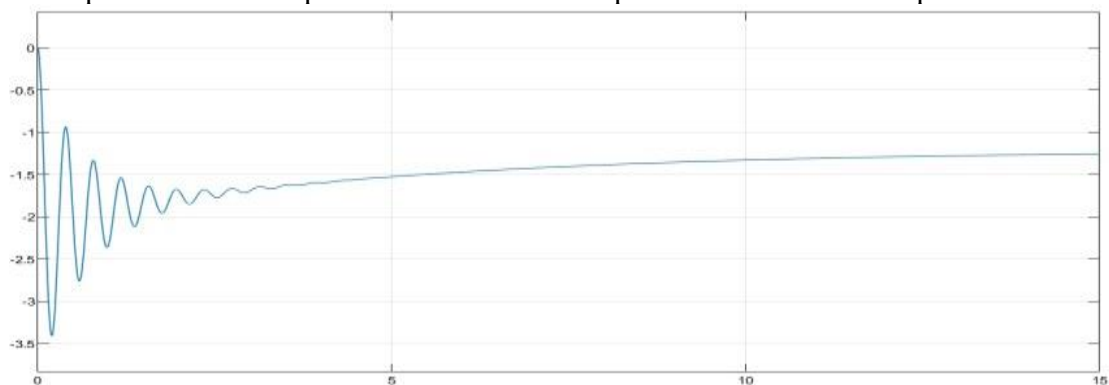
di mana K adalah feedback gain optimal.

Solusi matriks P memiliki peran penting dalam memastikan sistem memenuhi kriteria kestabilan dan optimalitas. Nilai P digunakan untuk memverifikasi apakah osilasi arus dq, torsi elektromagnetik, serta variabel dinamis lainnya kembali menuju kondisi tunak setelah gangguan LVRT diberikan pada model sistem.

Dalam penelitian ini, STATCOM dikendalikan menggunakan sinyal kendali hasil LQR dan diintegrasikan pada bus jaringan yang sama dengan turbin angin. Respon sistem diamati melalui perubahan arus d-axis, q-axis, serta tegangan terminal generator. Seluruh parameter tersebut dievaluasi untuk menilai efektivitas skema kontrol dalam mempertahankan kestabilan turbin angin selama penurunan tegangan.

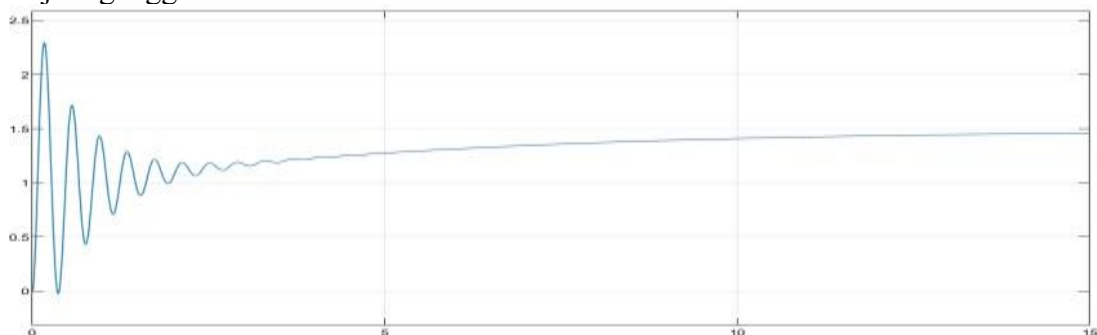
HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi stabilitas sistem dilakukan dengan mengamati respons dinamis arus generator pada kondisi operasi tertentu, terutama ketika terjadi gangguan atau perubahan transien pada jaringan. Salah satu indikator utama dalam penilaian ini adalah perilaku komponen arus pada sumbu d dan sumbu q, yang menggambarkan bagaimana sistem kendali merespons perubahan kondisi tegangan di jaringan. Ketika kedua komponen arus tersebut bergerak menuju keadaan tunak tanpa menunjukkan osilasi berlebih maupun kecenderungan divergen, maka sistem dapat dinyatakan berada dalam kondisi stabil. Grafik yang ditampilkan menggambarkan pola respons arus pada sumbu d dan sumbu q generator, yang digunakan sebagai dasar penilaian kemampuan sistem dalam mempertahankan stabilitas operasional.



Gambar 1. d-axis generator

Gambar 1 memperlihatkan karakteristik respons arus pada sumbu d generator. Pada awal gangguan, terlihat osilasi tajam dengan amplitudo besar sebagai reaksi terhadap peristiwa mendadak, misalnya penurunan tegangan sesaat. Osilasi tersebut secara bertahap mereda dan menunjukkan pola redaman yang stabil hingga mencapai nilai tunak pada wilayah negatif. Fenomena ini menggambarkan proses penyesuaian arus fluks terhadap kondisi operasi baru. Secara fisik, perilaku tersebut mencerminkan mekanisme pengendali dalam menstabilkan fluks magnet rotor melalui pengaturan arus pada sumbu d. Kemampuan sistem untuk meredam osilasi tanpa adanya kecenderungan keluar dari batas kestabilan menjadi bukti bahwa strategi kendali yang diterapkan efektif dalam menjaga kestabilan generator selama terjadi gangguan.



Gambar 2. q-axis generator

Gambar 2 menunjukkan respons arus pada sumbu q generator. Respons awal ditandai dengan overshoot beramplitudo positif yang cukup besar, kemudian bertransisi menuju osilasi teredam dengan frekuensi yang menurun seiring waktu. Sinyal tersebut akhirnya mencapai nilai tunak pada level positif rendah. Secara fisik, pola ini menggambarkan bagaimana sistem kendali bereaksi terhadap perubahan kondisi ketika menghadapi gangguan seperti low voltage ride-through (LVRT). Komponen q-axis berkaitan dengan pengaturan torsi dan daya aktif pada generator. Osilasi awal menunjukkan ketidakseimbangan daya akibat penurunan tegangan yang tiba-tiba, sedangkan pola redaman yang stabil menandakan bahwa mekanisme kendali mampu mengatasi gangguan, menjaga sinkronisasi dengan jaringan, serta mencegah pemutusan dari sistem kelistrikan. Nilai positif pada kondisi tunak mengindikasikan bahwa generator telah berhasil memulihkan torsi atau daya aktif dan kembali beroperasi dalam keadaan stabil.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis, penggunaan metode kendali Linear Quadratic Regulator (LQR) pada STATCOM terbukti mampu meningkatkan kemampuan Low Voltage Ride Through (LVRT) pada turbin angin, khususnya pada PLTB Sidrap. Respon arus pada sumbu d dan sumbu q memang menunjukkan osilasi awal ketika terjadi gangguan tegangan, tetapi sistem dapat meredam getaran tersebut dan kembali stabil tanpa tanda ketidakstabilan. Kondisi ini menegaskan bahwa pengendali yang dirancang mampu menjaga kestabilan rotor serta memastikan generator tetap terhubung ke jaringan selama kondisi gangguan. Dengan demikian, pendekatan ini memberikan solusi yang dapat diandalkan untuk

meningkatkan keandalan operasi pembangkit listrik tenaga angin dan memperkuat integrasi energi terbarukan dalam sistem tenaga nasional.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ravikiran Hiremath, Tukaram Moger. (2019). Comprehensive review on low voltage ride through capability of wind turbine generators.
2. Li, Tenghui & Liu, Xiaolei & Lin, Zi & Yang, Jin & Ioannou, Anastasia. (2024). A linear quadratic regulator with integral action of wind turbine based on aerodynamics forecasting for variable power production. *Renewable Energy*, 223 (C).
3. Bhutto JK. (2025). An adaptive controlled STATCOM and SMES for LVRT augmentation of the renewable integrated AC-microgrid. *Heliyon*.
4. Brooks CR. (1984). *Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys*. New York: ASM.
5. Ntuli, W.K., Kabeya, M., Moloi, K. (2024). Review of Low Voltage Ride-Through Capabilities in Wind Energy Conversion System. *Energies*, 17, 5321.
6. Ahmed Kamel, Ramin Esmzad, Nariman Niknejad, Hamidreza Modares. (2025). Robust adaptive maximum-entropy linear quadratic regulator. *IFAC Journal of Systems and Control*, 32, 100305.
7. El-Saadawi, A. M., El-Shorbagy, E. S. (2023). Improved LVRT Techniques for Grid-Connected DFIG Wind Turbines: A Technical Review.
8. Maamar, K., Melit, M., Boutoubat, A. (2022). Improved control for DFIG based wind power system under voltage dips using ADRC optimized by genetic algorithms.
9. Noor, N.C. (2023). Design of a Control System to Improve Low Voltage Ride Through (LVRT) Capability of Wind Turbines Using STATCOM with Linear Quadratic Regulator (LQR) Control.