

УДК 621.311.24:621.313.33

Математическое моделирование и исследование векторного управления ветроэнергетической системой на основе асинхронного генератора двойного питания**Туйчиев Фуркат Нумонович**

PhD

доц. кафедры Электроснабжение, Ташкентский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: tuychievfn@gmail.com

Рашидов Нурали Хайриддинович

докторант

Ташкентский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Абдухалилов Абдуманнон Гайратжон угли

докторант

Ташкентский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Mathematical modeling and investigation of vector control of a wind energy system based on a doubly fed induction generator**Tuychiev Furqat Numonovich**

PhD, Associate Professor

Department of Electrical Supply, Tashkent State Technical University

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Rashidov Nurali Khayriddinovich

Doctoral Student

Tashkent State Technical University

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Abdukhalilov Abdumannop Gayratjon ugli

Doctoral Student

Tashkent State Technical University

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В работе разработана и исследована математическая модель сетевой ветроэнергетической системы номинальной мощностью 2 МВт на основе асинхронного генератора двойного питания (АГДП) с переменной скоростью вращения. Цель исследования состоит в оценке динамической устойчивости и качества регулирования при ступенчатом изменении скорости ветра. Методика включает совместное моделирование аэродинамической модели турбины, электромагнитной модели АГДП в синхронной системе

Библиографическое описание: Туйчиев Ф.Н., Рашидов Н.Х., Абдухалилов А.Г.У. Математическое моделирование и исследование векторного управления ветроэнергетической системой на основе асинхронного генератора двойного питания // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/23314>

координат dq и двухконтурной векторной системы управления роторным и сетевым преобразователями в MATLAB/Simulink. Исследованы скорость ротора, статорные и роторные токи, активная мощность и электромагнитный момент при изменении скорости ветра от 7 до 12 м/с. При 12 м/с амплитуда статорного тока достигает ± 2440 А, действующее значение - около 1,72 кА, роторного тока ± 805 А. Максимальная активная мощность статора достигает 2 МВт, электромагнитный момент отслеживает заданное значение с небольшими пульсациями. Коэффициент общих гармонических искажений статорного тока составляет 0,87 %. Результаты подтверждают работоспособность разработанной структуры управления и возможность её применения для дальнейшего анализа режимов сетевых ветроэнергетических установок на основе АГДП.

Abstract

A mathematical model of a 2 MW grid-connected wind energy system based on a doubly fed induction generator (DFIG) with variable-speed operation is developed and investigated. The objective is to evaluate dynamic stability and control performance under stepwise wind-speed variations. The methodology combines an aerodynamic wind-turbine model, an electromagnetic DFIG model in a synchronous dq reference frame, and a dual-loop vector-control system for the rotor-side and grid-side converters implemented in MATLAB/Simulink. The transient behavior of rotor speed, stator and rotor currents, active power, and electromagnetic torque is analyzed for wind speeds from 7 to 12 m/s. At 12 m/s, the stator-current amplitude reaches approximately ± 2440 A, corresponding to an RMS value of about 1.72 kA, while the rotor-current amplitude reaches about ± 805 A. The maximum stator active power is approximately 2 MW, and the electromagnetic torque follows its reference with small oscillations. The total harmonic distortion of the stator current is 0.87 %. The results confirm the operability of the proposed control structure and its suitability for further studies of grid-connected DFIG wind energy systems.

Ключевые слова: асинхронный генератор двойного питания, ветровая турбина, ветроэнергетическая система, MATLAB/Simulink, математическое моделирование, векторное управление, роторный преобразователь, сетевой преобразователь.

Keywords: doubly fed induction generator, wind turbine, wind energy system, MATLAB/Simulink, mathematical modeling, vector control, rotor-side converter, grid-side converter.

Введение

Энергия является одним из ключевых факторов технологического и социально-экономического развития. Рост промышленного производства и потребления электроэнергии, а также ограниченность ископаемых ресурсов обуславливают необходимость развития возобновляемой энергетики. Особое значение приобретают ветровая и солнечная энергетика, позволяющие увеличить производство экологически чистой электроэнергии и снизить негативное воздействие на окружающую среду [3, 5, 8].

Ветроэнергетика является одним из наиболее динамично развивающихся направлений возобновляемой энергетики. По данным Глобального совета по ветроэнергетике (GWEC), в 2025 году в мире было введено 165 ГВт новых ветровых мощностей, а суммарная установленная мощность достигла 1299 ГВт [6]. Это подтверждает возрастающую роль ветроэнергетических установок в современной энергетической системе.

Развитие силовой электроники и систем управления способствовало переходу от ветроустановок с постоянной скоростью вращения к системам с регулируемой скоростью. Среди применяемых электрических машин особое место занимает асинхронный генератор двойного питания (АГДП), обеспечивающий регулирование скорости в широком диапазоне при относительно небольшой мощности силового преобразователя [1, 4].

Ветроэнергетическая система на основе АГДП включает ветровую турбину, генератор, роторный и сетевой преобразователи, звено постоянного тока, систему управления и электрическую сеть. Статор генератора непосредственно подключается к сети, а ротор – через двунаправленный преобразователь. Такая структура обеспечивает независимое регулирование активной и реактивной мощностей и позволяет работать как в подсинхронном, так и в сверхсинхронном режимах [7, 9]. Применение преобразователей и алгоритмов МРРТ позволяет изменять скорость вращения генератора в зависимости от скорости ветра, повышая эффективность преобразования энергии и снижая механические нагрузки [10]. Несмотря на значительное количество исследований, актуальной остаётся задача комплексного моделирования аэродинамической и электромеханической частей АГДП с системой векторного управления при изменяющейся скорости ветра.

Целью настоящей работы является разработка математической модели и исследование динамических характеристик ветроэнергетической системы мощностью 2 МВт на основе АГДП с векторным управлением при изменении скорости ветра.

Материалы и методы

Исследуемая система рассматривается как взаимосвязанная электромеханическая структура, в которой аэродинамическая мощность турбины преобразуется в механический момент, передаваемый через механическую передачу на вал АГДП. Статор генератора непосредственно связан с сетью, а ротор – с роторным преобразователем (RSC). Роторный преобразователь и сетевой преобразователь (GSC) объединены общим звеном постоянного тока. В состав модели также включены роторный и сетевой фильтры, МРРТ-контроллер и конденсатор звена постоянного тока. Структурная схема системы приведена на рисунке 1.

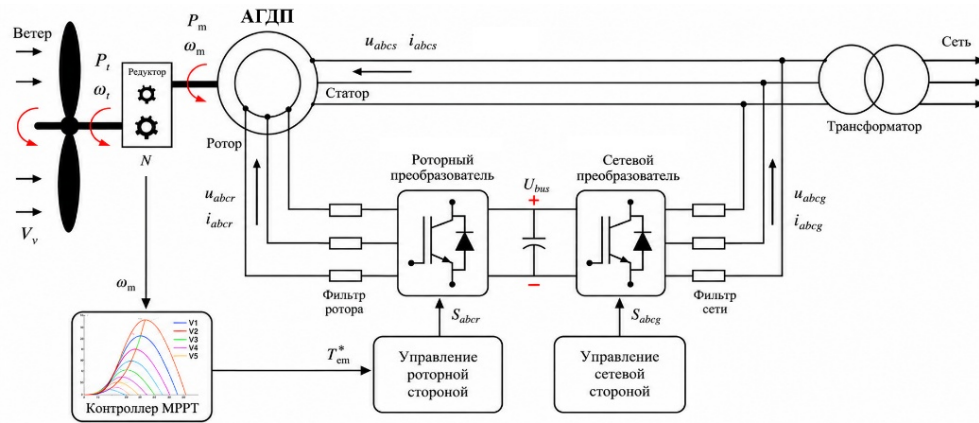


Рисунок 1. Структурная схема ветроэнергетической установки

Модель ветровой турбины

Кинетическая мощность воздушного потока определяется плотностью воздуха, площадью ометания и кубом скорости ветра. Для идеализированного потока она рассчитывается по выражению:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V_v^3 \quad (1)$$

где A -площадь, ометаемая лопастями турбины, м^2 ; ρ -плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; V_v -скорость ветра, $\text{м}/\text{с}$.

Механическая мощность, извлекаемая турбиной, учитывает коэффициент использования энергии ветра:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

где R -радиус ротора турбины, м ; $C_p(\lambda, \beta)$ -коэффициент использования энергии ветра; λ -быстроходность турбины, представляющая собой отношение линейной скорости конца лопасти к скорости ветра; β -угол поворота лопасти:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{\frac{-c_7}{\lambda_i}} \quad (3)$$

Для описания аэродинамической характеристики использована аппроксимация $C_p(\lambda, \beta)$ с коэффициентами $c_1=0,73$; $c_2=151$; $c_3=0,58$; $c_4=0,002$; $c_5=2,4$; $c_6=13,2$; $c_7=18,4$. Для рассматриваемой турбины при $\beta=0^\circ$ максимальный коэффициент мощности составляет $C_{p,\max}=0,44$ и достигается при $\lambda=7,2$.

Быстроходность связывает механическую скорость ротора с аэродинамическим режимом и выступает одним из основных параметров оптимизации отбора мощности:

$$\lambda = \frac{R \omega_t}{V_v} \quad (3)$$

где ω_t -угловая скорость вращения ротора ветровой турбины, рад/с.

Механический момент турбины определяется отношением механической мощности к угловой скорости:

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} \quad (4)$$

Математическая модель ветровой турбины позволяет установить взаимосвязь между скоростью ветра, угловой скоростью вращения, коэффициентом мощности и механическим моментом.

Математическая модель АГДП

В динамической модели АГДП трёхфазные величины статора и ротора преобразуются в синхронную систему координат dq, ориентированную по потокоцеплению статора. Применение преобразований $abc \rightarrow \alpha\beta \rightarrow dq$ уменьшает число независимых переменных и позволяет представить электромагнитные процессы в форме, удобной для синтеза регуляторов. При этом скорость вращения системы координат определяется частотой сети, а относительная частота роторных величин зависит от скольжения генератора:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs}; \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds}; \end{cases} \begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_r \psi_{qr}; \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr}. \end{cases} \quad (5)$$

где $u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}$ -соответственно составляющие напряжений статора и ротора по осям d и q; $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ -соответственно составляющие токов статора и ротора по осям d и q; где $\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi_{dr}, \psi_{qr}$ -соответственно составляющие потокоцеплений статора и ротора по осям d и q. R_s, R_r -фазные сопротивления обмоток статора и ротора; ω_s, ω_r -угловые скорости вращения магнитного поля статора и ротора соответственно.

Потокоцепления определяются через индуктивности рассеяния и взаимную индуктивность:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}; \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}. \end{cases} \begin{cases} \psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr}; \\ \psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr}. \end{cases} \quad (6)$$

где ψ_s, ψ_r -соответственно векторы потокоцепления статора и ротора; ψ_{ds}, ψ_{qs} -составляющие потокоцепления статора по осям dq; ψ_{dr}, ψ_{qr} -составляющие потокоцепления ротора по осям dq; L_s, L_r -соответственно индуктивности рассеяния фазных обмоток статора и ротора; L_m -взаимная индуктивность между статором и ротором; p-число пар полюсов генератора.

Электромагнитный момент генератора определяется следующим выражением:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\psi_{qs} i_{dr} - \psi_{ds} i_{qr}) \quad (7)$$

Активная и реактивная мощности статора определяются уравнениями:

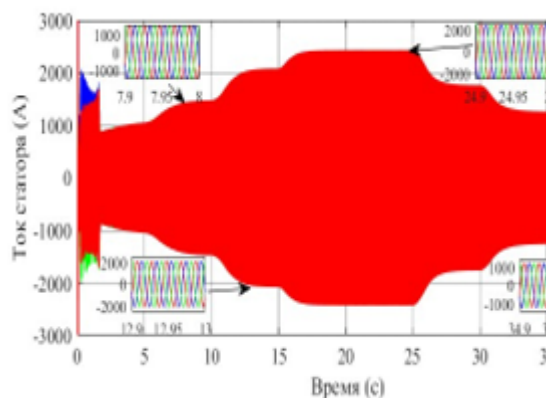


Рисунок 4. Изменение тока статора АГДП

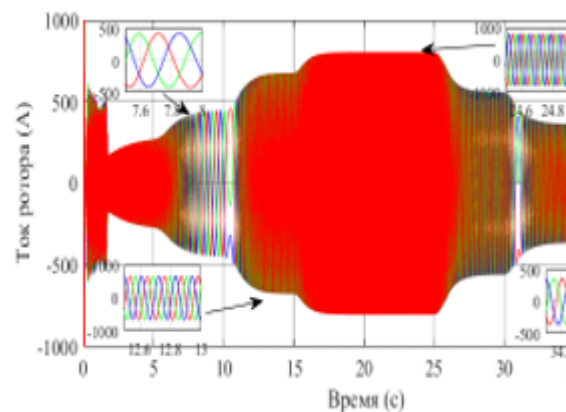


Рисунок 5. Изменение тока ротора АГДП

На рисунке 6 представлена динамика активной мощности статора АГДП во времени. В начальный момент (0-2 с) наблюдаются выраженные переходные колебания мощности, связанные с запуском и установлением рабочего режима. После этого мощность постепенно увеличивается: к 9,3 с достигает около 0,83 МВт, а к 14,4 с – 1,54 МВт. В диапазоне 18-25 с активная мощность стабилизируется и достигает максимального значения около 2 МВт.

На рисунке 7 представлено сравнение эталонного и фактического электромагнитного момента генератора АГДП при переменной скорости ветра. После переходного процесса фактический момент быстро отслеживает эталонный. В интервалах 6 – 15 с момент изменяется от -7000 до -10500 Н·м, а в диапазоне 16 – 25 с достигает примерно -12500 Н·м.

Качество электрической энергии оценено по коэффициенту общих гармонических искажений (THD) статорного тока в диапазоне 0-1 кГц относительно основной частоты 50 Гц. Полученное значение THD составляет 0,87 %. Низкий уровень искажений указывает на близкую к синусоидальной форму статорного тока и корректное формирование токовых управляющих воздействий.

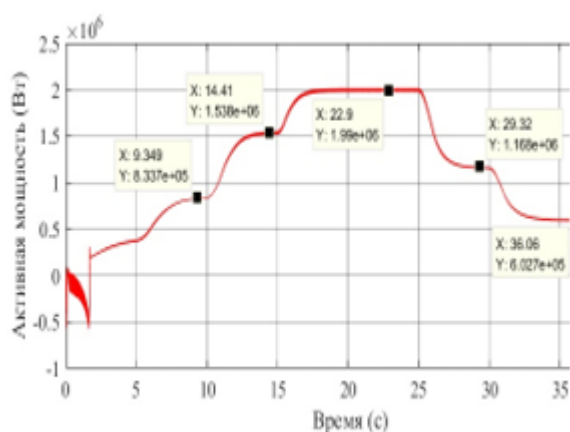


Рисунок 6. Изменение активной мощности

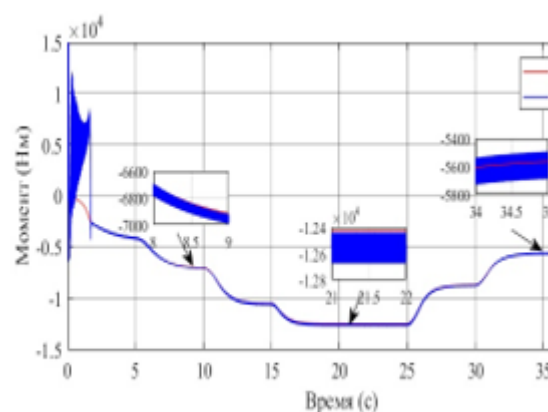


Рисунок 7. Сравнение эталонного и фактического электромагнитного момента

В совокупности с устойчивой динамикой мощности и момента этот показатель характеризует приемлемое качество работы сетевой ветроэнергетической системы в исследуемом режиме.

Заключение

В работе разработана и исследована математическая модель ветроэнергетической системы мощностью 2 МВт на основе АГДП с векторным управлением. Результаты моделирования при изменении скорости ветра 7-12 м/с показали устойчивую работу системы и эффективное регулирование активной мощности и электромагнитного момента. В номинальном режиме мощность достигает около 2 МВт, электромагнитный момент - 12,7 кН·м, а амплитуда статорного тока составляет около 2440 А. Полученное значение THD статорного тока 0,87 % свидетельствует о высоком качестве электрической энергии. В целом результаты подтверждают корректность разработанной модели и эффективность выбранной структуры векторного управления при переменной скорости ветра.

Список литературы

1. Abad, G. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation / G. Abad, J. Lopez, M.A. Rodriguez, L. Marroyo, G. Iwanski. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. – 640 P.
2. Abad, G. Direct power control of doubly-fed induction generator-based wind turbines under unbalanced grid voltage / G. Abad, M.A. Rodriguez, G. Iwanski, J. Poza // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. – № 2. – P. 442–452. – DOI: 10.1109/TPEL.2009.2027438.
3. Ahmad, T. Renewable energy in the 21st century: A review of wind and solar energy / T. Ahmad, D. Zhang, D. Huang, H. Zhang, N. Dai // Energy Reports. – 2021. – P. 6939–6953.
4. Carlin, P.W. The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology / P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi // Wind Energy. – 2003. – № 2. – P. 129–159. – DOI: 10.1002/we.77.
5. Chhipa, A.A. Role of Power Electronics and Optimization Techniques in Renewable Energy Systems / A.A. Chhipa, S. Vyas, V. Kumar, R.R. Joshi // Intelligent Algorithms for Analysis and Control of Dynamical Systems. – 2021. – P. 167–175. – DOI: 10.1007/978-981-15-8045-1_17.
6. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2025: Record Installations Amid Policy Instability. – Brussels: Global Wind Energy Council, 2025.
7. Hansen, A.D. Control of Variable Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators / A.D. Hansen, P. Sorensen, F. Iov, F. Blaabjerg // Wind Engineering. – 2004. – № 4. – P. 411–432. – DOI: 10.1260/0309524042886441.
8. Qazi, A. Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions / A. Qazi, F. Hussain, N.A. B.D. Rahim, G. Hardaker, D. Alghazzawi, K. Shaban, K. Haruna // IEEE Access. – 2019. – P. 63837–63851. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2906402.

-
9. Rezaei, E. Dynamic Model and Control of DFIG Wind Energy Systems Based on Power Transfer Matrix / E. Rezaei, A. Tabesh, M. Ebrahimi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – № 3. – P. 1485–1493.