

Система управления синхронным генератором ветряной турбины

Л. П. Козлова¹, О. А. Козлова²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
tigrenok59@mail.ru

Аннотация. Во многих странах мира выработка энергии осуществляется с помощью органического топлива, количество которого постепенно уменьшается. Учеными подсчитано, что найденных источников топлива при интенсивном его использовании, хватит на 70–130 лет. При этом ряд стран широко начали использовать возобновляемую энергетику, которая относится к экологически чистому источнику. Ветроэнергетика является наиболее перспективным ее направлением. Использовать энергию ветра начали более сотни лет назад. В статье рассматривается применение системы управления синхронным генератором с постоянными магнитами ветряной турбины.

Ключевые слова: ветряная турбина; синхронный генератор с постоянными магнитами; система управления; MPPT-контроллер

I. ВВЕДЕНИЕ

Во многих странах мира начали широко применять ветрогенераторы, но их использование связано с рядом проблем:

- непостоянство силы потока ветра;
- высокая стоимость комплектующих;
- высокий уровень шума при работе;
- низкочастотные шумы ветрогенератора создают помехи в системах коммуникаций.

Однако есть неоспоримые достоинства использования ветрогенераторов:

- высокая экологичность;
- конкурентоспособность с другими энергетическими производствами;
- бесконечность источника.

Ветряная турбина представляет собой сложную структуру, представленную на рис. 1, которая включает в себя: генератор переменного тока, мощность которого зависит от силы потока ветра; лопасти, передающие вращение к валу генератора; аккумуляторы, накапливающие энергию; контроллер, с помощью которого преобразуется переменное напряжение в постоянное; инверторы; датчики и другие элементы [1].

В ветряных турбинах применяются различного типа генераторы: с короткозамкнутым ротором; с фазным ротором; на постоянных магнитах и другие.

Вращение лопастей приводят в движение ось, соединенную с ротором генератора, сила которого преобразуется в электричество.

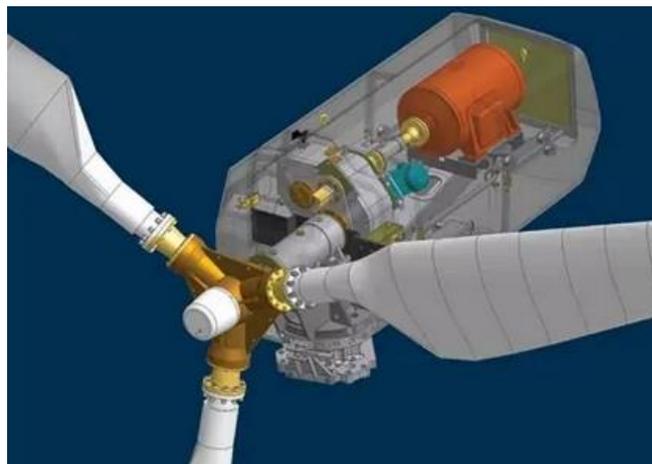


Рис. 1. Структура ветряной турбины

В работе рассматривается синхронный генератор с постоянными магнитами (СПГМ).

В современных ветрогенераторах коэффициент использования установленной мощности составляет около 20 %.

При рассмотрении структуры ветряной турбины важной составляющей является возможность получения как можно больше энергии от силы ветра.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическое описание синхронного генератора на постоянных магнитах (СПГМ) во вращающейся системе можно записать как:

$$u = e - r_{\phi} i_{\phi} - L_{\phi} \frac{di}{dt},$$

$$L_1 \frac{di_d}{dt} = u_d - R_1 i_d + L_1 \omega_e i_q,$$

$$L_1 \frac{di_q}{dt} = u_q - R_1 i_q - L_1 \omega_e i_d + E_1,$$

где e – электродвижущая сила; i_{ϕ} , r_{ϕ} , L_{ϕ} – ток, сопротивление и индуктивность в фазных обмотках соответственно; L_1 , R_1 – индуктивность и сопротивление статора соответственно; $E_1 = \omega_e \psi_f$ –

постоянная потокосцепления; ψ_f – потокосцепление, создаваемое магнитом; $\omega_e = p_n \omega_k$ – скорость вращения поля ротора; p_n – число полюсов.

Выходные активная (P) и реактивная (Q) мощности генератора можно рассчитать как:

$$P = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q),$$

$$Q = \frac{3}{2}(u_q i_d - u_d i_q).$$

Электромагнитный момент можно рассчитать как:

$$M_{эм} = \frac{3}{4} p (\psi_f i_q + i_d i_q (L_d - L_q)).$$

В структурной схеме системы управления током (рис. 2) регулирование напряжения осуществляется в звене постоянного тока в зависимости от необходимой мощности. При этом задание реактивного тока устанавливается равным нулю, а регулятор активного тока формирует выходную мощность. Управление по dq обычно строится с ПИ-регуляторами, так как они дают хороший результат при регулировании переменных постоянного тока.

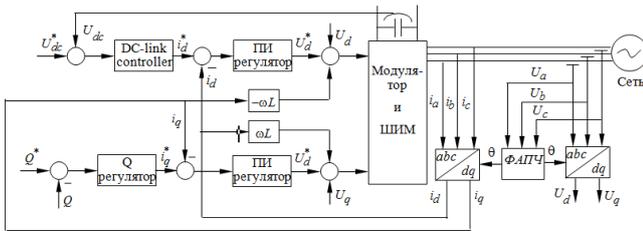


Рис. 2. Структурная схема системы управления током

Модуль преобразования системы отсчета $abc \rightarrow dq$ можно записать как:

$$I_{dq0} = T I_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix},$$

$$I_{abc} = T^{-1} I_{dq0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix}$$

где θ – фазовый угол.

Фазовый угол, используемый в блоке преобразования $abc \rightarrow dq$, определяется из напряжения сети. Для этого используется фильтрация напряжения и метод фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Для улучшения характеристик ПИ-регулятора необходимо реализовать компенсацию перекрестных связей.

Для этого по управляющим осям d и q необходимо выполнить разделение напряжений:

$$u_{dраз} = u_d - L_q \omega_e i_q, \quad (1)$$

$$u_{qраз} = u_q - L_d \omega_e i_d - \omega_e \psi_f. \quad (2)$$

На основании уравнений (1) и (2) составлена структурная схема СГПМ с компенсацией перекрестных связей (рис. 3).

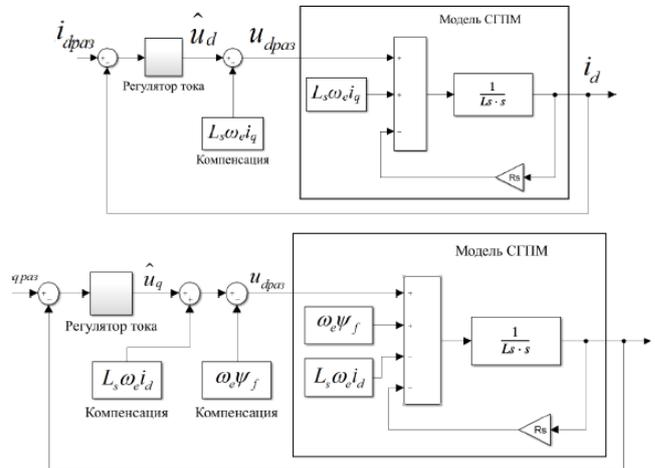


Рис. 3. Структурная схема СГПМ с компенсацией перекрестных связей

Важным параметром в ветрогенераторах является отслеживание точки максимальной мощности (МРРТ), позволяющей отслеживать максимально вырабатываемую мощность в широком диапазоне изменения силы ветра (рис. 4).

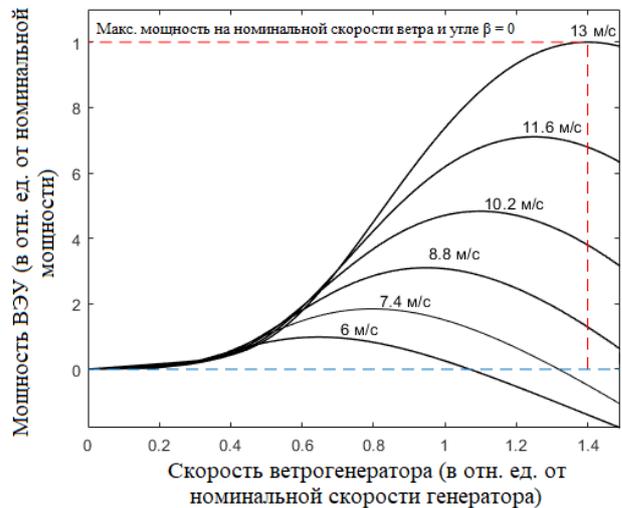


Рис. 4. Отслеживание точки максимальной мощности

Для этих целей начали широко использовать МРРТ-контроллеры. Функциональная схема подключения контроллера представлена на рис. 5.

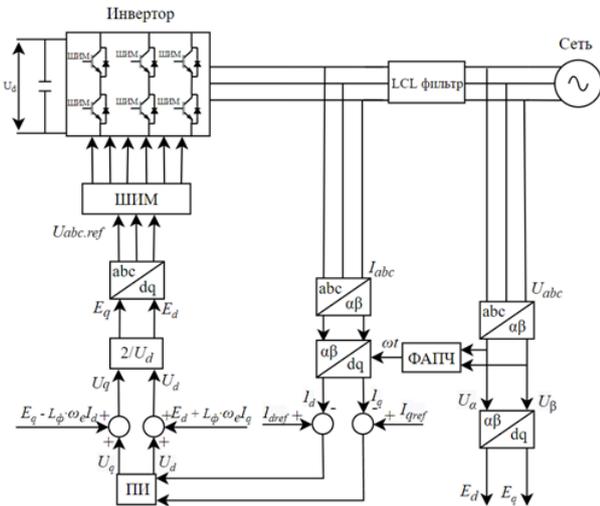


Рис. 5. Функциональная схема подключения контроллера

Напряжение рассчитывается с помощью преобразования Парка с фазовой автоподстройкой частоты. Сетевое напряжение рассчитывается по преобразованию Кларка. Для расчета погрешности значения токов по осям d и q сравниваются с опорными.

MPPT-контроллер сканирует напряжение в холостую, позволяя выбирать с какого напряжения снимать мощность. Он достаточно быстро реагирует на повышение и понижение оборотов генератора, и снимает мощность анализируя напряжение холостого хода.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Исследование системы управления выполнено для двух вариантов: при постоянном и переменном ветре.

Параметры ветрогенератора приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Параметр	Величина
Фазное напряжение, В	400
Фазный ток, кА	1,4
Электромагнитная мощность, МВт	1,5
Сопротивление в фазных обмотках, Ом	0,16
Индуктивность в фазных обмотках, мкГн	1,2

Будем считать, что жесткость ветроколеса – бесконечна. Моделирование в MatLab/Simulink выполнено с учетом зависимости мощности ветрогенератора от его скорости (рис. 4).

Реализация работы MPPT-контроллера представлена [2] на рис. 6.

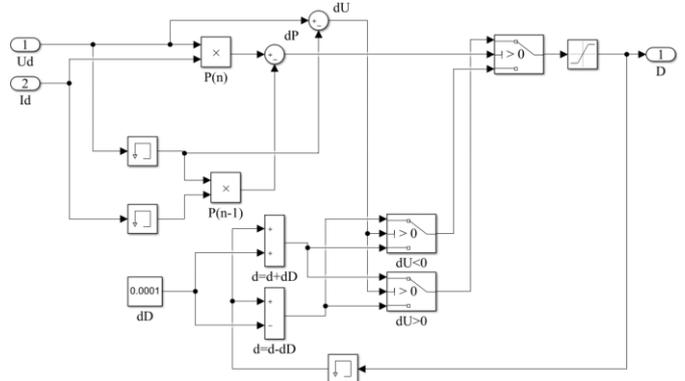


Рис. 6. MPPT-контроллер в MatLab/Simulink

На рис. 7 представлена математическая модель угла поворота лопастей.

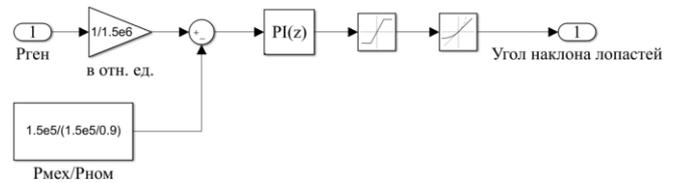


Рис. 7. Математическая модель угла поворота лопастей

Исследование генератора выполнено для ветрогенератора с выпрямителем (рис. 8).

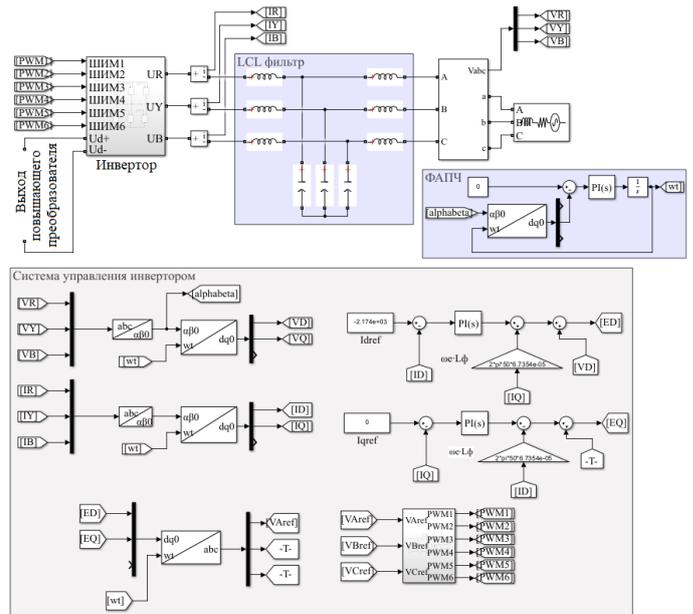


Рис. 8. Модель ветрогенератора в MatLab/Simulink

Результаты моделирования параметров представлены на рис. 9 и характеристика мощности СГПМ – на рис.10 при постоянном ветре.

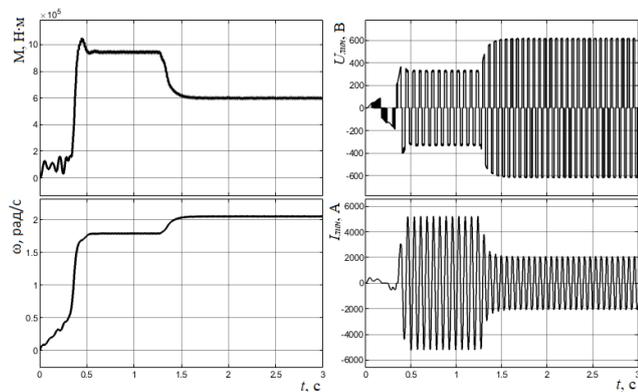


Рис. 9. Характеристики параметров генератора при постоянном ветре

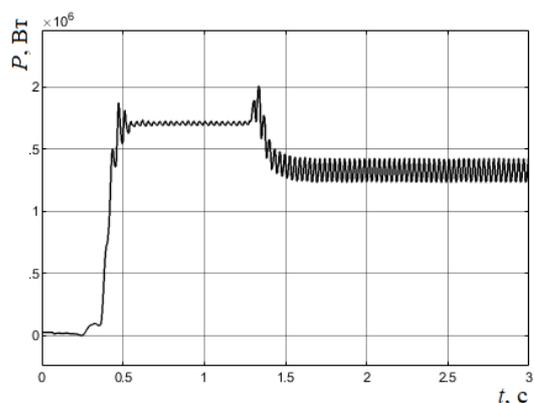


Рис. 12. Характеристика мощности СПГМ

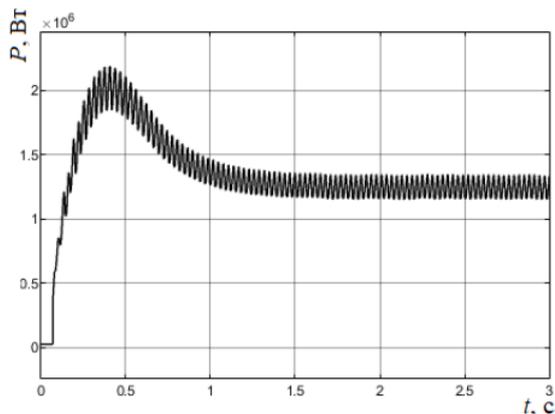


Рис. 10. Характеристика мощности СПГМ

Результаты моделирования параметров представлены на рис. 11 и характеристика мощности СПГМ – на рис.12 при переменном ветре.

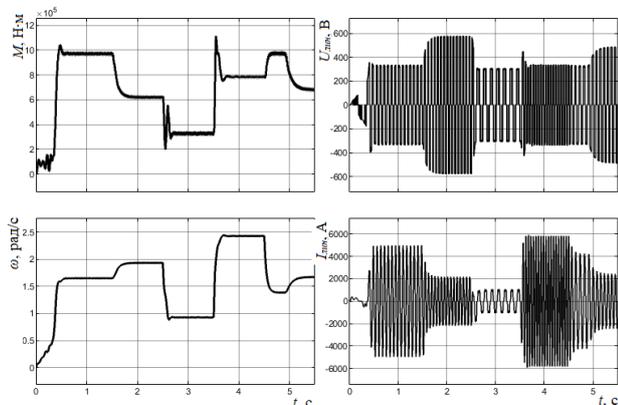


Рис. 11. Характеристики генератора при переменном ветре

Из графиков видно, что максимальное отклонение амплитуды не превышает 2,4 %, что соответствует стандартам на ветрогенераторы. Также из графиков следует, что при порывистом ветре скорость изменяется не скачком, а плавно.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ветрогенератор работает значительно лучше как при слабом ветре, так и при усилении ветра. Используя МРРТ-контроллер увеличение мощности возможно как минимум на (30–40) %. Связано это с тем, что генератор нагружается всегда одинаково в процентном соотношении от напряжения холостого хода. Чем больше просадка напряжения генератора, тем ниже его КПД, так как он начинает перегреваться и много тепла выделяют катушки. Но контроллер позволяет работать генератору в оптимальном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Manwell J.F., McGowan J. G., Rogers A. L.. Wind Energy Explained, Theory, Design and Application. Wiltshire: John Wiley & Sons Ltd, 2009. 705 с.
- [2] Modeling of Wind Turbine Generator with Boost Converter MPPT / L. Stefan, F. Yusivar // 2nd International Conference on Smart Grid and Smart Cities: тез. докл. международной науч.-техн. конф., Depok, Indonesia, 12-14 aug. 2018 г. / Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Universitas Indonesia, 2018. С. 100–104.