

СТАБИЛИЗАЦИЯ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ВЕТРОКОЛЕСА

Розглянуто питання стабілізації потужності вітрового генератора, який працює в умовах змінної швидкості вітру. Для стабілізації вихідної потужності вітрового генератора пропонується застосування системи векторного регулювання моменту асинхронної машини. Такий підхід дозволяє використовувати кінетичну енергію вітроколеса для згладжування коливань потужності вітрового потоку.

Рассмотрены вопросы стабилизации мощности ветрового генератора, работающего в условиях переменной скорости ветра. Для стабилизации выходной мощности ветрогенератора предлагается применение системы векторного регулирования момента асинхронной машины. Такой подход позволяет использовать кинетическую энергию ветроколеса для сглаживания колебаний мощности ветрового потока.

The questions of stabilization of wind generator power at variable wind velocity are described. Using of vector control system of asynchronous machine's moment is offered for stabilization of wind generator output power. Such an access allows to use kinetic energy of wind turbine for graduation of blast power variation.

С ростом доли возобновляемых источников энергии важное значение приобретает качество энергии, которую они поставляют в сеть. Эта проблема особенно актуальна для ветровых генераторов, поскольку скорость ветрового потока является очень нестабильной величиной, а следовательно, при отсутствии качественного регулирования, нестабильной будет и выходная мощность ветрогенератора.

Для того, чтобы оценить степень влияния скорости ветра на выходную мощность ветрогенератора достаточно привести формулу мощности, которую ветровой поток отдает ветроколесу [3]:

$$P = 0.49 \cdot c_p(\lambda, \delta) \cdot D^2 \cdot V_w^3, \quad (1)$$

где V_w – скорость ветра, D – диаметр ветроколеса, c_p – коэффициент мощности ветроколеса, который зависит от быстроходности λ и установочного угла δ между плоскостью вращения ветроколеса и хордой крыла. В формуле (1) скорость ветра участвует в кубе, поэтому небольшие изменения скорости ветра будут приводить к существенным изменениям мощности ветрогенератора.

Для стабилизации выходной мощности ветрогенератора можно использовать большой момент инерции ветроколеса. В этом случае ветроколесо может выступать в роли буфера-накопителя кинетической энергии. Кинетическую энергию ветроколеса можно использовать следующим образом: если скорость ветра в процессе работы генератора становится ниже некоторой средней величины, то ветроколесо может тормозиться, отдавая в сеть часть своей энергии и восполняя провал в энергии ветрового потока, если же скорость ветра станет выше средней, то скорость ветроколеса должна увеличиваться, при этом излишняя энергия ветрового потока не будет уходить в сеть, а будет трансформироваться в кинетическую энергию ветроколеса. Для реализации указанных выше принципов асинхронный генератор должен быть подключен к сети через преобразователь частоты.

Поскольку речь идет о стабилизации мощности ветрогенератора, то в качестве средства стабилизации целесообразно выбрать электрический момент, создаваемый генератором в процессе работы, поскольку активную мощность генератора можно определить по формуле:

$$P = M_g \cdot \omega_g, \quad (2)$$

где M_g – электрический момент генератора, ω_g – угловая скорость вращения генератора.

Поэтому вопрос стабилизации мощности сводится к вопросу регулирования электрического момента генератора. Поскольку в качестве генератора выбран асинхронный генератор, приведем формулу момента асинхронного генератора для вращающейся системы координат с осями d и q [2].

$$M_g = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot K_R \cdot \Psi_{Rd} \cdot i_{sq}, \quad (3)$$

где z_p – число пар полюсов, K_R – фактор связи, Ψ_{Rd} – проекция потока ротора на ось d , i_{sq} – проекция тока статора на ось q .

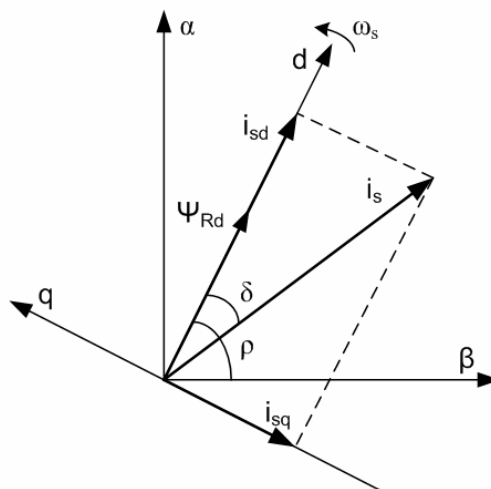


Рис.1. Проекция векторов на оси вращающейся системы координат d, q

Формула 3 показывает, что при условии поддержания системой регулирования потока в генераторе постоянным, регулировать момент генератора можно за счет компоненты тока статора i_{sq} .

С физической точки зрения процесс регулирования момента асинхронного генератора в условиях изменяющегося момента нагрузки можно объяснить следующим образом. При повышении момента нагрузки выше заданного вектор потока ротора Ψ_{Rd} вместе с осью d станет отдаляться от вектора тока статора, нагрузочный угол δ будет увеличиваться, увеличивая при этом компоненту i_{sq} (см. рис.1). Для удержания компоненты i_{sq} в требуемых пределах сис-

тема регулирования должна будет увеличить скорость вращения поля так, чтобы вектор тока статора i_s догнал вектор потока ротора Ψ_{Rd} . Вместе со скоростью вращения поля будет увеличиваться и механическая скорость вращения ротора. Таким образом, излишняя энергия ветрового потока будет трансформироваться в кинетическую энергию ветроколеса. При снижении момента нагрузки ниже заданного будет происходить обратный процесс. Реализация приведенных принципов регулирования возможна в системе векторного регулирования без датчика скорости [2]. Пример такой системы регулирования приведен на рис.2.

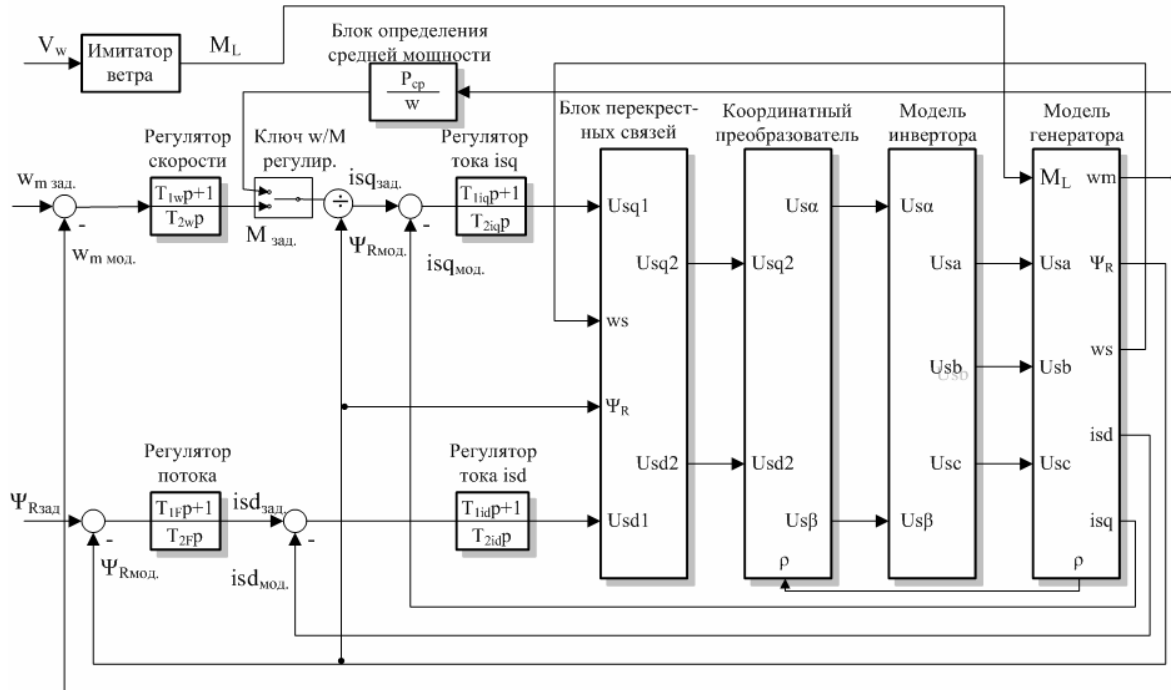


Рис. 2. Система векторного регулирования скорости (момента) асинхронного генератора без датчика скорости

Приведенная система регулирования получает задание на поток генератора, который поддерживается постоянным благодаря регулятору потока и задание на скорость. Все необходимые обратные связи и расчетные параметры, такие как: w_m – скорость вращения ротора, Ψ_R – поток ротора, w_s – скорость вращения поля, i_{sd} , i_{sq} – проекции тока статора на оси вращающейся системы координат, ρ – угол между координатными системами, система регулирования получает из математической модели. В основу математической модели положены уравнения состояния для вращающейся системы координат [2]:

$$i_{sd} = \frac{1}{R_s \cdot 1 + p \sigma T_s} (U_{sd} - p K_R \Psi_R + \omega_s \sigma L_s i_{sq}), \quad (4)$$

$$i_{sq} = \frac{1}{R_s \cdot 1 + p \sigma T_s} (U_{sq} - \omega_s K_R \Psi_R - \omega_s \sigma L_s i_{sd}), \quad (5)$$

где R_s – сопротивление статора, T_s – постоянная времени статора, σ – коэффициент рассеяния, U_{sd} , U_{sq} – проекции вектора напряжения статора на оси d и q, L_s – индуктивность статора, p – оператор Лапласа. Регуляторы токов и потока в системе настроены по модульному оптимуму, регулятор скорости по сим-

метричному оптимуму. Необходимо отметить, что система может работать как в режиме регулирования скорости, так и в режиме регулирования момента. Выход генератора на заданную частоту вращения осуществляется в режиме регулирования скорости. Но когда блок определения средней мощности рассчитает задание на момент, необходимое для поддержания средней мощности, система может перейти в режим регулирования момента. При этом частота вращения ротора генератора перестает контролироваться регулятором скорости, и сама скорость ротора становится величиной непостоянной, зависящей от процесса регулирования момента. Если в процессе регулирования момента скорость вращения ротора выйдет за допустимые пределы, система может вернуться в режим регулирования скорости и восстановить необходимую частоту вращения ротора генератора. Поведение системы для режимов регулирования скорости и момента при переменной ветровой нагрузке было смоделировано в программном пакете MATLAB. результаты моделирования приведены на рис.3 и рис.4. Рис.3 показывает, что скорость ветра изменяется в пределах от 8,5 до 12 м/с, что соответствует реальности. Поведение

ние мощности ветрового потока и активной мощности генератора при таком изменении скорости ветра показано на рис. 4. На рис. 4 видно, что с 8-ой по 18-ую секунды режим стабилизации мощности отсутствует, и мощность ветрового потока и активная мощность генератора практически совпадают, при этом активная мощность генератора колеблется в пределах $0.4 \div 0.95 P_n$.

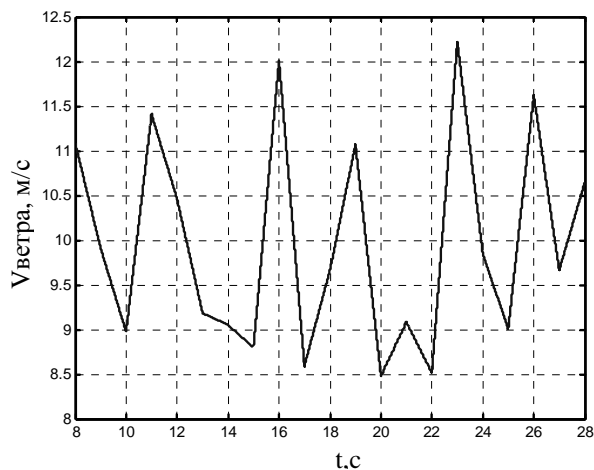


Рис.3. Поведение скорости ветра

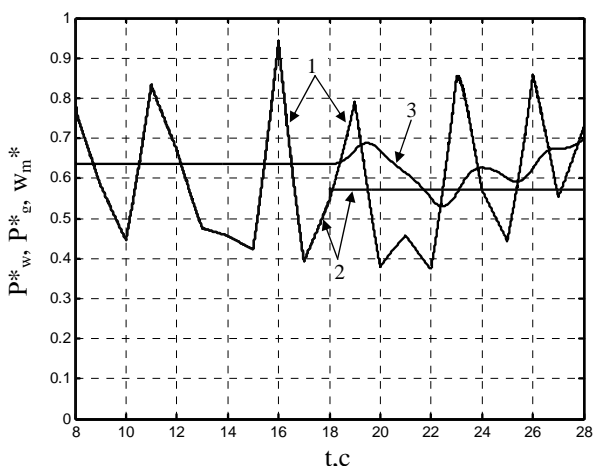


Рис.4. Поведение мощности и скорости:
1 – мощности ветрового потока (P_w); 2 – активной мощности генератора (P_g) до и после режима стабилизации; 3 – скорости вращения ротора генератора в относительных единицах

После 18-ой секунды начинается режим стабилизации, т.е. режим регулирования момента, при этом активная мощность генератора стабилизируется, но скорость вращения ротора генератора изменяется в пределах $0.85 \div 1.1 w_{m \text{ зад.}}$. Конечно же, степень изменения скорости вращения ротора зависит от величины момента инерции ветроколеса. Чем больше момент инерции, тем меньше изменяется скорость вращения ротора.

В данном исследовании за основу для расчетов были взяты технические параметры асинхронного генератора и ветроколеса установки USW 56-100. Суммарное значение момента инерции генератора и

ветроколеса рассчитывалось по приближенной формуле[1]:

$$J = J_g + \frac{3 \cdot m_b \cdot (0.44 \cdot R)^2}{u^2}, \quad (6)$$

где J - суммарный момент инерции, J_g - момент инерции генератора, m_b - масса одной лопасти, R - радиус ветроколеса, u - передаточное число редуктора. При этом делалось допущение, что центр масс лопасти находится на расстоянии $0.44R$ от центра вращения. В результате расчета по формуле (6) получилось, что суммарный момент инерции в 9 раз превосходит момент инерции самого генератора. В реальности это соотношение может быть еще больше, поскольку здесь не учитывался момент инерции редуктора и ступицы ветроколеса.

Подводя итог результатов моделирования, можно сказать, что стабилизация выходной мощности асинхронного ветрогенератора в режиме регулирования момента возможна. Возникающие при этом изменения скорости вращения ротора не очень значительны, и их характер определяется правильностью определения средней мощности, и величиной момента инерции ветроколеса.

Список использованной литературы

1. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. М.: Сельхозгиз, 1956. – 560с.
2. Riefenstahl U. Elektrische Antriebstechnik. – Stuttgart Leipzig: Teubner, 2000. – 401с.
3. Franquesa M. Kleine Windräder: Berechnung und Konstruktion. – Weisbaden Berlin: Udo Pfriemer Buchverlag in der Bauverlag, 1989.- 175с.

Получено 04.07.06



Черников Вадим Геннадиевич,
ассистент кафедры «Системы программного управления» Донецкого Национального технического университета. Адрес: 83000 г. Донецк ул. Артема 58
Телефоны: раб. (062)304-71-31
дом. (062)382-21-15
e-mail: chernikov@kita.dgtu.donetsk.ua