

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Ветрогенераторные установки (ВГУ) находят все более широкое применение для генерации электроэнергии. Согласно данным Global Wind Energy Council суммарная мощность введенных в строй ВГУ в мире на конец 2009 года составила 157,9 млн. кВт. По сравнению с концом 2008 года прирост составил порядка 37,5 млн. кВт, и тенденция на повышение сохраняется. Например, в Германии к 2020 году планируется 25% потребности в электроэнергии покрывать за счет энергии ветра.

Энергия ветра не является стабильным источником энергии и, по причине непостоянства скорости и направления ветра во времени, не поддается предварительной калькуляции. Существует несколько концепций построения ВГУ, которые зависят от типа используемого ветряка, числа и профиля его лопастей, от типа используемого генератора и способа передачи вырабатываемой энергии в сеть или в накопитель энергии (аккумулятор).

Мощность потока воздуха, проходящая в единицу времени через замкнутую поверхность (площадь) определяется выражением [1]:

$$P_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3, \quad (1)$$

где: ρ – плотность воздуха (1,204 кг/м³ при нормальном атмосферном давлении и температуре 20°C);

$\pi \cdot R^2$ – площадь, омываемая потоком воздуха; v – скорость потока воздуха.

Эта мощность преобразуется ветряком в крутящий момент и далее с помощью генератора в электрическую мощность. С учетом реального коэффициента мощности для трехлопастного ветряка $c_p = 0,35$ и КПД электрического генератора η_G на уровне 80%, с одного квадратного метра площади безредукторного ветряка можно снять электрическую мощность порядка:

$$P_{el} = c_p \cdot \eta_G \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 = 0,168 \cdot v^3, \text{ или } \approx \left(\frac{86}{461} \right) W \text{ при } v = \left(\frac{8 \text{ м/с}}{14 \text{ м/с}} \right) \quad (2)$$

Значение скорости ветра 8 м/с соответствует наибольшему вероятностному значению, а 14 м/с – номинальная скорость ветра большинства типов ВГУ. Например, чтобы при номинальной скорости обеспечить мощность ВГУ в 5 МВт, необходима площадь ветрового колеса 10846 м², что соответствует диаметру колеса порядка 120 м.

На рис. 1 представлено семейство типовых нагрузочных характеристик ВГУ в зависимости от числа оборотов ротора генератора и скорости ветра. Как видно из рисунка, выходная мощность ВГУ растет с увеличением скорости ветра, а максимальное значение этой мощности смещается вдоль оси числа оборотов.

Если провести кривую через максимумы мощности при различных скоростях ветра, то получим идеальную нагрузочную характеристику ВГУ, обеспечивающую максимальный отбор энергии в любой момент времени.

Если, например, ВГУ работала в стационарном режиме в точке максимума нагрузочной характеристики А (рис. 1) и произошло увеличение скорости ветра, то в силу механической инерционности системы, рабочая точка постепенно перемещается в точку В. Несмотря на увеличение мощности ВГУ, точка В может не лежать на линии максимальной мощности P_{max} .

Чтобы переместить рабочую точку в сторону локального максимума С необходимо, например, путем согласования нагрузки, изменить число оборотов генератора. При этом рабочая точка перемещается в направлении

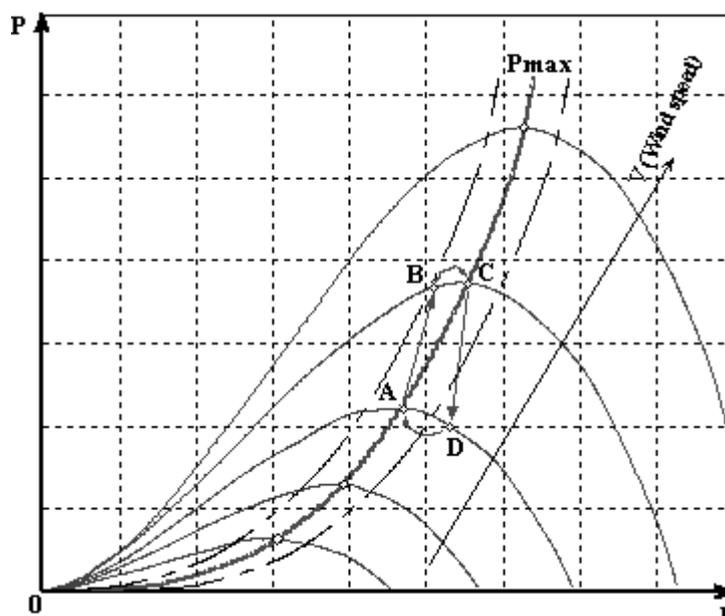


Рисунок 1 – Типовые нагрузочные характеристики ВГУ

точки С, выходная мощность ВГУ возрастает и, если точка максимума С пройдена, то необходимо снизить число оборотов генератора. Если скорость ветра падает, то рабочая точка перемещается вниз в точку D. Для возврата в точку максимума А число оборотов должно уменьшаться до той поры, пока выходная мощность возрастает. Если точка А пройдена, то выходная мощность уменьшается и необходимо вновь увеличивать число оборотов. Таким образом, для постоянного поддержания режима максимальной выходной мощности необходимо использование системы регулирования, причем качество регулирования будет тем лучше, чем меньше будет отклонение величины выходной мощности от идеальной нагрузочной характеристики ВГУ (P_{max}).

Для ВГУ большой мощности и работающих непосредственно на сеть используются мощностные характеристики вида $P = f(v)$. При этом, система регулирования подключает ВГУ к сети при скоростях ветра 2-4 м/с, поддерживает, путем поворота лопастей ветрового колеса (изменения угла атаки), режим номинальной мощности и останавливает работу ВГУ, путем механического торможения, при скорости ветра более 25-30 м/с. ВГУ малой мощности (менее 10 кВт) работают, как правило, на локальную нагрузку и содержат в своем составе аккумуляторы энергии.

В институте прикладных наук города Эсслингена (Германия) была спроектирована и изготовлена действующая модель трехлопастной ВГУ (рис. 2 а) с диаметром ветрового колеса 0,7 м и номинальной мощностью порядка 110 Вт при номинальной скорости ветра 12 м/с. [2]. С целью определения зависимости максимума от даваемой мощности от скорости ветра и числа оборотов ротора генератора $P_{max} = f(v, n_R)$, данная установка была испытана (продута) в аэродинамической трубе.

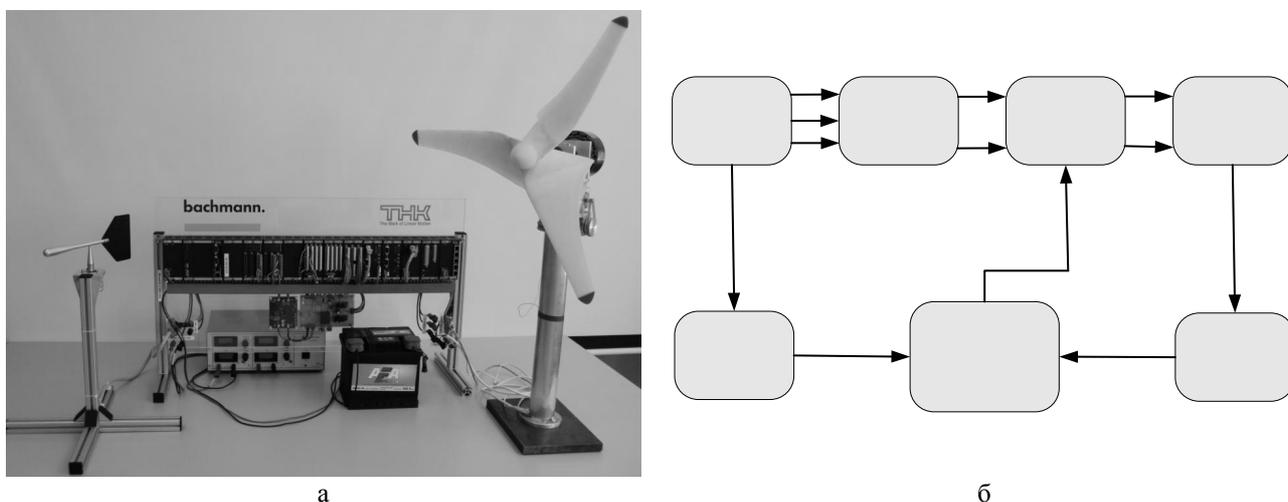


Рисунок 2 – Действующая модель ВГУ (а) и блок-схема системы регулирования максимальной мощности (б)

При различных значениях скорости ветра и изменении нагрузки были определены максимумы выходной мощности и значения числа оборотов ротора в точках максимума. В результате была получена зависимость вида $P_{max} = F \cdot (k \cdot f^3)$, которая позволяет формировать заданное значение оптимальной мощности ВГУ по частоте напряжения генератора. При этом нет необходимости в применении датчиков скорости ветра при реализации системы регулирования.

На рис. 2 б представлена блок-схема электрической части и системы управления ВГУ. Для генерации энергии использовался специально спроектированный и изготовленный трехфазный синхронный генератор (**Generator**) переменного тока с внешним ротором и возбуждением от постоянных магнитов. С учетом необходимости работы ВГУ на локальную нагрузку и аккумулятор, номинальное напряжение генератора составляет 6 В при выходной мощности 100 Вт. С помощью трехфазного нерегулируемого выпрямителя (**Gleichrichter**) переменный ток преобразуется в постоянный и подается далее через регулятор (**Regler**) на аккумулятор. Блок определения текущей скорости вращения ротора генератора (**Drehzahlerfassung**) используется для преобразования частоты вырабатываемого напряжения в пропорционально изменяющееся напряжение постоянного тока, которое подается на систему числового программного управления (ЧПУ) фирмы Bachmann (**Bachmann Steuerung**). Последняя, в свою очередь, программным путем реализует кубическую функцию оптимальной мощности $P_{max} = F \cdot (k \cdot f^3)$. В качестве нагрузки регулятора используется стандартная автомобильная свинцовая аккумуляторная батарея напряжением 12 В и емкостью 45 Ач.

Необходимо отметить, что аккумулятор, как нагрузка, имеет нелинейную характеристику заряда (рис. 3). Его внутреннее сопротивление не является постоянным и принимает минимальное значение при полностью заряженном аккумуляторе. Относительно незначительное изменение напряжения заряда в пределах менее 2 В (от 12,75 до 14,5 В.) приводит к резкому увеличению тока заряда. Кроме того, при напряжении заряда более 14,5 В, в свинцовых аккумуляторах начинается процесс выделения водорода и при длительном перенапряжении это может привести к выходу их из строя [3]. Все эти факторы предъявляет специфические требования к алгоритму поддержания оптимальной мощности и структуре регулятора. В качестве регулятора нами использовался импульсный DC/DC преобразователь (Buck-Boost Converter), выполненный на базе микросхемы LTM4607.

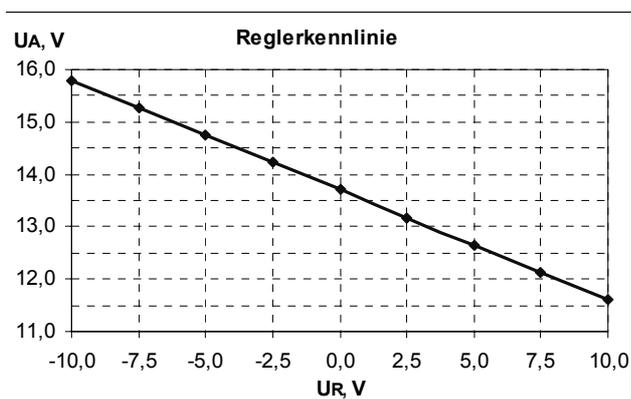


Рисунок 3 – Характеристика заряда аккумулятора

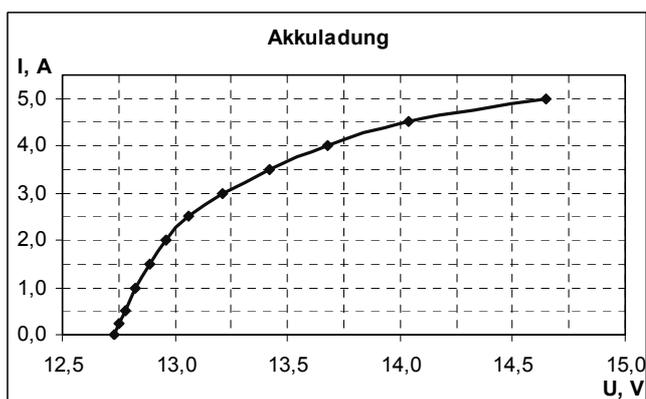


Рисунок 4 – Выходная характеристика DC/DC модуля

Он обеспечивает поддержание выходного напряжения в диапазоне 0,8 до 24 В с током нагрузки 5 (10) А при изменении входного напряжения в пределах от 4,5 до 36 В. Путем соответствующего подбора элементов преобразователя было обеспечено линейное изменение выходного напряжения регулятора U_A под нагрузкой в пределах 11,6 – 15,8 В при изменении напряжения регулирования U_R в пределах от -10 до +10 В (рис. 4).

Напряжение регулирования U_R вырабатывается ПИД-регулятором, включенным в состав системы программного управления фирмы Bachmann. Для получения текущего значения потребляемой аккумулятором мощности в составе системы регулирования используется блок контроля напряжения и потребляемого аккумулятором тока (**Strom-, Spannungserfassung**).

Регулировка оптимальной мощности осуществляется по следующему алгоритму. При небольшой скорости ветра и числе оборотов ротора генератора менее 300 об/мин, ПИД-регулятор выдает напряжение регулирования порядка + 10 В. ВГУ работает в режиме холостого хода и при увеличении скорости ветра постепенно набирает обороты. Как только число оборотов ротора генератора превысит 300 об/мин, система регулирования активизируется и начинается процесс регулирования. Регулировка производится циклически, причем время цикла может изменяться программным путем в зависимости используемого типа ВГУ. В рассматриваемом случае время цикла составляло порядка 200 мс.

Заданное значение максимальной мощности рассчитывается по кубической функции частоты (числа оборотов) и сравнивается с текущим значением потребляемой аккумулятором мощности, которые в установившемся режиме равны друг другу. При этом последнее значение потребляемой мощности запоминается в системной памяти. Если произошло увеличение скорости ветра, соответственно числа оборотов ротора генератора и мощности, то на сравнивающем устройстве ЧПУ появляется разбаланс и по его величине вначале программным путем рассчитываются коэффициенты ПИД-регулятора и производится их автоматическая корректировка. Далее система обрабатывает разбаланс таким образом, что на входе DC/DC преобразователя напряжение становится менее +10 В, а на его выходе растет. Это приводит к увеличению напряжения на аккумуляторе, зарядного тока и потребляемой аккумулятором мощности. На следующем цикле процесс повторяется, с той лишь разницей, что новое значение текущей мощности сравнивается с ее значением на предыдущем цикле. Коэффициенты ПИД-регулятора корректируются, и системная память обновляется последними величинами. Подобное происходит до той поры, пока разница измерений на последнем и предпоследнем циклах не поменяет знак. Это говорит о том, что точка максимума пройдена, и система регулирования должна вернуть ее назад.

Если произошло уменьшение скорости ветра, соответственно числа оборотов ротора генератора и мощности, то знак разбаланса изменяется на противоположный и система циклически обрабатывает поиск максимума в обратном направлении. Таким образом, реализована цифровая система поиска экстремума функции мощности ВГУ в зависимости от двух возмущающих воздействий: скорости ветра и числа оборотов, которая оптимизирует энергетический баланс ВГУ.

При изменении элементной базы силовой части системы регулирования, ее можно использовать и для более мощных ВГУ, использующих в своем составе блоки аккумуляторных батарей большой емкости. Для новой ВГУ необходимо вначале опытным или расчетным путем получить функцию оптимальной мощности $P_{\max} = F \cdot (k \cdot f^3)$. При этом алгоритм управления остается без изменения и, при необходимости, потребуется только скорректировать время цикла регулирования под новый типоразмер ВГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Robert Gasch, Jochen Twele. Windkraftanlagen. 5 Auflage. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007.
2. Eugen Nolle, Nikolaus Neuberger. Dimensionierung und Bau einer Windkraftanlage. Spektrum-Zeitschrift der HS-Esslingen, 29/2009.
3. Markus Tillmann. Blei-Akkus, Ladegeräte und ihre Kennlinien. VFO-Magazin, 12/2006.