

УДК 621.313

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова, А.И. Муравлев

Томский политехнический университет
E-mail: mai@tpu.ru

Выполнено исследование соответствия энергетических характеристик ветротурбины и генератора при переменной частоте вращения энергоблока, сформулированы рекомендации по выбору синхронных генераторов ветроэлектростанций. Учет данных рекомендаций позволит уменьшить массогабаритные показатели синхронных генераторов на 10...15 % и, соответственно, их стоимость.

Условия работы электромашинных аэрогенераторов определяются характеристиками ветротурбины с ее регулировочными устройствами и характеристиками нагрузки ветроэлектростанции (ВЭС).

С точки зрения полного использования доступной механической энергии и обеспечения максимальной энергоэффективности ВЭС в диапазоне скоростей вращения от минимальной до номинальной, следует использовать режим работы ветротурбины с максимальным постоянным значением коэффициента использования энергии ветра C [1]. Для современных трехлопастных ветродвигателей с горизонтальной осью вращения величина этого коэффициента обычно равна $C_{\max}=0,25...0,3$ [2]. При этом частота вращения ветротурбины, изменяется в зависимости от скорости ветра в соответствии с выражением [1]:

$$n = \frac{ZV}{\pi R}, \quad (1)$$

где n – частота вращения, об/мин; Z – число модулей ветродвигателя; V – скорость ветра, м/с; R – радиус ветродвигателя, м. Число модулей характеризует быстроходность ветродвигателя. При максимальном постоянном значении коэффициента использования энергии ветра, число модулей ветродвигателя также является максимальным и постоянным [1].

Мощность, развиваемая ветродвигателем, определяется выражением [1]:

$$P_g = 0,000481 D^2 V^3 C, \quad (2)$$

где P_g – мощность ветродвигателя, кВт; $D=2R$ – диаметр ветродвигателя, м.

Обеспечение работы ВЭС в режиме $C=C_{\max}=\text{const}$, вне зависимости от параметров нагрузки, достигается введением в состав автономной ВЭС автоматически регулируемой балластной нагрузки [3].

Ветроэлектростанция, при указанных условиях, обеспечивает преобразование в электроэнергию всей кинетической энергии рабочего потока воздуха, то есть работает с максимальной энергоэффективностью. Аэрогенератор работает в режиме переменных значений частоты вращения и мощности, причем большей частоте вращения соответствует и большая генерируемая мощность.

Когда скорость ветра превышает номинальное значение, аэродинамическая система переводит ВЭС в режим работы с постоянной мощностью и частотой вращения. Значения C и Z , при этом, становятся переменными, уменьшающимися с ростом скорости ветра V . Наконец, при превышении скорости ветра максимальных значений, ветротурбина выводится из под ветра и затормаживается.

Задачей данной работы является исследование соответствия характеристик ветротурбины и генератора при переменной частоте вращения энергоблока и формирование требований к выбору синхронных генераторов для указанного типа ветроэлектростанций.

Соотношение между мощностью, развиваемой ветротурбиной, и частотой ее вращения определяется по выражениям (1, 2) и, для распространенных ВЭС мощностью 5...30 кВт [2], характеризуется следующими значениями: $Z=5,5...9$; $C=0,25...0,3$. Пусковые скорости ветра для указанного типа ВЭС равны 3...4 м/с. Следовательно, минимальная частота вращения ветротурбины находится в пределах 90...30 об/мин для диаметров ветроколес от 2,5 до 7,5 м. Максимальная частота вращения этих ветродвигателей изменяется, в зависимости от диаметра ветроколес, от 300 до 90 об/мин. Таким образом, диапазон изменения частот вращения ветродвигателя равен 1...3 отн. ед. Мощность ветротурбины и соответственно, ветрогенератора изменяется при этом в 30...40 раз по отношению к мощности, развиваемой в пусковом режиме. Частота вращения автономного генератора является фактором, определяющим его мощностные и массогабаритные показатели. С увеличением частоты происходит уменьшение относительного веса и габаритов электрооборудования, что удешевляет энергоустановку.

Известно, что в электрических машинах с переменной частотой вращения происходит перераспределение потерь, определяющих их тепловой режим. В частности, при повышении частоты вращения потери в меди сокращаются, а в стали возрастают. Одновременно усиливается эффективность охлаждения, особенно для генераторов со встроенным вентилятором на общем валу. Следовательно, электрическая мощность генератора зависит от частоты вращения.

Очевидным условием для определения мощности генератора с переменной частотой вращения является постоянство теплового режима статорной обмотки. Обмотка ротора с увеличением частоты не перегревается, т. к. ток возбуждения не возрастает, а интенсивность охлаждения повышается.

В работе [4] предложены выражения для расчета мощности явнополюсных синхронных генераторов на примере машин серии ЕСС.

В частности, мощность генератора P_g с регулируемым возбуждением, обеспечивающим постоянство выходного напряжения $U=1$ о. е., определяется как

$$P_g = \sqrt{(1 + \beta) \frac{f^{0,74} - \delta f^{-0,4} (1 - f^{-1,6}) - (1 - \alpha) f^{-2}}{(\beta + f^{1,5}) \alpha}} \quad (3)$$

Для режима генератора напряжение U пропорционально частоте f например с возбуждением от постоянных магнитов, мощность равна

$$P_g = f \sqrt{(1 + \beta) \frac{f^{0,74} + \delta (1 - f^{1,6}) - (1 - \alpha)}{(\beta + f^{1,5}) \alpha}} \quad (4)$$

В выражениях (3), (4) коэффициенты α , β , δ для синхронных явнополюсных генераторов нормального исполнения находятся в пределах [4]:

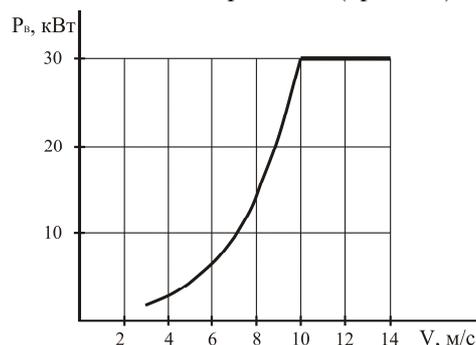
$$\alpha = 0,45 \dots 0,25; \quad \beta = 0,5 \dots 0,35; \quad \delta = 0,4 \dots 0,15.$$

Таким образом, используя выражения (1)–(4) можно построить мощностные характеристики ветродвигателя и генератора и, на основании их сопоставления, сформулировать рекомендации к рациональному выбору типа, мощности и частоты вращения управляемого синхронного генератора для ВЭС.

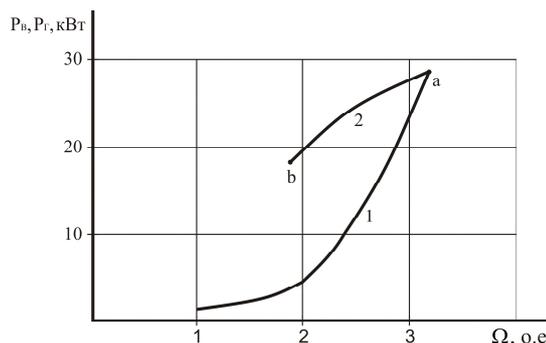
Расчетная зависимость мощности ветродвигателя от скорости ветра приведена на рис. 1, а. Эта же зависимость в функции от частоты вращения, при полной утилизации вырабатываемой энергии, показана на рис. 1, б (кривая 1). В качестве примера, использованного в расчетах, взяты параметры ветроэлектростанции мощностью 30 кВт типа РW-30/14 совместной разработки Лианозовского электромеханического завода г. Москва и компании PITCH WIND, Швеция [2].

В соответствии с выражением (4), с увеличением в два раза частоты вращения синхронных генераторов и пропорциональном увеличении выходного напряжения, генерируемая мощность может быть увеличена до 70 %. Следовательно, если принять максимальное значение характеристики $P_g(\Omega)$ за режим, соответствующий работе системы с повышенной частотой (точка «а»), то базовая частота вращения генератора может быть практически в два раза меньше. В зависимости от значений коэффициентов α , β , δ базовая мощность синхронного генератора уменьшится: максимально на указанную величину 70 % (точка «б»). Следует отметить, что большая доступная мощность генератора на повышенной частоте соответствует машинам с меньшим

значением коэффициента δ , который характеризует потери в стали. Это объясняется увеличением потерь на гистерезис с увеличением частоты при одновременном снижении потерь в меди. Промежуточные точки характеристики $P_g=f(\Omega)$ могут быть определены по выражению (4). Графически эта зависимость представлена кривой 2 на рис. 1, б. Сопоставление взаимного расположения кривых 1 и 2 показывает быстрое падение мощности ветродвигателя от частоты вращения (кривая 1), что определяет соответствующее снижение электромагнитных нагрузок аэрогенератора по сравнению с допустимыми по тепловым режимам (кривая 2).



а



б

Рисунок. Расчетная зависимость мощности ветродвигателя от: а) скорости ветра; б) относительной частоты вращения при полном съеме вырабатываемой мощности

Таким образом, можно рекомендовать для ветроэлектростанции мощностью 30 кВт синхронный генератор мощностью около 20 кВт, имеющий номинальную частоту вращения, меньшую в два раза расчетной частоты вращения ветротурбины (с учетом мультипликатора). В этом случае, при расчетной скорости ветра, ВЭС обеспечивает генерирование номинальной электрической мощности – 30 кВт при допустимом тепловом режиме генератора.

Сравнение массогабаритных показателей синхронных генераторов, например, ЕСС5-81-6 мощностью 20 кВт при частоте вращения 1000 об/мин и ЕСС5-82-4 мощностью 30 кВт при 1500 об/мин показывает, что генератор большей мощности весит 340 кг против 300 кг для генератора ЕСС5-81-6 [5].

Проведенные исследования показывают возможность выбора синхронного явнополюсного аэрогенератора для ВЭС на номинальную частоту

вращения в два раза меньшую частоты, соответствующей расчетному режиму ветродвигателя, и на номинальную мощность на 70 % меньшую расчетного номинального режима ВЭС. В результате снижения установленной мощности аэрогенератора по сравнению с расчетным режимом ВЭС его масса может быть снижена на величину до 10...15 %.

Недостатком режима работы синхронного генератора с выходным напряжением, пропорциональным частоте, является завышение напряжения по сравнению с номинальной величиной, определяемой соотношением мощностей ветродвигателя и генератора (рис. 1, б). Реализация оптимального закона изменения выходного напряжения генератора, при полном использовании мощности ветротурбины, достаточно просто осуществляется в ветроэлектростанции с регулированием мощности по цепи возбуждения генератора [6]. Отличительной особенностью предлагаемой ветроэлектростанции является возможность регулирования мощности, рассеиваемой в балластной нагрузке, за счет регулирования величины генерируемого напряжения аэрогенератора.

Принимая условия полной утилизации мощности ветротурбины, можно представить баланс мощности ВЭС в виде

$$P_6 = P_c = P_n + P_6,$$

где P_n и P_6 – мощность полезной и балластной нагрузки системы. Выражая мощность, рассеиваемую на активном балласте, через фазное напряжение генератора U_ϕ и величину фазного сопротивления балластной нагрузки R_6 , получаем уравнение баланса мощности станции

$$P_6 = P_c = P_n + \frac{3U_\phi^2}{R_6}.$$

Следовательно, оптимальный закон изменения фазного напряжения аэрогенератора может быть представлен выражением

$$U_\phi = \sqrt{(P_6 - P_n) \frac{R_6}{3}},$$

имеющим практическое значение при $P_6 > P_n$, с учетом входных характеристик выпрямительно-зарядного устройства ветроэлектростанции.

Кроме уменьшения массогабаритных показателей синхронного генератора ВЭС, выбор аэрогенератора с номинальной частотой вращения, меньшей расчетных номинальных оборотов ветротурбины, позволяет генерировать нормальное напряжение при скоростях ветра, значительно меньших расчетной величины. Тем самым достигается уменьшение диапазона изменения величины выходного напряжения аэрогенератора с регулируемым возбуждением. Последнее обстоятельство позволяет повысить КПД вторичных элементов преобразования энергии в ВЭС: выпрямительно-зарядного устройства и автономного инвертора.

Таким образом, выбор синхронного генератора для ветроэлектростанции в соответствии с приведенными в статье рекомендациями и построение электрической части ВЭС с автобалластной системой, регулируемой по цепи возбуждения генератора, позволяет улучшить массогабаритные и стоимостные характеристики электромашиной системы генерирования автономной энергоустановки и КПД ее преобразовательной части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветроэлектрические станции / Под ред. В.Н. Андрианова. – М.-Л.: ГЭИ, 1960. – 320 с.
2. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии / Под ред. В.И. Виссарионова. – М.: «ВИЭН», 2004. – 448 с.
3. Пат. на ПМ 45214 РФ. МПК⁷ H02P 9/04. Ветроэлектростанция с регулятором мощности балласта / Б.В. Лукутин, О.Б. Лукутин, Е.Б. Шандарова. Заявлено 23.11.2004; Опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12. – 5 с.: ил.
4. Радин В.И., Загорский А.Е., Манукян Л.А. Влияние повышения скорости вращения на мощность синхронного генератора // Известия вузов. Электромеханика. – 1973. – № 1. – С. 82–87.
5. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. – Р.-н/Д.: Феникс, 2004. – 480 с.
6. Пат. на ПМ 39431 РФ. МПК⁷ H02P 9/04. Ветроэлектростанция с регулированием мощности по цепи возбуждения генератора / Б.В. Лукутин, О.Б. Лукутин, С.Г. Обухов, Е.Б. Шандарова. Заявлено 31.03.2004; Опубл. 27.07.2004, Бюл. № 21. – 7 с.: ил.

Поступила 10.12.2007 г.