

В.В. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ "ХПИ"

Я.Р. КУЛИШ, студентка, НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С УЧЕТОМ ДИАПАЗОНА МОЩНОСТИ

Выбор типа генератора является основным вопросом комплектации ветроэнергетических установок. В настоящее время, независимо от мощности и вида крыльчатки, практически всегда в них устанавливают асинхронные генераторы. Расширение диапазона мощностей ветроустановок требует определения типа генератора с учетом этих параметров.

Ключевые слова: асинхронный генератор, ветроэнергетическая установка, энергия ветра.

Введение. Ограниченность и неравномерность распределения ископаемых энергоносителей по земному шару с каждым годом становится все более важным. Стоит вопрос о немедленном выявлении и практическом использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для решения энергетических проблем. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА) первичные энергоносители, или, как принято их называть, классические источники получения энергии, составляют сегодня основу электроэнергетики всех стран. По данным МЭА электростанции работают: на нефти – 38 %, на природном газе – 20 %, на угле – 27 %, что составляет 85 % от общей выработки энергоресурсов. Остальные 15 % приходится на АЭС и на электростанции, работающие от возобновляемых источников энергии. Повышению интереса к ВИЭ способствовало также подорожание с 70-х годов 20 века энергоносителей (особенно нефти), которое, в свою очередь, вызвало сокращение использования минеральных топливных ресурсов для выработки электроэнергии. Объем добычи и цены на энергоносители в значительной мере определяют тенденцию развития энергетики мира. Кроме того, тепловая и атомная энергетика вызывает значительные нарушения в окружающей природной среде, а увеличение масштабов производства электроэнергии на базе органического топлива может привести к глобальным экологическим последствиям для всей планеты. Все это способствует повышению интереса к ВИЭ.

Западная Европа быстрыми темпами развивает энергетику на возобновляемых и неисчерпаемых источниках – альтернативную энерге-

тику, ключевая роль в которой принадлежит ветроэнергетике, как самому дешевому способу получения энергии среди возобновляемых источников. Для Украины также наиболее перспективным направлением альтернативной энергетики является ветроэнергетика.

Рентабельность ветроэнергетической установки (ВЭУ), значение КПД зависят не столько от конструкции лопастей и другого оборудования, но от правильности выбора электрогенератора.

Цель исследований – проанализировать возможные типы электрических машин, которые можно использовать, как генераторы, преобразующие механическую энергию ветра в электроэнергию с учетом значения мощности ВЭУ.

Определение типа ветрогенератора. Для работы на единую энергосеть необходимы ВЭУ большой мощности, в несколько МВт. Для поддержания уровня жизни в мелких населенных пунктах и в единичных хозяйствах необходимо создавать системы малых энергоустановок. По опыту развитых стран известно, что суточная потребность семьи в сельской местности составляет до 2 кВт·час, достаточно крупного фермерского хозяйства – до 10 кВт, небольшой деревни (до 50 семей) – 50 кВт·час. Малая ветроэнергетика не требует больших территорий. Локальные ветроэнергетические установки (ВЭУ) могут быть установлены практически везде, где среднегодовая скорость ветра не менее 4-5 м/с, а для тихоходных многолопастных ВЭУ – не менее 3 м/с, [1].

К основным проблемам создания и эксплуатации ВЭУ относятся их эффективность, безопасность и надежность, влияние на окружающую среду, а к основным техническим решениям – выбор расчетных параметров ВЭУ, аэродинамического профиля ветроколеса, конструктивных и компоновочных решений основных узлов, методов и способов монтажа. Выбор расчетных параметров для каждой конкретной ветроустановки заключается в определении расчетной скорости ветра, единичной мощности и размеров ветроколеса, установленной мощности и типа электрической машины, определения системы регулирования, условий монтажа и эксплуатации ВЭУ. Таким образом, выбор типа генератора для ВЭУ следует отнести к важнейшим вопросам ветроэнергетики.

Определением типов генераторов для ВЭУ занимались многие известные ученые: Балагуров В.А., Вольдек А.И., Данилевич Я.Б., Ледовской А.Н., Завалишин Д.А., Сидельников Б.В. и др. Генератор является важнейшим элементом электрооборудования автономной энергоустановки. Кроме основного назначения генератор должен выпол-

нять определенные функции по стабилизации и регулированию параметров, характеризующих качество вырабатываемой электроэнергии.

Подобные работы ведутся учеными всего мира. В Греции (г. Афины) исследуют возможность использования асинхронизированного генератора двойного питания; в Великобритании (г. Ноттингем) – коммутируемый реактивный синхронный генератор; в Нидерландах и Шотландии исследуют управляемый реактивный синхронный генератор для безредукторной установки; в Японии (г. Хатинойе) – работу асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, оснащенного системой тиристорного управления реактивной мощностью в цепи статора и т.д. [2]. Но почти все генераторы этих типов в Украине не имеют баз производства и, при современном состоянии экономики, к промышленному выпуску могут быть предложены только после подробного анализа.

Необходима серьезная аргументация выбора типа генератора, т.к. выбор потребует значительных материальных вложений в организацию их производства: научных разработок, создания новых технологических процессов и оснастки, испытательных стендов, подготовки инженерно-технического персонала и рабочих. Поэтому для Украины, на наш взгляд, более приемлемо использование классических типов генераторов или генераторов специального, но более традиционного, исполнения, что тоже является определяющим фактором выбора типа генератора.

Для применения на ВЭУ возможны следующие типы генераторов:

- 1) асинхронные генераторы с к.з. ротором;
- 2) синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением;
- 3) асинхронизированный синхронный генератор;
- 4) асинхронные генераторы с фазным ротором;
- 5) синхронные генераторы (СГ) с магнитоэлектрическим возбуждением, т.е. с возбуждением от постоянных магнитов.
- 6) Специальные СГ: индукторные СГ, генераторы с когтеобразным ротором и некоторые другие.

Каждый из указанных типов генераторов имеет преимущества и недостатки. Приведем краткий перечень этих факторов для каждого типа машин, табл.

Таблица – Сравнение разных типов генераторов для ВЭУ

№ пп	Тип генератора	Преимущества	Недостатки
1	АГ с к.з. ротором	<p>1) простота и надежность в обслуживании;</p> <p>2) невысокая стоимость;</p> <p>3) имеют сравнительно малые колебания генерируемой мощности, электромагнитного момента и тока при параллельной работе и при переменной скорости ветра и его порывах.</p> <p>4) возможно устанавливать безредукторные установки с хорошими массогабаритными показателями, высоким КПД и возможностью регулировать напряжение и его частоту в широких пределах.</p>	<p>1) необходимость установления редукторов, т.к. используют дешевые тихоходные турбины (с частотой вращения 20-30 об/мин). Поэтому генератор присоединяют через редуктор с высоким коэффициентом преобразования ($K_{ред}=50-70$), что требует дополнительных расходов на установку, обслуживание, ремонт, снижает надежность, является источником механического шума.</p> <p>2) невозможно управлять режимными параметрами, что необходимо при порывистом ветре;</p> <p>3) для работы в автономном режиме необходим автономный источник реактивной мощности;</p> <p>4) ограничение в промышленном применении из-за искаженной формы выходного напряжения и неудовлетворительных динамических свойств.</p>
2	СГ с магнитоэлектрическим возбуждением	<p>1) исключение скользящего контакта,</p> <p>2) высокая надежность работы,</p> <p>3) высокое значение КПД.</p>	<p>1) необходимость в приобретении дорогих постоянных магнитов, технология которых до конца в Украине не отработана.</p> <p>2) постоянство магнитного потока, невозможность его регулировать.</p> <p>3) высокая стоимость.</p> <p>4) отсутствие отечественной базы производства.</p>

№пп	Тип генератора	Преимущества	Недостатки
3	АГ с фазным ротором	<p>1) Возможно использовать в автономных системах в сочетании с другими машинами. Возможно каскадное соединение двух АГ или соединение АГ и ДПТ с параллельным возбуждением.</p> <p>2) простота в обслуживании;</p> <p>3) надежность,</p> <p>4) имеют сравнительно малые колебания генерируемой мощности, электромагнитного момента и тока при параллельной работе, при переменной скорости ветра и его порывах.</p>	<p>1) необходимость установления редукторов, т.к. используют дешевые тихоходные турбины (с частотой вращения 20-30 об/мин). Необходим редуктор с высоким коэффициентом преобразования ($K_{ред}=50-70$), что требует дополнительных расходов на установку, обслуживание, ремонт, снижает надежность, является источником механического шума.</p> <p>2) невозможно управлять режимными параметрами, что бывает необходимо при порывистом ветре;</p> <p>3) в автономном режиме необходим автономный источник реактивной мощности;</p> <p>4) ограничение в промышленном применении из-за искаженной формы выходного напряжения и неудовлетворительных динамических свойств.</p> <p>5) наличие скользящего контакта, что снижает надежность.</p>
4	Специальные СГ с магнитоэлектрическим возбуждением	<p>1) исключение скользящего контакта;</p> <p>2) просты и удобны в эксплуатации, высокое КПД;</p> <p>3) сохраняют устойчивые рабочие характеристики на протяжении не менее десяти лет.</p>	<p>1) необходимость в приобретении дорогих постоянных магнитов, технология которых до конца в Украине не отработана;</p> <p>2) постоянство магнитного потока, т.е. невозможность его регулировать;</p> <p>3) высокая стоимость генераторов;</p> <p>4) отсутствие отечественной базы производства</p>

№пп	Тип генератора	Преимущества	Недостатки
5	СГ с электромагнитным возбуждением	<p>1) При применении преобразователя с явным звеном постоянного тока и инвертором напряжения при широтно-импульсном управлении, возможно получить в токе низкий состав гармоник, улучшение динамических свойства объекта;</p> <p>2) возможность управления реактивной мощностью с генераторной стороны.</p>	<p>1) выше стоимость, сложнее конструкция, ниже надежность, чем у АМ;</p> <p>2) наличие скользящего контакта и необходимость источника постоянного тока для обмотки возбуждения;</p> <p>3) при необходимости безредукторной установки усложняется конструкция, увеличивается вес и цена;</p> <p>4) жесткая зависимость частоты ЭДС от скорости вращения. Это ограничивает, а в регионах с резкими порывами ветра делает невозможным, использование СГ для прямого включения в сеть без ППЧ.</p> <p>5) Для обеспечения параметров тока и напряжения с допустимыми техническими характеристиками необходимо применять преобразователи с явным звеном постоянного тока и инвертором напряжения.</p>
6	Асинхронизированный синхронный генератор	<p>1) Возможно использовать в автономных системах в сочетании с другими машинами. Возможно каскадное соединение с АГ или соединение с АГ и ДПТ с параллельным возбуждением.</p> <p>2) Большая устойчивость.</p>	<p>1) наличие на роторе скользящего контакта для подвода напряжения к обмотке возбуждения ротора и необходимость в преобразователе частоты для регулирования напряжения возбуждения;</p> <p>3) при отклонении скорости от синхронной требуется значительное увеличение реактивной мощности и напряжения в обмотке возбуждения.</p> <p>4) при приближении скольжения к нулю и несинусоидальности в выпрямителе, питающем обмотку возбуждения, в напряжении генератора возникают значительные субгармоники, а при параллельной работе и регулировании напряжения по величине и фазе скольжения, в вырабатываемом напряжении возникают пульсации, практически повторяющие пульсации момента ветротурбины</p>

Направление ветра обычно не столь существенно с точки зрения эффективности работы ВЭУ. Однако в различных ландшафтах ветры разных румбов имеют неодинаковую порывистость и скорость. Их повторяемость определяют по розе ветров. Угловые градиенты скорости существенно влияют на работу механизмов автоматической ориентации и на величину гироскопических нагрузок. Мощность ВЭУ:

$$P = C_P \cdot \frac{\rho v^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_{мех}, \text{ Вт.} \quad (1)$$

Согласно мнению многих исследователей, (EWEA, 1991; Андерсон, 1992, *Beurskens and Jensen*, 2001), если известно среднее значение скорости ветра на площадке установки ветротурбин, то для ориентировочного расчета количества вырабатываемой электроэнергии в год (Э, кВт·час) используем формулу:

$$\text{Э} = K \cdot V_m^3 \cdot A_t \cdot N; \text{ кВт·час,} \quad (2)$$

где $K = 3,2$ – численный коэффициент, полученный для типичных характеристик работы ветрогенератора, знания приблизительного значения средней скорости и частоты изменения скорости ветра; V_m – среднегодовая скорость ветра через сечение поверхности, образуемой лопастями ветротурбины, м/с; A_t – сечение поверхности, образуемой лопастями ветротурбины, м²; N – число ВЭУ, шт.

Вырабатываемая генератором активная мощность P прямо пропорциональна КПД генератора и ветроустановки, зависит от плотности воздуха, которая изменяется сезонно и зависит от давления и температуры, коэффициента мощности ветроустановки C_P , а также находится в кубической зависимости от скорости ветра v и в квадратичной зависимости от диаметра ветроколеса D .

При рассмотрении энергетических соотношений условимся пренебрегать потерями в системах и примем коэффициент мощности $\cos\varphi = \text{const}$. Уравнения баланса мощностей для автономной системы электроснабжения с асинхронным генератором с самовозбуждением при включении конденсаторов в цепь статорной обмотки представим в виде:

$$m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I \cdot \cos\varphi_1. \quad (3)$$

Запишем далее уравнения баланса реактивных мощностей при активно-индуктивной или активной нагрузке и при использовании в генераторной установке только шунтирующих конденсаторов или шунтирующих и компаундирующих конденсаторов.

$$m_1 \left[\frac{I_k^2}{\omega_1 \cdot C} - I^2 \cdot \omega_1 \cdot L \right] = Q_{AG}; \quad (4)$$

$$m_1 \cdot \frac{I_k^2}{\omega_1 \cdot C} = Q_{AG}; \quad m_1 \cdot \frac{I_k^2}{\omega_1 \cdot C} + m_1 \cdot I^2 \cdot \left[\frac{1}{\omega_1 \cdot C_k} - \omega_1 \cdot L \right] = Q_{AG};$$

$$\frac{m_1}{\omega_1} \cdot \left[\frac{I_k^2}{C} + \frac{I_k^2}{C_k} \right] = Q_{AG};$$

где I_1, I, I_k – токи фазы генератора, нагрузки и шунтирующих конденсаторов, А; ω_1 – угловая частота напряжения генератора; L – индуктивность фазы нагрузки; C, C_k – емкость шунтирующих и компаундирующих конденсаторов; φ_1, φ – фазовые углы сдвига генератора и нагрузки; m_1 – количество фаз генератора; $m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 = P_{эм}$ – электромагнитная мощность генератора, Вт; Q_{AG} – реактивная мощность генератора, определяемая из соотношения:

$$m_1 U_1 \cdot I_1 \cdot \sin\varphi_1 = Q_{AG}$$

Уравнения баланса реактивной мощности применимы для автономной системы лишь в том случае, если для выравнивания частоты у потребителей автономной системы не применяется вставка выпрямитель-инвертор. Если данная вставка есть, то балансы реактивной мощности составляются отдельно для АГ с целью его возбуждения и для автономной электрической сети с целью обеспечения прилежного качества электроэнергии путем компенсации реактивной мощности.

При совместной параллельной работе генераторов на активно-индуктивную нагрузку их активные мощности суммируются, а реактивная мощность системы становится равной суммарной реактивной мощности шунтирующих и компаундирующих конденсаторов.

Для работы любой асинхронной машины в генераторном режиме необходим источник реактивной мощности. Значение емкости, необходимой для возбуждения генератора при данной частоте:

$$C = \frac{1}{\left[(2\pi \cdot f_1)^2 \cdot (L_1 + L_m) \right]}$$

где L_1 и L_m – соответственно индуктивность обмотки статора и намагничивающего контура генератора, Гн.

В общем случае, емкость, необходимая для получения напряжения на генераторе при значении нагрузки, определяется:

$$Q_C = m_1 U_c^2 / X_C = Q_r + Q_n = P_r \cdot \operatorname{tg}\varphi_r + P_n \cdot \operatorname{tg}\varphi_n, \text{ вар.}$$

Принимая $P_r = P_n = P_{ном}$ и выражая

$$X_C = 1 / (\omega_1 C) = 1 / (2\pi f_1 C), \text{ Ом,}$$

получим окончательное значение емкости, необходимой для работы асинхронного генератора с переменной частотой вращения приводного

двигателя:

$$C = P_{\text{ном}} \cdot (\text{tg}\varphi_r + \text{tg}\varphi_n) / (2\pi f_1 \cdot m_1 \cdot U_c^2), \Phi.$$

где $P_{\text{ном}}$ – мощность, отдаваемая генератором, Вт; U_c – напряжение на конденсаторах, В; f_1 – частота вырабатываемого тока, Гц; φ_r и φ_n – углы сдвига фаз между напряжением $U_r = U_c$ и токами генератора и нагрузки.

Автономные АГ целесообразно использовать при значениях

$$n_r / n_{\text{ном}} \geq 0,9.$$

При меньших n_r требуемая емкость быстро возрастает и генератор почти полностью загружается реактивным током.

Из уравнения (4) – баланса реактивной мощности для активно-индуктивной нагрузки, – можно найти зависимость угловой частоты вращения вектора напряжения: $f = \omega_1 / (2\pi)$ с частотой f в сети.

АГ допускают относительно простую параллельную работу в отличие от синхронных генераторов, (СГ), требующих при параллельном включении строгой синхронизации частоты вращения. У параллельно работающих АГ частоты вращения могут различаться, при этом в общей цепи статорных обмоток создается ток такой частоты, которая соответствует резонансу в полной эквивалентной схеме, включающей, помимо цепи нагрузки и конденсаторной батареи, цепи объединенных статорных и роторных обмоток генераторов с соответствующими активными и реактивными сопротивлениями.

АГ находят ограниченное применение в относительно маломощных источниках тока в автономных энергоустановках. При некоторых условиях возможна работа в режиме АГ мощных турбогенераторов. Перспективы совершенствования АГ и их более широкого внедрения связаны с проводимой в настоящее время разработкой высокоэффективных легких конденсаторов.

Выводы. 1. Многие страны последние 20-25 лет уделяют особое внимание развитию нетрадиционных способов получения энергии, и в частности, использованию энергии ветра. Расширение использования ВЭУ может идти в направлениях:

– обеспечение электроэнергией различных малых объектов. Мощность таких ВЭУ должна быть в пределах 25-100 кВт;

– обеспечение совместной работы с существующими энергосистемами традиционной энергетики. Мощность таких ВЭС может определяться в интервале 3-15 МВт;

– снабжение электроэнергией промыслов нефтегазовой отрасли, удаленных от центральных систем энергоснабжения. Для этих целей пригодны передвижные и стационарные ВЭУ мощностью 100-1000 кВт.

2. Установлено, что в автономных электрических сетях, при использовании ВЭУ мощностью до 200 кВт, рекомендуется применение синхронных генераторов (СГ) с постоянными магнитами (СПМ), которые имеют преимущества по надежности, экономическим показателям и КПД. Этому способствует создание нового поколения постоянных магнитов с высокими технико-экономическими показателями, имеющих высокую коэрцитивную силу и возможность долго ее сохранять. Такие магниты позволяют получить в рабочей зоне (воздушном зазоре) значение магнитной индукции до 0,8-0,9 Тл, что в некоторых случаях даже превышает значение индукции, получаемое при электромагнитном возбуждении.

3. Классические по конструкции СГ с электромагнитным возбуждением устанавливаются на установках либо малой, либо очень большой мощности. Технология изготовления и опыт расчета таких машин позволяет устанавливать мощные безредукторные установки (мощностью до 2 МВт) с хорошими массогабаритными показателями, высоким КПД и возможностью регулировать напряжение в широких пределах за счет изменения тока возбуждения.

4. У СГ существует жесткая зависимость частоты генерируемой ЭДС от скорости вала. Если ветер нестабилен, то в генераторе появляются высокие значения переменных составляющих в режимных параметрах, ухудшается работа таких генераторов параллельно с сетью. Это ограничивает, а в регионах с резкими порывами ветра делает невозможным, использование СГ для прямого включения в сеть. При такой работе между генератором и сетью устанавливают полупроводниковый преобразователь частоты.

5. Асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ) находятся скорее в стадии разработки, чем в стадии промышленного применения. У АСГ к симметричному в магнитном отношении ротору, через три кольца, к трехфазной (иногда, двухфазной) обмотке возбуждения подводят напряжение, величина и фаза которого изменяется пропорционально скольжению. Регулирование напряжения возбуждения осуществляется за счет преобразователя частоты.

6. Несмотря на внимание к вопросам ветроэнергетики в целом и, в частности, к генераторам ВЭУ, окончательного ответа на вопрос об оптимальном типе генератора для каждого отрезка достигнутых мощностей нет.

Список литературы. 1. Сидельников Б.В. Современное состояние и сравнительный анализ конструктивных схем ветрогенераторов. // Вестник Щецин-

ского технического университета, Польша, 2001. 2. *Ass Ext., Hall D. Renewable Energy. Power for a Sustainable Future.* // Oxford Unit. Press, 1996. – 478 p. 3. *Шевченко В.В., Лизан И.Я.* Проблемы, перспективы и основные направления развития экологически чистых источников электроэнергии в Украине // *Якість технологій та освіти. Збірник наукових праць.* – Вип. 1. – Х.: УПА, 2011. – С. 77-87.

Поступила в редколлегию 22.10.2013

УДК 621.311.245

Анализ возможности использования разных типов генераторов для ветроэнергетических установок с учетом диапазона мощности / Шевченко В.В., Кулиш Я.Р. // *Вісник НТУ "ХПИ".* Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – № 65 (1038). – С. 107-117. *Бібліогр.:* 3 назв.

Вибір типу генератора є основним питанням комплектації вітроенергетичних установок. В даний час, незалежно від потужності і виду крильчатки, практично завжди в них встановлюють асинхронні генератори. Розширення діапазону потужностей вітроустановок вимагає визначення типу генератора з урахуванням цих параметрів.

Ключові слова: турбогенератор, вітроенергетична установка, діапазон потужності.

Select of the generator type is a major issue in the preparation of the complete set of wind-driven power plants. Currently, independently on the power and type of impeller, practically always asynchronous generators are mounted in them. Extending the wind-driven power plants' power range requires determining the type of generator taking these parameters into account.

Key words: type of generator, wind-driven power plant, power range.



Шевченко Валентина Владимировна, к.т.н., доцент, доцент кафедри "Електрические машины" НТУ "ХПИ". В 1977 г. в ХПИ защитила диплом инженера-физика. В 1981 защитила диссертацию в Ленинградском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты. Область научных интересов электроэнергетика, оптимизация параметров и технических характеристик турбогенераторов, нетрадиционная энергетика, сверхпроводимость.



Кулиш Яна Романовна, студентка электромашиностроительного факультета, группы ЭМС-11А НТУ "ХПИ". Область интересов – электроэнергетика от возобновляемых источников, ветроэнергетика, конструкции и эксплуатация ветрогенераторов.