УДК 621.311.001.57



С. Н. Удалов, А. А. Ачитаев

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

ИННОВАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕГУЛИРОВОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА

Рассматриваются альтернативные способы управления подъёмной силой турбины ветроэнергетической установки, позволяющие дополнительно повысить регулировочное действие и, таким образом, обеспечить выработку электрической энергии в момент разгона ветроэнергетической установки и ограничение выработки в момент сильных порывов ветра. Представлена математическая модель, позволяющая моделировать физические условия, возникающие в каждом из устройств.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, подъёмная сила, аэродинамические устройства, плазменный привод, форсуночный привод.

S. N. Udalov, A. A. Achitaev

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

INNOVATIVE SYSTEMS IMPROVE THE ADJUSTMENT CAPACITY OF THE WIND POWER PLANT WITH VARIABLE SPEED WIND

This paper discusses alternative ways to control the lifting force of the wind power plant turbines, allowing further increase the effect of the adjustment. Thus to ensure the production of electricity at the time of dispersal of the wind power plant and limited production at the time of strong winds. The mathematical model can simulate the physical conditions that occur in each of the devices.

Key words: wind power plant, lift force, aerodynamic devices, plasma drive, jet drive.

Переменная мощность ветряных электростанций – проблема, которую приходится решать при подключении ветрогенератора к сети. Скорость ветра может меняться от нескольких раз в сутки до нескольких раз в час, что приводит к нерегулярности выходной мощности такой электростанции. Этот недостаток приходится компенсировать либо с помощью дорогостоящих систем, аккумулирующих энергию в периоды высокой активности и отдающих ее в моменты затишья, либо с помощью других источников энергии. Это значительно повышает себестоимость электроэнергии.

Поиск и разработка средств регулирования мощности турбины ВЭУ развивается с каждым годом. Новым направлением в обеспечении энергоэффективного регулирования мощности турбины является применение форсуночного привода на сжатом газе и плазменных устройств, расположенных по поверхности лопасти.

Большие ветряные турбины даже с очень хорошими ресурсами ветряной энергии обычно генерируют электроэнергию около 30 % времени из-за изменения скорости ветра

[©] Удалов С. Н., Ачитаев А. А., 2014



Рис. 1. Дополнительные устройства аэродинамического регулирования подъёмной силы: *а* – струйный привод форсуночного действия; *б* – плазменное устройство

до слишком низких значений. Использование дополнительного источника энергии для вращения генератора турбины позволяет более эффективно использовать оборудование, а значит, быстрее возвращать вложенные инвестиции, удешевляя энергию для конечного потребителя.

Турбина SmartGen, разработанная компанией HybridTurbines, является хорошо масштабируемой системой и может быть установлена как на небольшие, мощностью от 3 до 100 кВт, так и на гигантские морские ветряки мощностью до 4 МВт [1].

Кроме стабилизации выходной мощности ветряной турбины подаваемый сжатый воздух будет поддерживать постоянную температуру, охлаждая компоненты генератора.

Эта система позволяет сохранить избыточную энергию, производимую ветряком, в виде сжатого воздуха и использовать её в часы пиковых нагрузок для раскрутки турбины.

Безусловно, анализ ситуации вокруг данной технологии необходим. Нами была разработана математическая модель каждого из устройств, позволяющая провести анализ профиля лопасти и размещение этих устройств и влияние на подъёмную силу.

Математическое моделирование

Уравнение Навье – Стокса, описывающее процессы аэродинамического взаимодействия [2]:

$$\rho \cdot \partial u / \partial t + \rho (u \cdot \nabla) u =$$

= $\nabla \cdot \left[-p \cdot I + \eta \left(\nabla u + \left(\nabla u \right)^T \right) \right] + F \nabla \cdot u = 0,$ (1)

где u – скорость ветра, м/с; p – давление, Па; η – кинематическая вязкость, Па·с; F – сила давления, Н.

Расчёт подъёмной силы в условии реактивного истечения газа следует вести на основании динамики реактивного движения Мещерского. Подъёмная сила, развиваемая лопастью при воздействии ветрового потока, со скоростью υ представлена формулой (1):

$$m\frac{d\upsilon}{dt} = \frac{1}{2}\pi R^2 \rho \upsilon^2 C_L + u\frac{dm}{dt},$$
 (2)

где $F_p = u \frac{dm}{dt}$ называется реактивной силой, она воздействует на лопасть при истечении массы воздуха из сопла форсунки.

Средствами метода конечных элементов разработаем математическую модель данного варианта турбины с учётом действия форсуночного привода.

Моделирование процессов, происходящих в турбине, проводилось на базе метода конечных элементов и расчёта динамики потока computer fluid dynamic (CFD), позволяющего проанализировать физические процессы при влиянии дополнительных устройств на подъёмную силу. Аэродинамические свойства лопастей с активными аэродинамическими устройствами предусмотрены использованием специального алгоритма ARC2D, который применяется для анализа моделирования ламинарного течения [2]. За основу программного средства был взят комплекс ANSYS для анализа CFD. Алгоритмы ARC2D на основании решения двумерных уравнений Навье – Стокса [2] были использованы для расчёта аэродинамических коэффициентов подъёмной силы и лобового сопротивления. Использование CFD позволяет последовательно определить изменения в аэродинамической производительности при выбранном профиле лопасти и его изменений, связанных с активными аэродинамическими устройствами [2].

График, изображённый на рис. 3, показывает зависимость подъёмной силы от скорости газа в форсунке. В зависимости от скорости ветра с помощью струйного привода возможно условие, когда значение подъёмной

С. Н. Удалов, А. А. Ачитаев

Инновационные системы повышения регулировочной способности ветроэнергетической установки

силы способно поддерживаться постоянным даже при достаточно низкой скорости ветра. Учтём, что работа ВЭУ в режиме ограничения мощности осуществляется с помощью балластных сопротивлений, которые являются неэффективными и затратными. Исходя из этого, следует, что при использовании компрессора в качестве балласта можно реализовать на практике струйный способ управления турбиной. Такой подход позволит сократить время выхода ветроустановки в режим номинальной мощности и обеспечить постоянство скорости вращения ветроколеса.

Плазменное устройство

Одно из технических направлений, которое имеет экспериментальное подтверждение возможности повышения регулировочной способности турбины ветроэнергетической



Рис. 2. Результаты моделирования действия струйного привода на лопасть



Рис. 3. Результаты моделирования влияния скорости истечения форсуночного привода на подъёмную силу при различной величине скорости ветра



установки, является технология плазменного привода, основанного на движении ионизированного воздуха по поверхности лопасти. Физический принцип основан на управляемом разделении воздушного потока по поверхности лопасти. Плазменным приводам уделяется значительное внимание в последние годы, как практическим устройствам управления воздушным потоком, из-за их преимуществ над струйными и механическими устройствами [3]. Они способны напрямую конвертировать электрическую энергию в кинетическую, которая используется для изменения скорости воздушного потока. Эти устройства имеют преимущества над механическими приводами: устройства простые, легковесные и не используют движущихся частей, кроме того, они не являются источниками вибраций или шума. В отличие от струйных устройств плазменные приводы не требуют источника газа высокого давления. Следовательно, нет необходимости в запасании сжатого газа и прокладке каналов по длине лопасти. Исследования также показали, что присутствие электродов не влияет на окружающий воздушный поток, когда они неактивны и не требуются значительные изменения в лопасти турбины для их установки. Другим преимуществом плазменных устройств является возможность их проектирования так, чтобы работать со направленным потоком и в условиях против направленности, что даёт большую альтернативу при управлении локализованным потоком.

На рис. 4 показан один из способов образования коронного разряда постоянным током по поверхности лопасти.

Моделирование плазменного устройства

На рис. 5 показано сечение аэродинамического профиля. При обтекании профиля потоком на него действует аэродинамическая сила, которую можно разделить на две составляющие: подъёмную силу и силу сопротивления. Подъёмная сила действует на профиль перпендикулярно направлению скорости натекания потока u_0 . Сила сопротивления совпадает с направлением вектора скорости натекающего потока. Эти силы обозначаются F_L и F_D соответственно. Угол между направлением скорости натекающего потока и хордой профиля является углом атаки α .



Рис. 5. Векторная диаграмма скоростей воздушного потока при набегании его на элемент лопасти

Рассматриваемые давления соотносятся со значением динамического давления, поэтому можно выделить коэффициент пропорциональности C_L (коэффициент подъёмной силы) [4]:

$$\rho_{\rm L} = \frac{1}{2} \rho u_0^2 C_{\rm L}, \qquad (3)$$

где р – плотность воздуха 1,223 кг/м³; u_0 – скорость ветра, м/с; С_L – коэффициент подъёмной силы.

Средствами программного пакета ElCut был представлен расчёт влияния поверхностного коронного разряда постоянного тока на лопасть ВЭУ [5].



Рис. 4. Схематическая точка зрения на привод коронного разряда постоянного тока (*a*); 2д-визуализация управляемого воздушного потока вдоль плоской пластины (б)

Существующая версия ElCut не предусматривает решение задач гидро- и газодинамики. Тем не менее его можно использовать для решения некоторых из них. Это связано с тем, что основные уравнения, с помощью которых исследуют ламинарное течение газов и жидкостей, совпадают с уравнениями теории упругости и теплопроводности (диффузии) [6].

Ионизированный газ создаёт дополнительное давление и в свою очередь оказывает влияние на подъёмную силу. Разница создаваемого давления между воздухом и ионизированным газом описывается уравнением идеального газа Менделеева – Клайперона:

$$\Delta p = \mathbf{R}T\left(\frac{\rho}{\mu} - \frac{\rho_0}{\mu_0}\right),\tag{4}$$

где R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К); μ , μ_0 – молярные массы воздуха и озона соответственно; T – температура воздуха, К; ρ , ρ_0 – плотности воздуха и озона соответственно, кг/м³.

Электрический заряд частицы озона, находящейся в электростатическом поле, определяется уравнением

$$q = 4\pi\varepsilon_0 r\phi_0, \tag{5}$$

где *r* – расстояние от частицы до рассматриваемой точки в пространстве; *q* – электрический заряд частицы; ε – диэлектрическая постоянная, равная 8,85·10⁻¹² Ф/м; ϕ_0 – электрический потенциал.

В плазме частица озона окружена другими заряженными частицами. Благодаря кулоновскому притяжению вблизи частицы преобладают частицы плазмы, заряды которых противоположны по знаку заряду *q*. Они ослабевают (экранируют) поле частицы в плазме. Как известно, потенциал ф поля заряда *q* в плазме убывает с расстоянием *r* значительно быстрее, чем в вакууме:

$$q = \frac{4\pi\varepsilon_0 r\phi}{e^{-r/D}},\tag{6}$$

где *D* – дебаевский радиус экранирования, определяемый по формуле

$$D = \sqrt{\varepsilon_0 kT / (2n_0 e^2)}, \qquad (7)$$

где *k* – коэффициент Больцмана, равный 1,38·10⁻³⁴ Дж/К; *T* – температура; *n*₀ – концентрация заряженных частиц.

Для анализа электростатического поля был использован метод конечных элементов ElCut [5]. Электростатические задачи описываются уравнением Пуассона относительно скалярного электрического потенциала U(E = -gradU, где E – вектор напряжённости электрического поля).

Уравнение имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho_V, \qquad (8)$$

где $\varepsilon_{x^2}, \varepsilon_{y}$ – компоненты тензора электрической проницаемости; ρ_{v} – плотность электрического заряда.

На рис. 6 представлено сечение стандартного профиля лопасти ВЭУ, где получен результат моделирования поля напряжённости электростатического поля с областью высокой концентрации силовых линий и величины напряжённости, что вызывает коронный разряд.

Расчёт механических деформаций проведён в пакете ElCut. Комплекс может решать задачи теории упругости в постановках плоских напряжений, плоских деформаций и осесимметричного напряжённого состояния с изотропными или ортотропными свойствами материалов. В плоской постановке поле перемещений однозначно определяется двумя компонентами вектора перемещений б в каждой точке [5]:

$$\left\{\delta\right\} = \begin{cases} \delta_x \\ \delta_y \end{cases},\tag{9}$$

где δ_x, δ_y – компоненты тензора механических перемещений; { δ } – вектор перемещения.

Деформация связана с перемещением соотношением

$$\left\{\varepsilon\right\} = \left\{\begin{matrix}\varepsilon_{x}\\\varepsilon_{y}\\\gamma_{xy}\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}\frac{\partial\delta_{x}}{\partial x}\\\frac{\partial\delta_{y}}{\partial y}\\\frac{\partial\delta_{x}}{\partial y} + \frac{\partial\delta_{y}}{\partial x}\end{matrix}\right\}.$$
 (10)

Соответствующее ей напряжение выражается как



Рис. 6. Результат расчёта распределения напряжённости электрического поля по поверхности лопасти при действии поверхностного коронного разряда постоянного тока

$$\{\sigma\} = \begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases}, \qquad (11)$$

где $\{\sigma\}$ – вектор механической напряжённости; $\sigma_x, \sigma_y; \sigma_z$ – компоненты тензора механических деформаций.

Уравнения статического равновесия для плоских задач имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -f_x \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = -f_y \end{cases}, \quad (12)$$

где f_x , f_y – компоненты вектора плотности объёмной силы.

Расчёты f_y составляющей позволяют определить величину подъёмной силы.

Скорость ветра задаётся граничным условием и является величиной постоянной. В формате задач напряжений скорость ветра формируется через параметр давления по соответствующей формуле[4]:

$$\rho = \frac{\rho u_0^2}{2}, \qquad (13)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; u_0 – скорость ветра, м/с.

На рис. 7 представлен результат полевого расчёта механических деформаций, оказывающих влияние на лопасть при скорости ветра 15 м/с.

На рис. 8 изображены результаты расчётов зависимости подъёмной силы лопасти от угла атаки, на котором проиллюстрирован эффект повышения регулировочной способности подъёмной силы лопасти ВЭУ при использовании поверхностного коронного разряда постоянного тока по его поверхности. При работе плазменного устройства в верхней части лопасти можно наблюдать ограничение подъёмной силы, что было экспериментально исследовано в [7; 8].

Таблица 1

Достоинства и недостатки плазменного и струйного приводов

Плазменный привод	Струйный привод
Достоинства	
Возможность применения на любом виде ВЭУ	Широкий регулировочный диапазон изменения подъёмной силы
Низкие затраты на обслуживание и ремонт	Возможность работы турбины при скорости ветра выше 25 м/с
Простота монтажа	Требуется воздушный компрессор и может быть размещён на любом типе ВЭУ
Недостатки	
Неуправляемая граница срыва воздушного потока	Высокие капитальные вложения и требование специальных лопастей
Сложность эксплуатации	Специальные требования при эксплуатации и ремонте

ИССЛЕДОВАНИЯ

Инновационные системы повышения регулировочной способности ветроэнергетической установки



Рис. 7. Результат расчёта распределения механической напряжённости



Рис. 8. Сравнительная характеристика зависимости подъёмной силы лопасти ВЭУ от угла атаки

Этот режим полезен, когда речь идёт об ограничении мощности, вызванной режимом работы ВЭУ в третьей зоне энергетической характеристики.

Работа плазменного привода в нижней части лопасти даёт повышение подъёмной силы, и как следствие повышается мощность турбины. Этот режим плазменного привода необходим при работе во второй зоне работы ВЭУ, где требуется быстрое достижение номинальной вырабатываемой мощности.

В табл. 1 представлены основные достоинства и недостатки плазменного устройства и струйного привода форсуночного действия. Из анализа результатов следует, что подъёмная сила зависит от скорости истечения газа из форсунки, которая имеет область положительных и отрицательных значений. При этом возрастает на 40 % регулировочная характеристика ветровой турбины. Это даёт возможность управления подъёмной силой в режиме ограничения мощности, когда использование традиционных способов управления (изменение угла атаки лопасти и увеличение механического момента генератора) не позволяет достичь цели.

На основании математического моделирования по применению поверхностного коронного разряда постоянного тока на лопа-



сти ВЭУ были получены следующие результаты [9]:

- Увеличен по сравнению с обычным режимом регулировочный диапазон (до 25 %) при постоянном угле атаки лопасти, что позволяет ветроэнергетической установке достигать требуемых значений параметров управления с большей регулировочной способностью;
- При работе ВЭУ в режиме ограничения мощности наличие плазменного привода позволит управлять мощностью, не изменяя угол атаки, что является превалирующим фактором в проблеме повышения запаса регулировочной способности.

Библиографические ссылки

- Электронный ресурс. Режим доступа: http://www. smartplanet.com/blog/intelligent-energy/hybrid-turbine-for-when-the-wind-doesnt-blow/2496. – Загл. с экрана.
- Pulliam T. H. Efficient Solution Methods for the Navier-Stokes Equations. Lecture Notes for the von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series: Numerical Techniques for Viscous Flow Computation in Turbomachinery Bladings, von Karman Institute, Rhode-St-Genese, Belgium, 1986.
- Active Load Control Techniques for Wind Turbines: Sandia report sand 2008-4809 / Scott J. Johnson, C.P. "Case" van Dam and Dale E. Berg. – Prepared by

Sandia National lab Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore California 94550. – (Unlimited Release Printed. August 2008).

- 4. Альдо В. да Роза. Возобновляемые источники энергии: физико-технические основы. М. : Издательский дом «Интеллект», МЭИ, 2010. 704 с.
- 5. ElCut: программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.elcut.ru. – Загл. с экрана.
- Вишняков Е. М., Хвостов Д. А. Применение ELCUT для моделирования течений газа, а также подъёмной силы крыла [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.elcut.ru/. [Дата обращения: 7 февраль 2014].
- 7. Moreau, E. Airflow Control by Non Thermal Plasma Actuators // Journal of Phys. D, 40: 605–636, 2007.
- Moreau E., Benard N., Jolibois, M. and Touchard G. Airflow Control by Plasma Actuators : Last Significant Results at the University of Poitiers. 2nd European Conference for Aerospace Sciences, 2007.
- Удалов С. Н., Манусов В. З., Ачитаев А. А. Технология повышения регулировочной способности подъёмной силы в режиме ограничения мощности ветровой турбины средствами плазменной технологии // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323, № 4. С. 158–162.

Статья поступила в редакцию 22.05.2014 г.