

УДК 681.518.54

В.Ф. Миргород

ОАО «Элемент», г. Одесса, Украина

УПРАВЛЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ПО ЗАПАСАМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

На основе математической модели динамических режимов ветроэнергетической установки турбогенераторного типа решена задача управления по гарантированным запасам аэродинамической устойчивости, что обеспечивает улучшение энергетических и экономических характеристик. Выполнена компьютерная реализация разработанных математических моделей с использованием записей реального ветра. Рассмотрены два основных режима работы: автономный режим работы ветроэнергетической установки, а также режим работы параллельно с сетью бесконечной мощности.

Ключевые слова: ветроэнергетика, динамика, система управления, моделирование, устойчивость.

Введение

Проблема использования возобновляемых источников энергии является актуальной и важной для народнохозяйственного комплекса Украины. Наряду с выпуском относительно маломощных ветроэнергетических установок (ВЭУ) в настоящее время наблюдается переход к созданию экономичных крупных агрегатов единичной мощностью (1,0...4,0) МВт. Лидером отрасли является ПКТБ «Конкорд» (г. Днепропетровск), коллективом которого создана ВЭУ турбогенераторного типа мощностью 0,75 МВт (рис. 1) и проектируется ВЭУ мощностью более 1 МВт. Комплекс информационно-измерительных и управляющих систем для ВЭУ создан в ОАО «Элемент» (г. Одесса). Новый тип энергетических объектов требует разработки соответствующих алгоритмов управления его режимами и оптимизации функционирования.

1. Анализ проблемы и цель исследования

Основные расчетные соотношения для ВЭУ рассматриваемого типа, полученные из условия баланса располагаемой и потребляемой мощностей, представлены в [1,2], и основаны на известных соотношениях аэродинамики винтов в виде характеристик быстроходности и уравнениях равновесия вращающихся масс [1...5]. Математические модели динамики ВЭУ детально рассмотрены в [2] и предложена их компьютерная реализация. Разработанные математические модели динамики ВЭУ на переходных режимах позволи-

ли разработать, отладить и реализовать соответствующие алгоритмы управления указанным сложным нелинейным объектом. Особенности таких алгоритмов и вопросы их оптимизации недостаточно полно освещены в опубликованных исследованиях.

Целью настоящей работы является разработка новых алгоритмов управления ВЭУ по гарантированным запасам аэродинамической устойчивости с использованием ее математической модели и их компьютерная реализация в виде комплекса программно-алгоритмических средств.



Рис.1. ВЭУ турбогенераторного типа

2. Основные результаты

Особенность ВЭУ турбогенераторного типа заключается в расположении на несущем винте (ветроколесе) большого диаметра турбомашин с собственными винтовыми группами, ориентированными в плоскости несущего винта. Такая конструкция обеспечивает стабильность ветрового напора на винты турбомашин и большую равномерность используемой мощности по сравнению с традиционными ВЭУ. Энерговывающими агрегатами являются синхронные электрические машины номинальной мощностью 350 кВт. Регулирование оборотов ВЭУ осуществляется поворотом лопастей несущего винта с помощью электроприводов разработки ХАКБ (г. Харьков). Функционирование ВЭУ обеспечивает комплекс взаимосвязанных цифровых информационно-измерительных и управляющих систем разработки ОАО «Элемент» (г. Одесса).

Динамика совместного вращательного движения ветроколеса и турбомашин описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= \\ &= \frac{\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [m_1(\omega_1 R_1 / V_0)] R_1^3 V_0^2 - \\ &- \frac{3\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [C_{t2}(\omega_2 R_{20} / V_2)] R_{20}^2 R_2 V_2^2 \cos \alpha - \\ &- M_{C1}(\omega_1, T_H); \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= \\ &= \frac{\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [m_2(\omega_2 R_{20} / V_2)] R_{20}^3 V_2^2 - \\ &- M_H(S, I) - M_{C2}(\omega_2, T_H), \end{aligned} \right.$$

где перекрестные связи входят через параметр $C_{t2}(\omega_2 R_{20} / V_2)$, и через скорость потока на винтах турбомашин V_2 :

$$\left. \begin{aligned} V_2 &= \sqrt{V_0^2 + V_r^2} \cos(\alpha - \beta), \\ V_r &= \omega_1 R_2, \beta = \arctg(V_0 / V_r) \end{aligned} \right\}$$

В представленных уравнениях обозначены:

R_1 – радиус ветроколеса;

R_{20} – радиус винтов турбомашин;

R_2 – радиус установки турбомашин;

$\rho(T_H, P_H)$ – зависящая от температуры T_H

и давления P_H плотность воздуха;

V_0 – средняя скорость ветрового потока;

V_2 – скорость потока на винтах турбомашин;

α – угол установки турбомашин;

J_1 – момент инерции ветроколеса;

Z_1 – быстроходность ветроколеса,

$$Z_1 = \omega_1 R_1 / V_0;$$

Z_2 – быстроходность винтов турбомашин,

$$Z_2 = \omega_2 R_{20} / V_2;$$

$C_{n1}(Z_1, \delta)$ – семейство расчетных характеристик коэффициента мощности ветроколеса;

$C_{n2}(Z_2)$ – расчетная характеристика коэффициента мощности винтов турбомашин;

$C_{t2}(Z_2)$ – расчетная характеристика коэффициента осевой силы винтов турбомашин;

M_H – нагрузочный, например, генераторный момент, зависящий от скольжения S и тока нагрузки I ;

M_{C1} – момент сопротивления.

Управляемыми координатами являются:

– угловая скорость (обороты) ветроколеса $\omega_1 (n_1)$;

– располагаемая мощность ветроколеса N_1 , угловая скорость (обороты) винтов турбомашин $\omega_{2k} (n_{2k})$;

– располагаемая мощность турбомашин N_{2K} , $K = 1, 2, 3$.

На рис. 2 представлены характеристики быстроходности ветроколеса в зависимости от угла поворота лопастей, на рис. 3 – характеристики быстроходности винтов турбомашин.

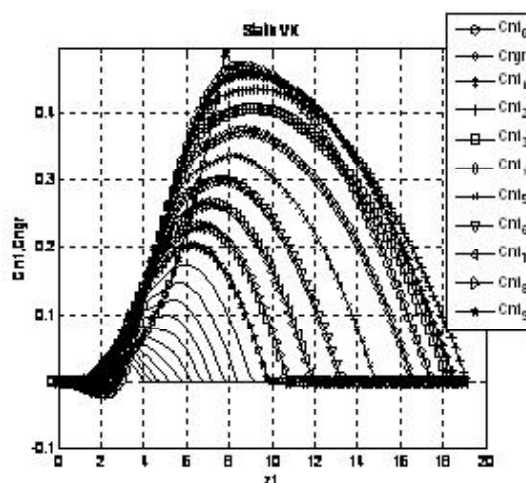


Рис.2. Характеристики быстроходности ветроколеса

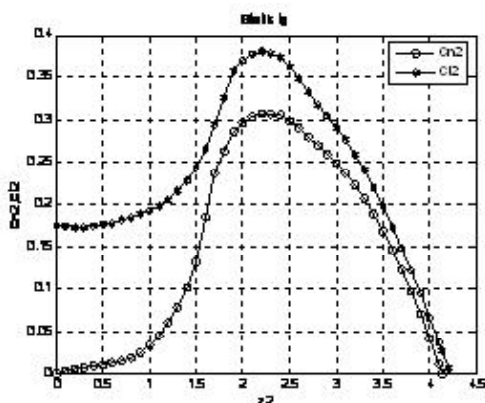


Рис. 3. Характеристики быстроходности винтов турбомашин

Алгоритмы управления, реализованные в системе, предусматривают совместную работу двух ограничителей – оборотов ветроколеса и мощности, объединенных с помощью селектора минимума. Такое решение, как показывает опытная эксплуатация ВЭУ, обеспечило требования технического задания. Новый проект ВЭУ предусматривает возможность ее эксплуатации не только параллельно с сетью, но и в гораздо более сложном автономном режиме с переменной нагрузкой, что потребовало разработки более совершенных алгоритмов управления. В частности, предложено обеспечить управление ВЭУ по запасам аэродинамической устойчивости.

В режиме работы параллельно с сетью при постоянной синхронной частоте нехватка располагаемой мощности (при падении скорости ветра, либо в динамических переходных режимах) может потенциально привести к переходу синхронных генераторов в двигательный режим с нежелательными последствиями. В автономном режиме перегрузка турбомашин приводит к уходу на левую ветку характеристики быстроходности и потере устойчивости, следствием которой является остановка винтов и резкий рост оборотов ветроколеса.

Результаты оценки эффективности предложенной модификации алгоритмов управления путем математического моделирования приведены на рис. 4... рис. 7. На рис. 4 и рис. 6 представлены параметры ВЭУ в режиме работы параллельно с сетью и автономном режиме, причем в последнем случае использованы записи реального ветрового потока. На рис. 5 и рис. 7 представлены запасы устойчивости ВЭУ в указанных режимах без ограничения и с введенным в алгоритмы управления ограничением параметра, характеризующего аэродинамическую устойчивость. Таким параметром является $dK_u = (1 - K_u) * 100\%$, где K_u – отношение тангенса наклона текущей точки рабочего режима на характеристике быстроходности турбомашин к граничному тангенсу наклона.

Наиболее важным результатом исследований представляется установленный эффект резкой

потери запасов устойчивости при отрицательном градиенте скорости ветра, что наглядно представлено на рис. 7. Ограничение нагрузки по оборотам ветроколеса не гарантирует устойчивости в переходных режимах ввиду его большой инерционности. Как это следует из результатов моделирования, разработанные алгоритмы управления гарантируют потребный уровень запасов аэродинамической устойчивости в наиболее сложной ситуации переменной нагрузки и флуктуирующего ветрового потока.

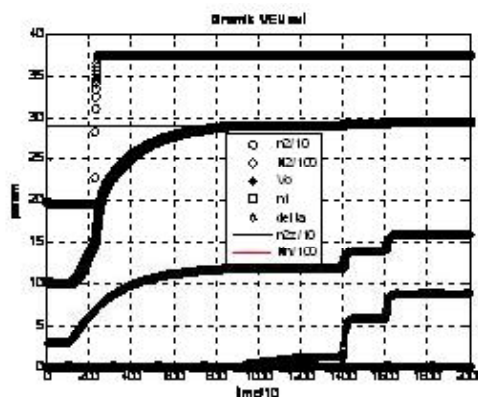


Рис. 4. Изменение параметров ВЭУ в режиме работы параллельно с сетью для имитируемого ветрового потока

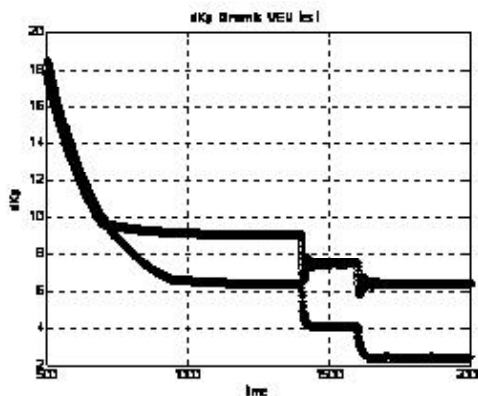


Рис. 5. Запасы устойчивости ВЭУ в режиме работы параллельно с сетью

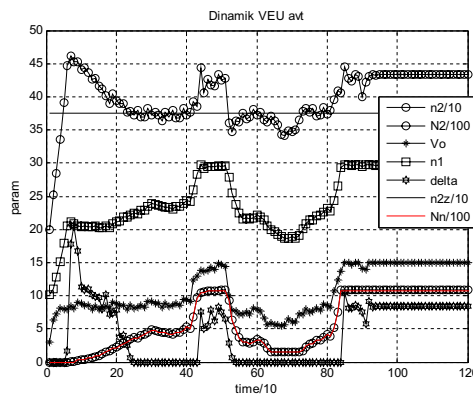


Рис. 6. Изменение параметров ВЭУ в автономном режиме для реального ветрового потока

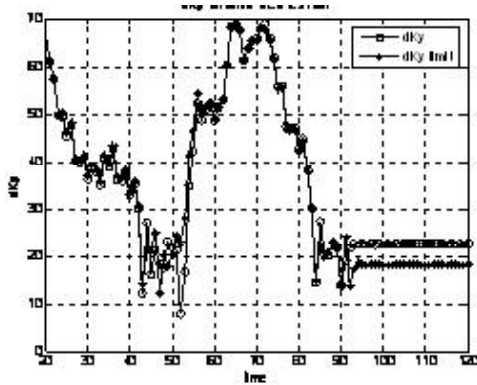


Рис. 7. Запасы устойчивости ВЭУ в автономном режиме работы

Заключение

Математическая модель динамики впервые создаваемого сложного энергетического объекта позволила на этапе проектирования оценить соответствие проектных решений ожидаемым результатам, предложить новые принципы и законы управления таким объектом в условиях переменной нагрузки и нестационарности ветрового потока. Перспективы дальнейших исследований заключаются в создании виртуального стенда имитации режимов функционирования ВЭУ.

На основі математичної моделі динамічних режимів вітроенергетичної установки турбогенераторного типу вирішено задачу управління по гарантованим запасам аеродинамічної сталості, що забезпечує поліпшення енергетичних та економічних характеристик. Виконано комп'ютерну реалізацію розроблених математичних моделей із застосуванням записів реального вітру. Розглянуто два основних режими роботи: автономний режим роботи вітроенергетичної установки, а також режим роботи паралельно із мережею безмежної потужності.

Ключові слова: вітроенергетика, динаміка, система управління, моделювання, стійкість.

On the basis of mathematical model of dynamic behavior of the turbine wind-driven power plant the problem of control under guaranteed aerodynamic stability margin is solved. It provides improvement of energetic characteristics. Computer realization of the developed mathematical models with use of writings of a real wind is executed. Two basic functional modes are considered: an off-line mode of work of wind-driven power plant, and also a functional mode in parallel with a network of infinite power.

Key words: wind-power engineering, dynamics, control system, modeling, durability.

Литература

1. Голубенко Н.С., Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэлектрической установки большой мощности / Голубенко Н.С. // «Материалы IV международной конференции «Нетрадиционная энергетика в XXI веке» – Крым, Гурзуф. – 2003. – С. 125 – 132.
2. Миргород В.Ф. Моделирование динамических режимов ветроэнергетической установки большой мощности / Миргород В.Ф., Ранченко Г.С., Голубенко Н.С. // «Авіаційно-космічна техніка і технологія». – 4(30) – 2006. – С. 96 – 99.
3. Твайдел Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии., пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 392 с.
4. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. – М.: Энергоатомиздат, – 1983. – 200 с.
5. Johnson G. Wind Energy System. New York. NY: Prentice Hall. 1985 – 421 p.

Поступила в редакцию 12.06.2009 г.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Положенко, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.