УДК 681.513.1

КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ВЕНТИЛЬНОЙ БАЛЛАСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б.

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия, (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: bvl@tpu.ru

Проведено численное моделирование режимов работы микрогидроэлектростанции с автобалластным регулированием при изменении в широком диапазоне мощности и характера полезной нагрузки с регулируемой автобалластной нагрузкой различного характера. Определены аналитические зависимости оптимальных углов управления вентилями от изменения полной мощности станции и характера полезной нагрузки. Установлена возможность одновременного регулирования как активной, так и реактивной составляющей результирующей нагрузки микроГЭС с системой стабилизации, построенной на полностью управляемых вентилях. Проведена оценка качества выходного напряжения микроГЭС с вентильной балластной нагрузкой. В диапазоне наиболее характерных для практики применения микроГЭС нагрузок предложено использовать балластную нагрузку активно-индуктивного характера с коэффициентом мощности 0,8, модуль которой соответствует номинальной мощности генератора. При этих условиях кривая генерируемого напряжения имеет несинусоидальные искажения, характеризуемые величиной коэффициента несинусоидальности более 15%.

Ключевые слова: микрогидроэлектростанция, возобновляемые энергоресурсы, система стабилизации частоты, стабилизация напряжения, эквивалентная нагрузка, балластная нагрузка, одноканальная система.

VOLTAGE QUALITY OF MICROHYDROELECTRIC STATION WITH RECTIFIER BALLAST LOAD

Lukutin B.V., Shandarova E.B.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30), e-mail: bvl@tpu.ru

Numerical simulation of operating modes of micro-hydro-electric power station with autoballast control when changing over a wide range of power and character of payload with adjustable autoballast load was conducted. Analytical dependences of optimal angle of rectifier control on changing full power of station and character of payload were determined. Possibility of simultaneous control of both active and reactive components of resultant load of micro-hydro-electric power station with stabilization system based on fully controlled rectifiers was established. Evaluation of output voltage quality of micro-hydro-electric power station with rectifier ballast load was made. In the range of the most typical loads for micro-hydro-electric power station application it was proposed to use active-inductive ballast with power factor of 0,8, which module corresponds to rated power of generator. Under these conditions the curve of generated voltage has sinusoidal distortion characterized by nonsinusoidality ratio more than 15%.

Key words: micro-hydro-electric power station, renewable energy source, frequency stabilization system, voltage stabilization, equivalent load, ballast load, single channel system.

Введение

Создание современных автоматизированных микрогидроэлектростанций (микроГЭС) требует проведения глубоких исследований, необходимость которых объясняется сложностью процессов преобразования потока воды в электроэнергию со стабильными параметрами. Тенденция к упрощению гидротехнической части станции существенно повышает требования к устройствам генерирования электроэнергии и стабилизации ее параметров [1].

Возмущающими воздействиями для гидроагрегата являются изменения энергии рабочего потока воды и колебания величины мощности нагрузки, уравновешивающей мощность, развиваемую гидродвигателем. Если стабилизировать поток воды с помощью напорного трубопровода, то, выбирая соответствующую нагрузку источника электропитания, можно стабилизировать частоту вращения гидрогенератора, а, следовательно, и выходное напряжение [4; 5].

Один из перспективных способов регулирования электрической нагрузки станции предусматривает использование в регуляторах автобалласта вентильных схем с фазовым регулированием. Балластная нагрузка, в качестве которой может использоваться некоторая полезная нагрузка, подключается параллельно полезной, при этом система управления формирует определенный угол управления вентилями регулятора в зависимости от величины управляющего воздействия, характеризующего отклонение выходных электрических параметров установки относительно номинальных значений [2]. Автобалластная система с естественной коммутацией вентилей не позволяет одновременно повышать точность стабилизации величины и частоты выходного напряжения, поскольку при фазовом регулировании вентилей регулятора балласта происходит изменение не только величины, но и характера эквивалентной нагрузки генератора, определяемой по основным гармоникам тока и напряжения [3].

Цель исследования

Для улучшения стабилизации параметров генерируемой электроэнергии предлагается использование фазорегулируемых автобалластных систем, построенных на основе двухоперационных тиристоров или на силовых транзисторах. Подобные системы позволяют осуществлять независимое регулирование амплитуды и фазы основной гармоники тока балласта, что дает возможность с большей точностью поддерживать постоянство величины и характера эквивалентной результирующей нагрузки станции и, соответственно, постоянство величины и частоты генерируемого напряжения микроГЭС.

Задачей исследования являлось определение зависимостей формирования углов управления вентильного ключа α и β при изменении полной мощности полезной нагрузки генератора от номинального значения до холостого хода при условии максимально возможной стабилизации величины и характера эквивалентной нагрузки станции, а также выбор наиболее оптимального коэффициента мощности балласта. При этом необходимо оценить степень искажения выходного напряжения генератора в результате работы автобалластной системы, построенной на полностью управляемых вентилях.

Методы исследования

Решение этой задачи осуществлялось методами математического моделирования. Эквивалентная схема замещения фазы генератора микроГЭС с автобалластной системой регулирования представлена на рис. 1, где УК – управляемый ключ, построенный на тиристорах или силовых транзисторах; $r_г$, $L_г$ – соответственно активное и индуктивное сопротивление якорной обмотки генератора [2]. Генератор работает на полезную нагрузку активно-индуктивного характера $r_н$ и $L_н$. При изменении величины полезной нагрузки система управления вентилями формирует углы управления α и β, обеспечивающие подключение балластной нагрузки с параметрами $r_б$, $L_б$ такой мощности, которая поддерживает постоянство активной и реактивной составляющих мощности генератора микроГЭС.

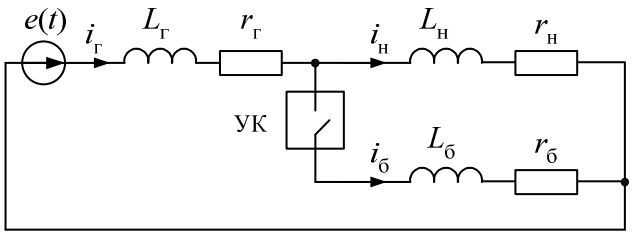


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения фазы генератора с активно-индуктивным балластом.

Дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы при включении балластной нагрузки активно-индуктивного характера, имеют вид:

$$L_г \frac{di_г}{dt} + i_г r_г + L_б \frac{di_б(\alpha,\beta)}{dt} + i_б(\alpha,\beta) r_б = e(t);$$
$$L_н \frac{di_н}{dt} + i_н r_н - L_б \frac{di_б(\alpha,\beta)}{dt} - i_б(\alpha,\beta) r_б = 0;$$
$$i_г - i_н - i_б(\alpha,\beta) = 0.$$

При выключении балласта ток и напряжение генератора определяются по уравнению:

$$(L_г + L_н)\frac{di_г}{dt} + (r_г + r_н) i_г = e(t)\,;\; u(t) = e(t) - i_г r_г - L_г \frac{di_г}{dt}\,.$$

Численное моделирование режимов работы станции проводилось с использованием программы Simulink, являющейся приложением к пакету Matlab. Созданная модель позволяет исследовать режимы работы станции при изменении в широком диапазоне мощности и характера полезной нагрузки с автобалластной нагрузкой различного характера, а также проводить гармонический анализ токов и напряжений. Степень несинусоидальности выходного напряжения оценивалась коэффициентом несинусоидальности, который

определяется как отношение среднеквадратичного значения величины высших гармоник U_n к первой гармонике исследуемого сигнала U_1 [3]:

$$K_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_n U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% .$$

Регулирование балластной нагрузки осуществлялось по активной и реактивной составляющим мощности генератора. Исследования производились при изменении $\cos\varphi_{\text{н}}$ от 0,50 до 0,95. Балластная нагрузка принималась активно-индуктивной, при этом $\cos\varphi_{\text{б}}$ менялся от 0,70 до 0,9. Величина номинальной балластной нагрузки принималась равной величине номинальной полезной нагрузки станции.

Результаты исследования

При изменении мощности полезной нагрузки от нуля до номинального значения, при неизменном $\cos\varphi_{\text{н}}$, определены углы α и β, которые обеспечивают подключение активно-индуктивного балласта такой мощности, которая поддерживает постоянство активной и реактивной составляющих результирующей мощности генератора.

Серия численных экспериментов позволила установить зависимость угла открытия управляемых вентилей от изменения полной мощности и характера полезной нагрузки:

$$\alpha(S_{\text{н}}, \cos\varphi_{\text{н}}) = k_1(\cos\varphi_{\text{н}})e^{S_{\text{н}}} + k_2(\cos\varphi_{\text{н}})\sin(S_{\text{н}}) + k_3(\cos\varphi_{\text{н}})S_{\text{н}} , \qquad (1)$$

где

$$k_1(\cos\varphi_{\text{н}}) = -679 \cdot \cos\varphi_{\text{н}} + 687 \cdot \sin(\cos\varphi_{\text{н}}) + 78 ;$$

$$k_2(\cos\varphi_{\text{н}}) = -8435 \cdot \sin(\cos\varphi_{\text{н}}) + 636 \cdot \cos(\cos\varphi_{\text{н}}) + 7333 \cdot \cos\varphi_{\text{н}} ;$$

$$k_3(\cos\varphi_{\text{н}}) = 6142 \cdot \sin(\cos\varphi_{\text{н}}) - 637 \cdot \cos(\cos\varphi_{\text{н}}) - 5208 \cdot \cos\varphi_{\text{н}} .$$

Формула для определения оптимального угла закрытия управляемых вентилей, при изменении мощности и характера полезной нагрузки, имеет вид:

$$\beta(S_{\text{н}}, \cos\varphi_{\text{н}}) = k_4(\cos\varphi_{\text{н}})S_{\text{н}}^2 + k_5(\cos\varphi_{\text{н}})\cos(S_{\text{н}}) + k_6(\cos\varphi_{\text{н}})S_{\text{н}} , \qquad (2)$$

где

$$k_4(\cos\varphi_{\text{н}}) = -4719 \cdot \sin(\cos\varphi_{\text{н}}) + 371 \cdot \cos(\cos\varphi_{\text{н}}) + 3957 \cdot \cos\varphi_{\text{н}} ;$$

$$k_5(\cos\varphi_{\text{н}}) = 124 \cdot \cos^2(\cos\varphi_{\text{н}}) + 180 \cdot \cos(\cos\varphi_{\text{н}}) - 28 \cdot \cos\varphi_{\text{н}} ;$$

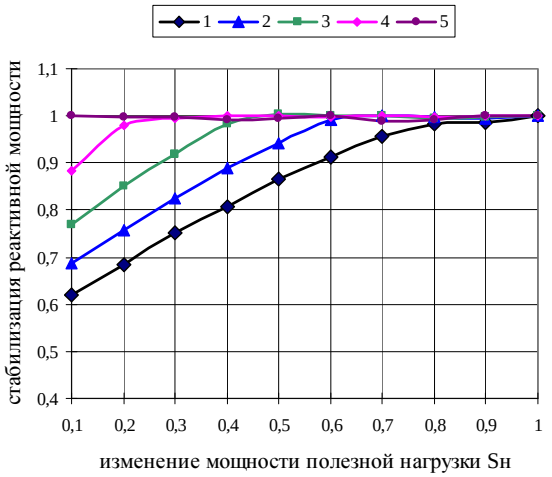
$$k_6(\cos\varphi_{\text{н}}) = 1477 \cdot \sin(\cos\varphi_{\text{н}}) + 2206 \cdot \cos(\cos\varphi_{\text{н}}) - 2610 \cdot \cos\varphi_{\text{н}} .$$

Зависимости (1) и (2) определены путем аппроксимации данных в результате численного моделирования режимов работы станции по методу наименьших квадратов линейной комбинацией произвольных функций. Полученные зависимости

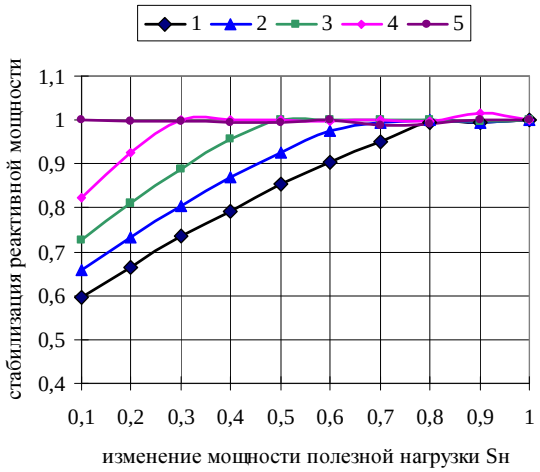
полиноминального типа дают точный результат при изменении мощности полезной нагрузки от 0,7 до 0,1 $S_н$.

Активно-индуктивный балласт с $\cos\varphi_б$=0,80 позволяет полностью стабилизировать активную составляющую мощности генератора при изменении мощности активно-индуктивной нагрузки ($\cos\varphi_н$=0,80) от нуля до номинальной, при этом реактивную составляющую не удается точно стабилизировать только в диапазоне от 0,2 до 0,1 $S_н$. Погрешность стабилизации реактивной мощности в этом диапазоне составляет от 18 до 25%.

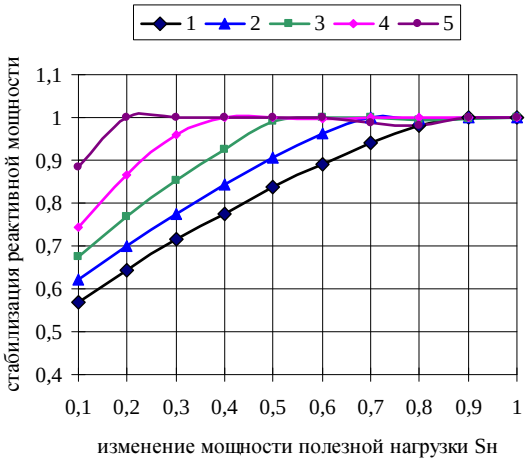
В результате проведенных расчетов было установлено, что при использовании в микроГЭС активно-индуктивного балласта с $\cos\varphi_б$=0,70–0,90 активную составляющую результирующей мощности генератора удается стабилизировать с высокой точностью при изменении величины полезной нагрузки с $\cos\varphi_н$ от 0,50 до 0,95 во всем диапазоне. Точность стабилизации реактивной мощности зависит от характера полезной и балластной нагрузок.



а



б

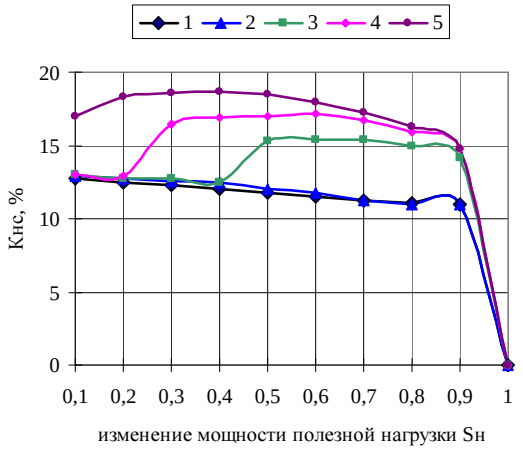


в

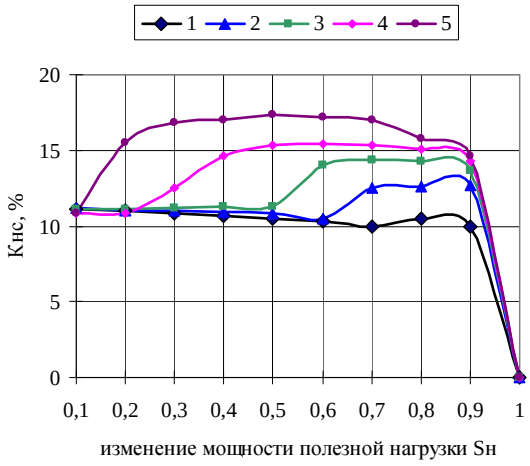
Рис. 2. Зависимость стабилизации реактивной мощности $\frac{Q}{Q_н}$ от изменения мощности полезной нагрузки станции $S_н$, о.е. (кривая 1) $\cos\varphi_н$=0,50; 2) $\cos\varphi_н$=0,60; 3) $\cos\varphi_н$=0,70; 4) $\cos\varphi_н$=0,80; 5) $\cos\varphi_н$=0,90):
а) семейство кривых для $\cos\varphi_б$=0,70; *б*) для $\cos\varphi_б$=0,80; *в*) для $\cos\varphi_б$=0,90.

На рис. 2 представлены кривые, иллюстрирующие стабилизацию реактивной мощности в зависимости от изменения мощности нагрузки $S_н$ при фиксированных значениях $\cos\varphi_н$, изменяющихся от 0,50 до 0,90. Точность стабилизации оценивается отношением текущей реактивной мощности к номинальной реактивной мощности нагрузки: $\frac{Q}{Q_н}$.

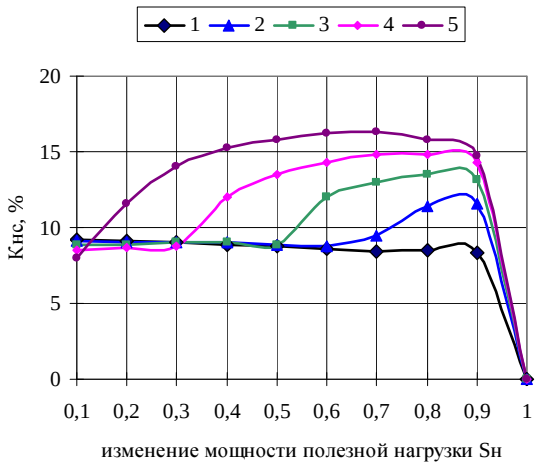
Проведенные исследования показали, что рациональным является выбор балластной нагрузки с $\cos\varphi_б$=0,80, модуль которой равен номинальной мощности генератора. Это позволяет полностью стабилизировать активную составляющую мощности генератора при изменении полезной нагрузки активно-индуктивного характера от нуля до номинальной. Выбранный балласт позволяет с высокой точностью стабилизировать реактивную составляющую мощности генератора при $\cos\varphi_н$=0,90 и 0,80 для наиболее распространенного на практике диапазона изменения полезной нагрузки станции от 0,2 до 0,95 $S_н$.



а



б



в

Рис. 3. Зависимость коэффициента несинусоидальности от изменения мощности полезной нагрузки станции $S_н$, о.е. (кривая 1) cos$\varphi_н$=0,50; 2) cos$\varphi_н$=0,60; 3) cos$\varphi_н$=0,70; 4) cos$\varphi_н$=0,80; 5) cos$\varphi_н$=0,90): *а*) семейство кривых для cos$\varphi_б$=0,70; *б*) для cos$\varphi_б$=0,80; *в*) для cos$\varphi_б$=0,90.

При понижении коэффициента мощности нагрузки погрешность стабилизации увеличивается с уменьшением мощности полезной нагрузки станции.

Уменьшение коэффициента мощности балластной нагрузки позволяет более точно стабилизировать реактивную мощность (рис. 2) для режимов работы станции, близких к холостому ходу, что в большинстве случаев практически не оправдано по соображениям энергоэффективности.

Установлено, что повышение коэффициента мощности балласта вызывает небольшое снижение коэффициента несинусоидальности, например, если полезная нагрузка генератора равна половине номинальной и cos$\varphi_н$=0,80, то при cos$\varphi_б$=0,70 коэффициент несинусоидальности $K_{нс}$ равен 17,2%; при cos$\varphi_б$=0,80 – $K_{нс}$ = 15,4%; при cos$\varphi_б$=0,90 – $K_{нс}$ = 14,3% (рис. 3).

С увеличением коэффициента мощности нагрузки наблюдается увеличение коэффициента несинусоидальности, так для cos$\varphi_б$=0,80 и при полезной нагрузке, равной 0,5$S_н$ при cos$\varphi_н$=0,50 – $K_{нс}$ = 10,3%; при cos$\varphi_н$=0,60 – $K_{нс}$ = 10,5%; при cos$\varphi_н$=0,70 – $K_{нс}$ = 14%; при cos$\varphi_н$=0,80 – $K_{нс}$ = 15,4%; при cos$\varphi_н$=0,90 – $K_{нс}$ = 17,2%.

Выводы

Проведенные исследования позволили установить возможность одновременного регулирования как активной, так и реактивной составляющей результирующей нагрузки

микроГЭС с автобалластным регулированием выходного напряжения, построенной на полностью управляемых полупроводниковых вентилях.

В диапазоне наиболее характерных для практики применения микроГЭС нагрузок предложено использовать балластную нагрузку активно-индуктивного характера с $\cos\varphi_б$=0,80, модуль которой соответствует номинальной мощности генератора. При этих условиях кривая генерируемого напряжения имеет несинусоидальные искажения, характеризуемые величиной коэффициента несинусоидальности более 15%. При необходимости улучшение формы кривой напряжения может быть достигнуто применением резонансных фильтров.

Выполнение данных рекомендаций обеспечивает высокую точность стабилизации величины и частоты напряжения микроГЭС в диапазоне реальных нагрузок станции.

Список литературы

1. Карелин В.Я., Волшаник В.В. Сооружение и оборудование малых гидроэлектростанций. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 199 с.
2. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск : STT, 2001. – 120 с.
3. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. – М. : Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
4. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / под ред. В.И. Виссарионова. – М. : ВИЭН, 2004. – 448 с.
5. Scott Davis Microhydro: Clean Power from Water. – Canada : New Society Publishers, 2003. – 176 p.

Рецензенты

Кабышев А.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института НИ Томского политехнического университета, г. Томск.

Дмитриев В.М., д.т.н., профессор, декан факультета моделирования систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), заведующий кафедрой моделирования и основ теории цепей ТУСУРа, г. Томск.