

УДК 681.513.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СО СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ДЛЯ МИКРОГЭС

Шандарова Е.Б., Баттулга Т.

ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, (634050, г. Томск, проспект Ленина, 30), e-mail: shandarovaelena@mail.ru

В статье рассмотрены микрогидроэлектростанции с автобалластной системой стабилизации рабочих режимов. Для улучшения гармонического состава напряжения станции, регулировку которого осуществляет тиристорная система автобалластного типа, предлагается использовать синхронный генератор с секционированной обмоткой якоря. Для генератора с тремя, четырьмя и пятью отпайками на якорной обмотке рассчитаны значения первой гармоники балластного тока, а также коэффициент гармоник напряжения генератора для каждой ступени балласта на всем диапазоне изменения угла управления тиристорами. Показано, что при увеличении количества отпаяк степень искажения напряжения генератора на каждой ступени балласта уменьшается, при этом на всех ступенях мощности балласта значения коэффициента гармоник получаются меньше, чем у генератора со стандартной обмоткой. Проведенные расчеты показали, что применение генератора с тремя отпайками позволяет добиться хорошего качества выходного напряжения.

Ключевые слова: микрогидроэлектростанция, синхронный генератор, якорная обмотка, секция обмотки, балластная нагрузка, качество напряжения, фазовое регулирование.

THE USE OF A SYNCHRONOUS GENERATOR WITH A SPECIAL DESIGN OF ARMATURE WINDINGS FOR MICRO-HYDRO-ELECTRIC POWER STATION

Shandarova E.B., Battulga T.

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

The article describes micro-hydro-electric power station with ballast stabilization system operating modes. For improvement of harmonious structure of voltage station which adjustment is carried out by thyristor system of autoballast type, it is offered to use the synchronous generator with the partitioned armature winding. For the generator with three, four and five taps on an armature winding values of the first harmonica of ballast current, and also coefficient of harmonicas of voltage of the generator for each step of a ballast on all range of change of angle control thyristors are calculated. It is shown, that with increase in the number of taps the degree of distortion of voltage of the generator at each stage of the ballast is reduced. At all steps of power of the ballast, value of coefficient of harmonicas turn out less, than at the generator with a standard winding The performed calculations have shown, that application generator with three taps allows to achieve a good quality of the output voltage.

Keywords: micro-hydro-electric power station, synchronous generator, armature winding, section winding, ballast load, voltage quality, phase regulation.

Введение

Станции, мощностью до 100 кВт, относятся к классу микрогидроэлектростанций (микроГЭС) и обычно не требуют возведения плотин. Их турбины, как правило, нерегулируемые, устанавливаются либо в свободном потоке воды, либо в специальном напорном трубопроводе. Мощность гидротурбины с напорным трубопроводом не зависит от водного режима реки, если ее минимальный сток превышает количество воды, поступающей в трубопровод. Последнее обстоятельство позволяет существенно упростить и удешевить решение задачи генерирования качественной электроэнергии.

При создании микроГЭС большое внимание уделяется системам стабилизации ее рабочих режимов. Если стабилизировать поток воды с помощью напорного трубопровода, то, выбирая соответствующую нагрузку источника электропитания, можно стабилизировать частоту вращения гидрогенератора. Изменять величину нагрузки микроГЭС возможно включением на выход генератора автономной регулируемой балластной нагрузки [4,6]. Одним из перспективных способов регулирования электрической нагрузки станции является использование в регуляторах автобалласта вентильных схем с фазовым регулированием. Такие регуляторы требуют небольшого количества тиристоров для построения силовых схем и в наибольшей степени удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к микроГЭС – простота и надежность [2,3]. Основным недостатком регуляторов автобалласта с фазовым регулированием является искажение формы кривых фазных токов и напряжений генератора.

Применение в микроГЭС генераторов специальных конструкций позволяет улучшить гармонический состав напряжения, регулировку которого осуществляет тиристорная система автобалластного типа. Упростить утилизацию мощности, рассеиваемой на балласте, и в целом конструкцию системы стабилизации напряжения станции позволяет секционирование якорной обмотки генератора.

Схема одной фазы системы стабилизации приведена на рис. 1, где $\Delta e_1, \dots, \Delta e_n$ – ЭДС соответствующих секций обмотки генератора; $\Delta L_{r1}, \dots, \Delta L_{rn}$; $\Delta r_{r1}, \dots, \Delta r_{rn}$ – индуктивность и активное сопротивление соответствующих секций обмотки; R_6 – сопротивление балластной нагрузки; n – число секций обмотки якоря.

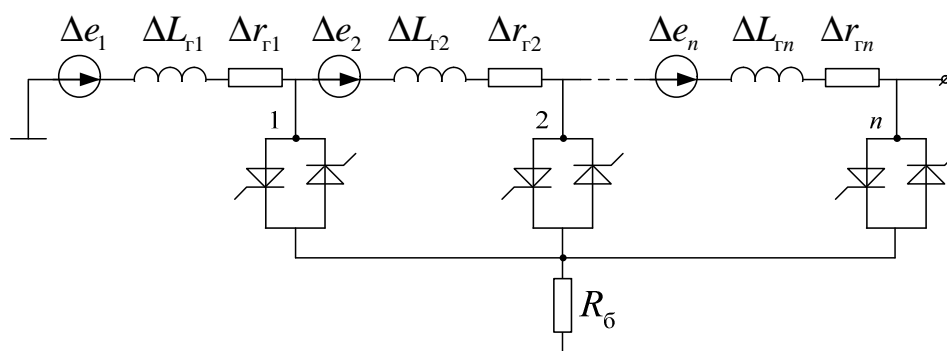


Рис. 1. Эквивалентная схема фазы машинно-вентильного генератора с секционированной обмоткой якоря

Возможность подключения балластной нагрузки R_6 на различные отпайки обмотки позволяет дискретно регулировать мощность, рассеиваемую на балласте. Величина ЭДС на k -ой отпайке равна

$$e_k = \sum_{j=1}^k \Delta e_j,$$

где j – номер отпайки.

Тогда, соответствующая мощность балласта (без учета сопротивлений обмоток генератора)

$$\text{равна } P_{\text{бк}} = \frac{e_k^2}{R_{\text{б}}}.$$

Очевидно, что интервал дискретизации мощности балласта определяется количеством секций обмотки якоря n . Для более плавной регулировки мощности, при ограниченном значении n , целесообразно использование фазового регулирования на каждой ступени мощности балласта. Фазовое регулирование позволяет уменьшить количество секций обмотки и соответствующее количество тиристорных ключей, однако вызывает искажение кривых фазных токов и напряжения генератора. Кроме того, переменный угол включения тиристоров определяет изменение реактивной мощности эквивалентной балластной нагрузки станции.

Задачу оптимизации можно сформулировать как обеспечение допустимого уровня коэффициента гармоник напряжения генератора при минимальном количестве отпаек обмотки.

Одним из возможных способов улучшения гармонического состава напряжения станции является ограничение диапазона регулирования углов управления тиристоров α . Например, если разбить обмотку якоря генератора на n частей при условии, что каждая ее часть добавляет к мощности балласта $\Delta P = \frac{P_{\text{ном}}}{n}$, где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность станции, то диапазон изменения α оказывается взаимосвязан с мощностью

$$\Delta P = U (I_{\text{бк1max}}(\alpha_{\text{min}}) - I_{\text{бк1min}}(\alpha_{\text{max}})), \quad (1)$$

где α_{min} и α_{max} – минимальный и максимальный углы управления тиристора регулятора;

$I_{\text{бк1max}}$, $I_{\text{бк1min}}$ – максимальное и минимальное значение первой гармоники тока балласта на соответствующей k -ой отпайке обмотки.

Амплитудное значение балластного тока определяется по известным выражениям [1], как

$$I_{\text{бк1}} = \sqrt{B_1^2 + C_1^2}; \quad B_1 = I_m \left(\frac{3}{2} - \frac{\pi + 2\alpha}{2\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha \right); \quad C_1 = -\frac{I_m}{4\pi} (\alpha - \alpha \cos 2\alpha), \quad (2)$$

где $I_m = \frac{e_k}{R_{\text{б}}}$ – амплитудное значение тока отпайки.

При стабильном напряжении генератора мощность балласта на каждой ступени определится его током, величина которого зависит от угла управления. Тогда интервал дискретизации мощности балласта определит интервал изменения первой гармоники тока и, в соответствии с (1), диапазон изменения углов управления тиристорами.

Для схемы с тремя отпайками на якорной обмотке по формулам (2) были рассчитаны значения первой гармоники балластного тока для каждой ступени балласта для всего диапазона изменения угла управления тиристорами α (рис. 2). На первой ступени мощность балласта $P_1 = \frac{1}{3} P_{\text{ном}}$ и α меняется от 0° до 180° . Максимальный ток на первой ступени при $\alpha = 0^\circ$ равен 0,47 о.е. Для второй ступени это значение соответствует углу $\alpha = 75^\circ$, следовательно, диапазон изменения α на второй ступени при плавном перекрытии изменяется от 0° до 75° . Аналогично для третьей ступени α меняется от 0° до 60° .

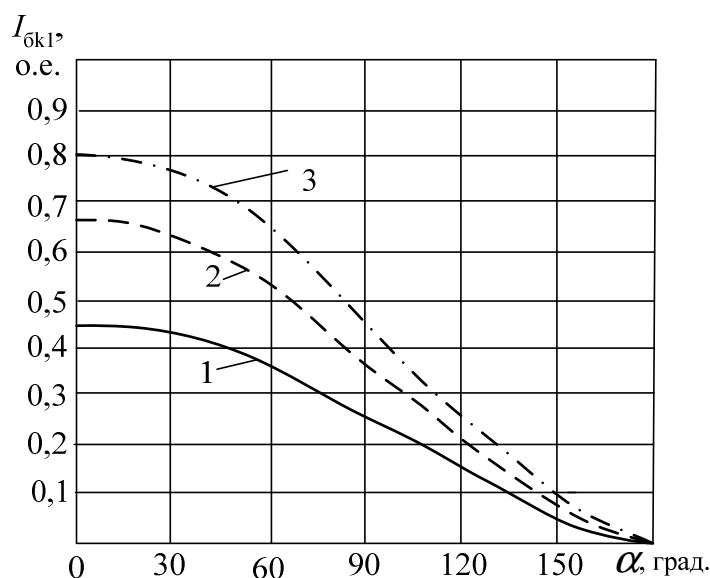


Рис. 2. Зависимость первой гармоники тока балласта от угла управления тиристорами (кривая 1 – первая ступень балласта; 2 – вторая; 3 – третья)

Степень искажения напряжения генератора на каждой отпайке определим с помощью коэффициента гармоник

$$k_r = \frac{\sqrt{\sum_m U_m^2}}{U_1} \cdot 100\%,$$

где U_m, U_1 – действующие значения m -ой и первой гармоник напряжения генератора.

Падение напряжения на сопротивлении обмотки генератора зависит от величины активного и индуктивного сопротивлений, определяемым количеством витков. В секционированной обмотке активное сопротивление секции пропорционально числу витков

w_s , а индуктивное – w_s^2 . Тогда при $n = 3$ на первой отпайке при $e_1 = \sqrt{\frac{1}{3}}$ действующее значение m -ой гармоники напряжения определится по формуле

$$U_m = \frac{I_m}{3} \sqrt{\frac{(m\omega L_r)^2}{3} + r_r^2},$$

где I_m – действующее значение m -ой гармоники тока генератора.

При $\sqrt{\frac{(m\omega L_r)^2}{3} + r_r^2} \ll 1$, получим, что величины тока и напряжения уменьшаются в 3

раза. Максимальный коэффициент гармоник напряжения обычного генератора, работающего на балластную нагрузку активного характера с тиристорным регулированием при угле управления 90° равен 11 % [5]. Следовательно, у генератора с секционированной обмоткой для первой ступени балласта коэффициент гармоник уменьшится в 3 раза и будет равен 3,3 %. Тогда для второй ступени балласта коэффициент гармоник уменьшится в $2/3$ раза и будет равен 6,6 %, для третьей – останется таким же, как у обычного генератора – 11 %. Графические зависимости коэффициента гармоник от угла управления тиристорами для генератора с тремя отпайками представлены на рис.3.

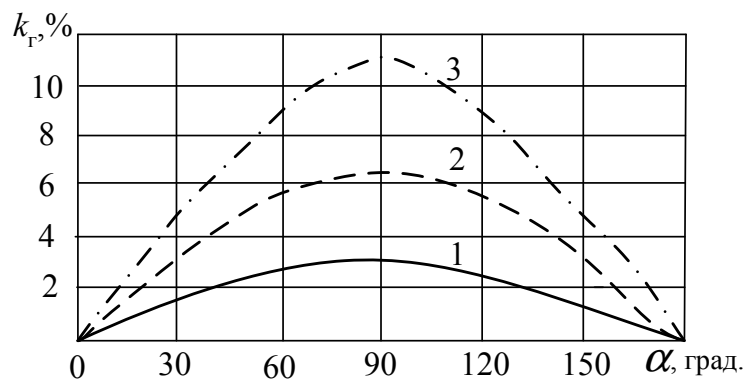


Рис. 3. Зависимости коэффициента гармоник от угла управления тиристорами (кривая 1 – первая ступень балласта; 2 – вторая; 3 – третья)

С целью ограничения максимальных искажений напряжения на каждой ступени балласта можно выбрать свой диапазон изменения угла управления. Если при работе станции ток нагрузки уменьшается до значения, равного $2/3$ от номинального тока нагрузки, то включается первая ступень балласта, и угол α меняется от 0° до 180° с максимальным коэффициентом гармоник – 6,6 % (рис. 3). При дальнейшем уменьшении тока нагрузки от

$2/3$ до $1/3$ от номинального выключается первая ступень и включается вторая с ЭДС $e_2 = \sqrt{\frac{2}{3}}$,

при этом α меняется от 0° до 75° с максимальным $k_{\Gamma} = 6 \%$. При токе нагрузки, близкому к минимальному, включается третья ступень с $e_3 = 1$, при этом α меняется от 0° до 60° и $k_{\Gamma\max} = 8,8 \%$.

Аналогичные расчеты были произведены для генератора с четырьмя и пятью отпайками. При увеличении количества отпаяк степень искажения напряжения генератора на каждой ступени балласта уменьшается, при этом, на всех ступенях мощности балласта, значения коэффициента гармоник получаются меньше, чем у генератора со стандартной обмоткой. Так для второй ступени при числе отпаяк $n = 3$ коэффициент гармоник $k_{\Gamma\max} = 6 \%$, при $n = 4 - k_{\Gamma\max} = 4,5 \%$, при $n = 5 - k_{\Gamma\max} = 3,7 \%$.

Проведенные расчеты показали, что секционирование якорной обмотки генератора является эффективным путем улучшения формы выходного напряжения микроГЭС. Проведенный анализ показал, что применение генератора с тремя отпайками позволяет добиться хорошего качества выходного напряжения.

Список литературы

1. Аррилага Дж. Гармоники в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
2. Карелин В.Я., Волшаник В.В. Сооружение и оборудование малых гидроэлектростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 199 с.
3. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: СТТ, 2001. – 120 с.
4. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Способы повышения качества выходного напряжения микроГЭС с тиристорным автобалластом // Промышленная энергетика. – 2000. – № 8. – С. 49-52.
5. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
6. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / под ред. В.И. Виссарионова. – М.: ВИЭН, 2004. – 448 с.

Рецензенты:

Лукутин Б.В., д.т.н., профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института НИ Томского политехнического университета, г.Томск.

Муравлев О.П., д.т.н., профессор кафедры электромеханических комплексов и материалов Национального исследовательского Томского политехнического университета, г.Томск.