УДК 681.513.1

ФАЗОРЕГУЛИРУЕМЫЕ АВТОБАЛЛАСТНЫЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОГЭС

Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова

Томский политехнический университет E-mail: bvl@tpu.ru

Показана возможность стабилизации частоты и величины генерируемого напряжения микрогидроэлектростанции с помощью автобалластных систем стабилизации. Приводятся результаты расчетов величины и фазы эквивалентной нагрузки генератора для станции с системой стабилизации построенной на тиристорах с естественной коммутацией и полностью управляемых тиристорах для активного и активно-индуктивного балласта. Установлено, что применение автобалластных систем, построенных на транзисторах либо на полностью управляемых тиристорах, позволяет с большей точностью поддерживать постоянство величины и характера эквивалентной результирующей нагрузки станции и, соответственно, постоянство величины и частоты генерируемого напряжения при условии работы станции на активно-индуктивный балласт соизмеримой мощности.

Ключевые слова:

Микрогидроэлектростанция, возобновляемые энергоресурсы, система стабилизации частоты, стабилизация напряжения, эквивалентная нагрузка, балластная нагрузка, одноканальная система.

Key words:

Micro-hydro-electric power station, renewable energy source, frequency stabilization system, voltage stabilization, equivalent load, ballast load, single channel system.

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. Соответственно, вопросы, связанные с исследованиями режимов работы электромашинных генераторов микроГЭС в комплексе со статическими полупроводниковыми системами регулирования величины и частоты выходного напряжения, приобретают первостепенное значение [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. Изменять величину нагрузки микроГЭС возможно включением на выход генератора автоматически регулируемой балластной нагрузки.

Если под «балластной» понимать некоторую полезную нагрузку, то данный способ стабилизации подразумевает автоматическое перераспределение электрической мощности между некоторыми потребителями, часть из которых допускает снижение величины питающего напряжения или его отключение. Достоинством данного способа является высокое качество регулирования выходного напряжения в установившихся и переходных режимах при хороших эксплуатационных и надежностных характеристиках станции [2]. Один из перспективных способов регулирования электрической нагрузки станции предусматривает 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].

Структурная схема микроГЭС, система стабилизации которой построена на вентильном преобразователе с фазовым регулированием мощности балласта, показана на рис. 1, где ГТ – гидротурбина; Γ – генератор; Н – полезная нагрузка; БН – балластная нагрузка, Ω – механическая частота вращения. Система управления вентилями регулятора (СУВ) формирует определенный угол управления тиристорами регулятора (ТР) в зависимости от величины управляющего воздействия, характеризующего отклонение выходных электрических параметров установки относительно номинальных значений.



Рис. 1. Структурная схема микроГЭС

Широкое применение в микроГЭС дешевых асинхронных генераторов ограничивает возможность регулирования напряжения по цепи возбуждения генератора. Поэтому, в настоящее время распространены одноканальные автобалластные системы, стабилизирующие суммарный потребляемый ток генератора, что позволяет стабилизировать величину и частоту напряжения станции деривационного типа.

На точность стабилизации генерируемого напряжения в той или иной степени оказывают влияние все элементы установки: гидротурбина, генератор, нагрузка. Одноканальная автобалластная система не позволяет одновременно повышать точность стабилизации величины и частоты напряжения, поскольку при фазовом регулировании вентилей тиристорного регулятора балласта происходит изменение как величины, так и характера эквивалентной балластной нагрузки, определяемой по основным гармоникам тока и напряжения [2].

В комбинации с очевидными изменениями величины и характера полезной нагрузки, результирующая нагрузка микроГЭС не может быть идеально стабилизирована, что накладывает определенные ограничения на точность стабилизации напряжения установки. Кроме электрической части станции, на погрешность регулирования частоты вращения гидроагрегата, а, следовательно, частоты генерируемого напряжения влияет коэффициент саморегулирования гидротурбины, характеризующий «жесткость» ее механической характеристики. Так, применение более «жесткой» гидротурбины повышает точность стабилизации частоты напряжения, однако отклонение величины напряжения от номинального значения возрастает. Очевидное объяснение этому явлению – пропорциональная связь между частотой вращения генератора и величиной его выходного напряжения.

В результате исследований установлено, что микроГЭС с одноканальной системой стабилизации могут обеспечить уровень стабилизации напряжения по величине $\pm(10...12\%)$, по частоте $\pm(2...5\%)$ относительно номинальных значений. Такие показатели достигаются при работе на пассивную нагрузку с неизменным коэффициентом мощности в диапазоне $\cos \varphi = 0.8...1,0$ [3].

Для повышения точности поддержания параметров генерируемой электроэнергии необходимо вводить дополнительные каналы регулирования по напряжению, частоте или их комбинации. Другой возможностью является построение фазорегулируемых автобалластных систем на основе двухоперационных тиристоров или на силовых транзисторах. Подобные системы позволят осуществлять независимое регулирование амплитуды и фазы основной гармоники тока балласта. Такое регулирование позволяет с большей точностью поддерживать постоянство величины и характера эквивалентной результирующей нагрузки станции и, соответственно, постоянство величины и частоты генерируемого напряжения микроГЭС.

При автобалластном регулировании выходных электрических параметров генераторработает на сложную комплексную нагрузку, часть из которой является вентильной. Основные электромеханические процессы в рассматриваемой системе определяются первыми гармоническими составляющими тока и напряжения генератора, следовательно, сложная результирующая нагрузка микроГЭС может быть представлена некоторой эквивалентной, рассчитанной по первым гармоникам тока I_1 и напряжения U_1 генератора:

$$\underline{Z}_{_{\mathfrak{I}\mathsf{K}\mathsf{B}}} = Z_{_{\mathfrak{I}\mathsf{K}\mathsf{B}}} e^{j\varphi_{_{\mathfrak{I}\mathsf{K}\mathsf{B}}}} = \frac{\underline{U}_{1}}{\underline{I}_{1}}$$

Для стабилизации частоты вращения системы генератор-приводная турбина необходимо, чтобы эквивалентная нагрузка оставалась неизменной по величине и характеру при любом изменении полезной нагрузки станции.

Стабилизация величины и характера эквивалентной нагрузки с помощью автобалластной системы, построенной на полностью управляемых тиристорах (или силовых транзисторах), обеспечивается за счет изменения углов включения α и запирания β силовых вентилей.



Рис. 2. Эквивалентная схема замещения фазы генератора с активно-индуктивным балластом

Эквивалентная схема замещения фазы генератора микроГЭС с автобалластной системой регулирования представлена на рис. 2, где УК – управляемый ключ, построенный на тиристорах или силовых транзисторах; r_r , L_r – соответственно активное и индуктивное сопротивление якорной обмотки. Генератор работает на полезную нагрузку активно-индуктивного характера r_{μ} и L_{μ} с постоянным коэффициентом мощности. При изменении величины полезной нагрузки система управления вентилями формирует углы управления α и β , обеспечивающие подключение балластной нагрузки с параметрами r_6 , L_6 такой мощности, которая поддерживает постоянство активной и реактивной составляющих мощности генератора микроГЭС.

Расчетные схемы для переходных процессов при коммутации балластной нагрузки активно-индуктивного характера приведены на рис. 3, где $i_{\rm r}$ – ток генератора; $i_{\rm H}$, i_6 – соответственно ток нагрузки и ток балласта.

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

$$L_{r} \frac{di_{r}}{dt} + i_{r}r_{r} + L_{6} \frac{di_{6}(\alpha, \beta)}{dt} + i_{6}(\alpha, \beta)r_{6} = e(t);$$

$$L_{H} \frac{di_{H}}{dt} + i_{H}r_{H} - L_{6} \frac{di_{6}(\alpha, \beta)}{dt} - i_{6}(\alpha, \beta)r_{6} = 0;$$

$$i_{r} - i_{H} - i_{6}(\alpha, \beta) = 0.$$



Рис. 3. Расчетные схемы при коммутации балластной нагрузки: а) до ее подключения; б) после подключения

При выключении балласта ток и напряжение генератора определяются по уравнению:

$$(L_{\rm r} + L_{\rm H})\frac{di_{\rm r}}{dt} + (r_{\rm r} + r_{\rm H})i_{\rm r} = e(t);$$
$$u(t) = e(t) - i_{\rm r}r_{\rm r} - L_{\rm r}\frac{di_{\rm r}}{dt}.$$

Если балласт активный, то в вышеприведенных уравнениях $L_6=0$, и порядок системы дифференциальных уравнений уменьшается.

Численное моделирование станции с автобалластной системой стабилизации проводилось с использованием программы Simulink. Данная программа является приложением к пакету Matlab. При моделировании реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты, при этом можно выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В данной работе при моделировании использовался блок SimPowerSystems, который в настоящее время может считаться одним из лучших пакетов для моделирования электротехнических устройств и систем.

При создании виртуальной модели были приняты следующие допущения: параметры рабочего потока воды стабильны; генератор эквивалентируется неискаженной ЭДС e(t) с постоянными параметрами $L_r=0,1L_{\mu}$ и $r_r=0,04r_{\mu}$; полезная нагрузка активно-индуктивного характера r_{μ} и L_{μ} с постоянным коэффициентом мощности со $s\phi_{\mu}=0,8$; балластная нагрузка может иметь как активный r_6 , так и активно-индуктивный характер r_6 , L_6 с со $s\phi_6=0,8$. Расчеты проводились для машины малой мощности: номинальная активная мощность нагрузки одной фазы составляла 800 Вт, реактивная – 600 ВАр.

В качестве управляемого ключа использовался GTO Thyristor — модель полностью управляемого тиристора, работой которого управляет блок логики. При положительном напряжении на тиристоре и наличии положительного сигнала на управляющем электроде происходит замыкание ключа, и через прибор начинает протекать ток. Для выключения прибора достаточно управляющий сигнал снизить до нуля. Выключение тиристора произойдет также при спадании анодного тока до нуля. В модели параллельно тиристору включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции. GTO Thyristor позволяет учитывать конечное время выключения тиристора. Процесс выключения разбит на два участка и характеризуется, соответственно, временем спада, при котором анодный ток уменьшается до 0,1 от тока в момент выключения и временем затягивания, при котором анодный ток уменьшается до нуля. Это позволяет приблизить виртуальную модель к реальной и избежать импульсных бросков напряжения, вызванных возникновением большой ЭДС самоиндукции в момент выключения балласта.

Созданная модель микроГЭС с автобалластным регулированием позволяет исследовать работу станции при изменении мощности полезной нагрузки от нуля до номинального значения с автобалластной нагрузкой различного характера.

Задачей исследования являлась стабилизация величины и характера эквивалентной нагрузки станции путем определения зависимостей углов включения и выключения вентильных ключей от величины полезной нагрузки микроГЭС. Регулирование балластной нагрузки осуществлялось по активной и реактивной составляющим мощности генератора. При изменении мощности полезной нагрузки от нуля до номинального значения определялись углы управления вентильного ключа α и β , которые обеспечивали подключение активно-индуктивного балласта такой мощности, которая поддерживает постоянство активной и реактивной составляющих мощности генератора. На рис. 4 представлены осциллограммы токов и фазного напряжения генератора, полученные при работе схемы на активно-индуктивный балласт с углами управления $\alpha = 62^{\circ}$, $\beta = 169^{\circ}$, что соответствует 40 % полезной нагрузке станции.

Пунктирными линиями выделены моменты включения и выключения балластной нагрузки. Провал напряжения в момент включения и его скачок при выключении балласта обусловлены переходными процессами, протекающими в схеме.

В ходе экспериментов были получены осциллограммы фазных токов и напряжения генератора для схемы с активно-индуктивным балластом, при этом мощность, рассеиваемая на балласте, регулировалась только углом включения α (схема с естественной коммутацией).



Рис. 4. Осциллограммы: а) фазного тока генератора; б) тока полезной нагрузки; в) тока балласта; г) фазного напряжения генератора

Следующим этапом исследований являлось моделирование работы станции с активным балластом для системы стабилизации, построенной на полностью управляемых тиристорах и тиристорах с естественной коммутацией. Установленная мощность балласта выбиралась равной активной составляющей номинальной мощности генератора микроГЭС. В качестве примера на рис. 5 представлена осциллограмма фазного напряжения, полученная при работе станции на активный балласт с углами управления α =66°, β =178°, соответствующим 40 % мощности полезной нагрузки с соѕ φ_{u} =0,8.

Осциллограммы, полученные при моделировании в программе Simulink, совпадают с кривыми, полученными в результате теоретических расчетов с помощью программы Mathcad для схем с естественной коммутацией при работе станции на активный и активно-индуктивный балласт [4]. Больший провал фазного напряжения при работе станции на активный балласт объясняется уменьшением сглаживающего действия ЭДС самоиндукции, возникающей в моменты изменения тока генератора. По основным гармоникам тока и напряжения генератора микроГЭС рассчитывалась эквивалентная нагрузка станции. Зависимости величины эквивалентной нагрузки от изменения мощности полезной нагрузки станции $S_{\rm H}$ при работе на активно-индуктивный и активный балласт представлены на рис. 6. Зависимости фазы эквивалентной нагрузки станции для схем с активно-индуктивным и активным балластом представлены на рис. 7.

Расчеты показали, что система стабилизации, построенная на полностью управляемых тиристорах (или силовых транзисторах) и активно-индуктивном балласте позволяет с высокой точностью стабилизировать величину и фазу эквивалентной нагрузки при изменении мощности полезной нагрузки станции от 30 до 100 %. В этом диапазоне погрешность стабилизации модуля эквивалентной нагрузки не превышает ± 1 % относительно номинального значения. Стабилизация фазового угла эквивалентной нагрузки при тех же условиях реализуется с точностью 7,8 % при номинальном значении — 36,8°. При малых значениях полезной на



Рис. 6. Зависимость величины эквивалентной нагрузки от изменения мощности полезной нагрузки станции S₄: а) при активноиндуктивном характере балластной нагрузки; б) схема с активным балластом (кривая 1 − система стабилизации, с полностью управляемыми вентилями; кривая 2 − на тиристорном регуляторе с естественной коммутацией вентилей)



Рис. 7. Зависимость фазы эквивалентной нагрузки φ_{жв} от изменения мощности полезной нагрузки станции S_µ: а) при активноиндуктивном характере балластной нагрузки; б) схема с активным балластом (кривая 1 − система стабилизации, с полностью управляемыми вентилями; кривая 2 − на тиристорном регуляторе с естественной коммутацией вентилей)

грузки для принятых параметров схемы не удается стабилизировать реактивную составляющую мощности генератора микроГЭС.

Автобалластная система, построенная на тиристорах с естественной коммутацией и активно-индуктивном балласте, позволяет стабилизировать модуль эквивалентной нагрузки в пределах 37 % – от 0,86 до 1,23 о.е. при номинальном значении – 1 о.е. Точность стабилизации фазы составила 35 % – от 29,7 до 42,6° при номинальном значении 36,8°. Таким образом, автобалластная система стабилизации с естественной коммутацией вентилей позволяет полностью компенсировать только активную составляющую тока генератора. Применение полностью управляемых вентилей для систем стабилизации с активным балластом практически не влияет на повышение точности стабилизации эквивалентной нагрузки, так как уже при уменьшении полезной нагрузки на 40 % угол β становится максимальным, равным 180°, и дальнейшее регулирование реактивной мощности становится невозможным (рис. 6, 7).

Выводы

Применение автобалластных систем, построенных на транзисторах либо полностью управляемых тиристорах, позволяет с большей точностью поддерживать постоянство величины и характера эквивалентной результирующей нагрузки станции и, соответственно, постоянство величины и частоты генерируемого напряжения микроГЭС при условии динамического автоматического регулирования балластной нагрузки активно-индуктивного характера. При изменении мощности полезной на-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / под ред. В.И. Виссарионова. – М.: ВИЭН, 2004. – 448 с.
- Карелин В.Я., Волшаник В.В. Сооружение и оборудование малых гидроэлектростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 199 с.

грузки станции от 30 до 100 % погрешность стабилизации модуля эквивалентной нагрузки не превышает ±1 %, фазы – 7,8 %. Величина и соотношение активной и реактивной мощностей балластной нагрузки должно соответствовать номинальным параметрам полезной нагрузки микроГЭС.

- Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: STT, 2001. – 120 с.
- Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.

Поступила 22.10.2010 г.

УДК 621.315.1

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТЯЖЕННОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГИСТРАТОРОВ АВАРИЙНЫХ СИГНАЛОВ

Ю.В. Хрущев, Н.Л. Бацева, Л.В. Абрамочкина

Томский политехнический университет E-mail: abr lv@mail.ru

Представлены и апробированы алгоритмы идентификации погонных параметров протяженной воздушной линии электропередачи переменного тока. Алгоритмами предусматривается использование первичной информации в виде массивов мгновенных значений токов и напряжений по концам линии электропередачи, получаемой с помощью регистраторов аварийных сигналов. Получена высокая точность соответствия эталонных погонных параметров и погонных параметров, определенных по предложенным алгоритмам.

Ключевые слова:

Воздушная линия электропередачи, место повреждения, погонные параметры, регистратор аварийных сигналов, схема замещения, волновые параметры, четырехполюсник, обобщенные постоянные.

Key words:

Overhead transmission line, fault location, long-line attenuation parameters, recording system of emergency signals, equivalent circuit, wave parameters, the two-port network, constant distribution.

Воздушная линия электропередачи — устройство для передачи электроэнергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным с помощью изолирующей конструкции и арматуры к опорам [1]. К протяжённым воздушным линиям относят линии длиной более 300 км, как правило, номинальным напряжением 330 кВ и выше.

Особенностью моделирования протяженных линий электропередачи является необходимость учета распределенности их параметров [2]. Эта особенность находит свое отражение в задаче идентификации погонных параметров, используемых при построении математических моделей линий для решения проектных и эксплуатационных задач.

Важной эксплуатационной задачей электроэнергетических систем является обеспечение быстрого и точного определения мест повреждения (ОМП) на линиях электропередачи с целью проведения ремонтно-восстановительных работ. Известно несколько алгоритмов решения этой задачи. В некоторых из них, в частности, в дистанционных алгоритмах ОМП на воздушных линиях по параметрам аварийного режима используются погонные параметры линии, а именно: r_0 , x_0 – погонные активное и реактивное сопротивления, Ом/км; g_0 , b_0 – погонные активная и реактивная проводимости, 1/(Ом·км) [3].

От точности учета погонных параметров зависит точность определения мест повреждения. Погрешность учета погонных параметров возникает из-за влияния температуры, проводимости грунта, токовой нагрузки, наличия врезок, а также из-за неточности учета среднегеометрического расстояния между проводами фаз. В настоящее время в практике проведения электрических расчетов и при ОМП на линиях электропередачи влияние