

УДК 621.313.333: 621.314

## РЕГУЛИРОВОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Ю. Т. Портной, А. С. Абдурагимов, Д. Э. Доброхотов

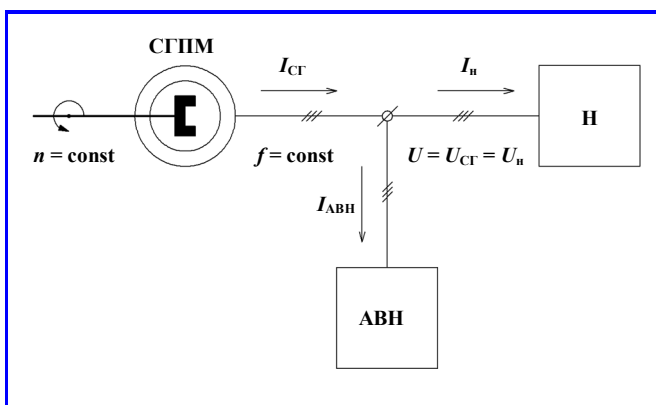
*Рассмотрена автономная электроэнергетическая система, содержащая синхронный генератор с постоянными магнитами и активный выпрямитель напряжения, подключенный параллельно шинам синхронного генератора. Предложена регулировочная характеристика активного выпрямителя напряжения, представляющая собой зависимость его тока от реактивного тока нагрузки синхронного генератора в рабочем диапазоне и обеспечивающая стабилизацию выходного напряжения синхронного генератора. Показано, что при рациональном соотношении параметров синхронного генератора активный выпрямитель напряжения может быть рассчитан на токовую нагрузку, равную примерно 40% номинального полного тока нагрузки синхронного генератора.*

**Ключевые слова:** синхронный генератор с постоянными магнитами, активный выпрямитель напряжения, реактивный ток, регулировочная характеристика, стабилизация напряжения синхронного генератора.

Применение синхронного генератора (СГ) с постоянными магнитами (СГПМ) в автономной электроэнергетической системе (АЭЭС) представляется весьма перспективным из-за известных преимуществ генераторов этого типа. Однако в связи с отсутствием в таком генераторе обмотки возбуждения поддерживать номинальное значение напряжения генератора при изменении его нагрузки техническими средствами собственно электрической машины невозможно. Одной из возможностей стабилизации напряжения СГ и соответственно АЭЭС является подключение активного выпрямителя напряжения (АВН) параллельно шинам СГ [1]. Структура АЭЭС по этой схеме представлена на рис. 1.

Пренебрегая активным сопротивлением фазы статора СГ, фазное напряжение СГ  $U$  равно:

$$U = \sqrt{E_0^2 - (I_{\text{СГa}} X_c)^2} - I_{\text{СГp}} X_c, \quad (1)$$



**Рис. 1.** Структура автономной электроэнергетической системы с постоянными магнитами, нагрузкой и активным выпрямителем напряжения

где  $E_0$  – фазная электродвижущая сила (э. д. с.) холостого хода СГ, индуцируемая в обмотке статора постоянными магнитами, является постоянной величиной, так как скорость вращения СГ здесь принимается постоянной;  $X_c$  – синхронное индуктивное сопротивление фазы статора СГ, равное сумме индуктивного сопротивления рассеяния и индуктивного сопротивления, обусловленного реакцией якоря, также является постоянной величиной, так как частота напряжения сети СГ  $f$  постоянна; и машина изотропна;  $I_{\text{СГa}}$  – активная составляющая тока СГ;  $I_{\text{СГp}}$  – реактивная составляющая тока СГ.

В рассматриваемой схеме (см. рис. 1) для синхронного генератора имеется два потребителя реактивного тока в АЭЭС: нагрузка и управляемый активный выпрямитель напряжения АВН. В качестве нагрузки могут выступать, в частности, асинхронные двигатели. Ток АВН  $I_{\text{АВН}}$  носит чисто реактивный характер: либо индуктивный, либо емкостный. Для токов, протекающих в энергосистеме, справедливы уравнения:

$$\begin{cases} I_{\text{СГa}} = I_{\text{нр}}, \\ I_{\text{СГp}} = I_{\text{нр}} + I_{\text{АВН}}; \end{cases} \quad (2)$$

Из (1) и (2) получим регулировочную характеристику АВН, которая показывает, как необходимо изменять ток АВН в функции полного тока нагрузки для стабилизации напряжения СГ  $U = U_{\text{ном}}$ :

$$I_{\text{АВН}}(I_{\text{н}}) = \sqrt{\left(\frac{E_0}{X_c}\right)^2 - (I_{\text{н}} \cos \varphi)^2} - \frac{U_{\text{ном}}}{X_c} - I_{\text{н}} \sin \varphi, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол между векторами напряжения сети  $U$  и тока нагрузки  $I_{\text{н}}$ .

Указанная характеристика графически представлена на рис. 2, из которого видно, что постоянном она имеет при характер, близкий к линейному.

В приведенной характеристике используются следующие обозначения:  $I_{ABHmax+}$  – максимальное значение индуктивного тока АВН;  $I_{ABHmax-}$  – максимальное значение емкостного тока АВН;  $I_{н0}$  – реактивный ток нагрузки, при котором ток АВН меняет знак;  $I_{н.ном}$  – номинальный (максимальный) реактивный ток нагрузки.

Из регулировочной характеристики (3) следует, что в диапазоне от 0 до  $I_{н0}$  ток АВН должен иметь индуктивный характер (отстаёт от напряжения  $U$  на угол  $\pi/2$ ), а в диапазоне от  $I_{н0}$  до  $I_{н.ном}$  – емкостный характер (опережает напряжение сети  $U$  на угол  $\pi/2$ ). При этом СГ размагничивается или подмагничивается током АВН соответственно. Во всем диапазоне изменения тока нагрузки, как показано в [1], за счет реакции якоря происходит стабилизация суммарного магнитного потока СГ, вследствие чего стабилизируется его выходное напряжение.

Решив квадратное уравнение из формулы (3) относительно  $I_{н}$ , получим значение тока нагрузки  $I_{н0}$ , при котором изменяется знак тока АВН:

$$I_{н0} = \frac{U}{X_c} \left( \sqrt{\left(\frac{E_0}{U}\right)^2 - (\cos \varphi)^2} - \sin \varphi \right), \quad (4)$$

В общем случае для приведенной на рис. 2 характеристики  $I_{ABHmax+} \neq I_{ABHmax-}$ , ввиду чего использование АВН с точки зрения токовой нагрузки имеет неоптимальный характер. Получим оптимизированное значение индуктивного сопротивления генератора, когда  $I_{ABHmax+} = I_{ABHmax-}$  (при  $I_{н} = 0$  и  $I_{н} = I_{н.ном}$  соответственно), из формулы (3):

$$X_{с.опт} = \frac{2}{I_{н.ном}} \times \left( \sqrt{\left[ \left( U_{ном} - \frac{E_0}{2} \right) \sin \varphi \right]^2 + U_{ном} (E_0 - U_{ном}) - \left( U_{ном} - \frac{E_0}{2} \right) \sin \varphi} \right). \quad (5)$$

Параметр  $X_{с.опт}$  необходимо выбирать для наихудшего коэффициента мощности, следствием которого является максимальный симметричный размах тока АВН.

При исходных параметрах  $E_0 = 420$  В,  $U_{ном} = 380$  В,  $I_{н.ном} = 857$  А и  $\cos \varphi = 0,7$ , приведенных в [3],  $X_{с.опт}$  составит 0,068 Ом вместо  $X_c = 0,1$  Ом. Ток короткого замыкания генератора также можно оценить, получив соответствующие значения до оптимизации и после оптимизации по формуле:

$$I_{СГкз} = \frac{E_0}{X_c}, \quad (6)$$

Сравнительный анализ показывает, что в целях оптимизации токовой нагрузки АВН при его параллельном подключении сети и стабилизации напряжения  $U = U_{ном} = 380$  В, ток короткого замыкания генератора увеличится в  $\approx 1,46$  раз по сравнению с исходным вариантом, что составит около  $4,14 \cdot I_{н.ном}$  вместо  $2,83 \cdot I_{н.ном}$ .

Номинальный ток, на который будет рассчитан АВН, можно получить по формуле:

$$I_{ABHном} = \frac{E_0 - U_{ном}}{X_{с.опт}}, \quad (7)$$

Для приведённого случая  $I_{ABHном} \approx 0,39 I_{н.ном}$ .

Оптимизированная характеристика  $I_{ABH}(I_{н})$  изображена на рис. 3.

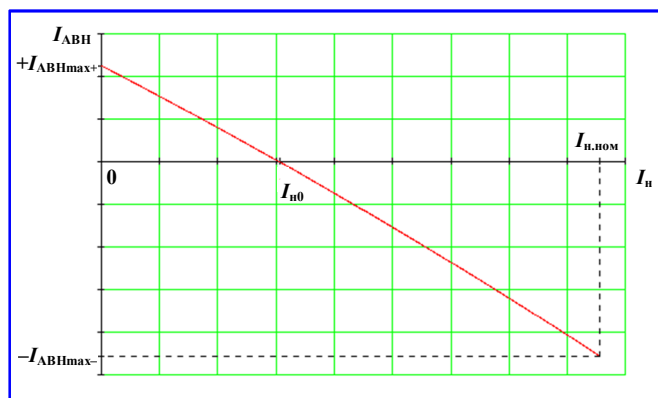


Рис. 2. Регулировочная характеристика активного выпрямителя напряжения в составе автономной электроэнергетической системы в режиме стабилизации напряжения синхронного генератора

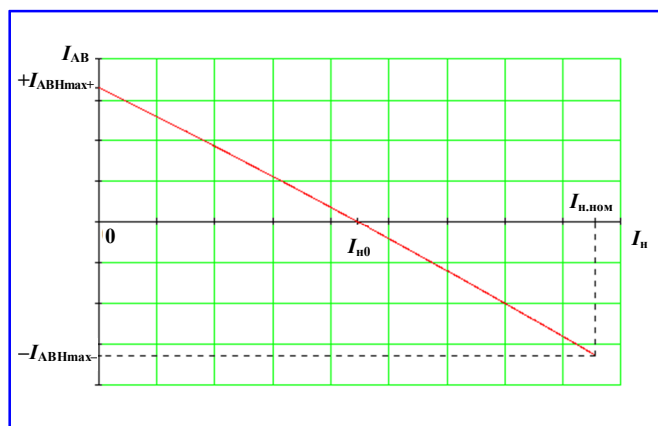
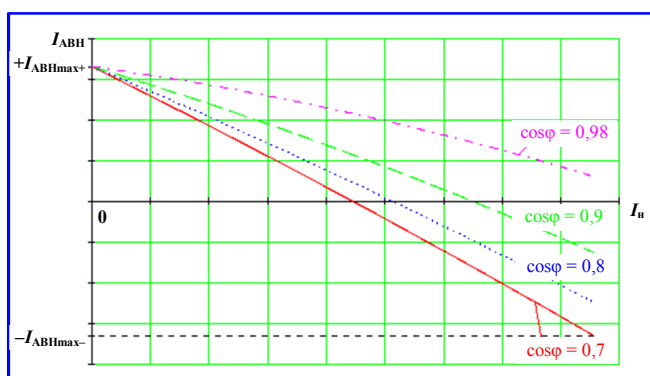


Рис. 3. Оптимизированная регулировочная характеристика активного выпрямителя напряжения в составе автономной электроэнергетической системы в режиме стабилизации напряжения синхронного генератора

Построим семейство регулировочных характеристик при  $X_c = X_{c, \text{опт}}$  для  $\cos\varphi = \{0,7; 0,8; 0,9; 0,98\}$  (рис. 4).

Из построенных характеристик на рис. 4 видно, что регулировочная характеристика имеет вид, близкий к линейному, при меньших  $\cos\varphi$ . Однако это не отменяет падения напряжения от активной составляющей тока на индуктивном сопротивлении СГ и ее влиянии на ток АВН. При наилучшем коэффициенте мощности, близком к единице, влияние падений напряжения как от активной, так и реактивной составляющей тока более заметно.



**Рис. 4.** Семейство регулировочных характеристик активного выпрямителя напряжения в составе автономной электроэнергетической системы в режиме стабилизации напряжения синхронного генератора при различных  $\cos\varphi$

В случае если для стабилизации трехфазного переменного напряжения АЭЭС используется последовательное соединение преобразователя и синхронного генератора, (например, система «синхронный генератор – выпрямитель – автономный инвертор напряжения» или система «синхронный генератор – трансформатор – автономный инвертор напряжения», изложенная в [2]), преобразователь должен быть рассчитан на номинальное значение полного тока нагрузки и выдерживать ток короткого замыкания СГ.

Из изложенного следует, что система стабилизации напряжения АЭЭС с параллельным соединением преобразователя и синхронного генератора является более предпочтительной, нежели система

с последовательным соединением преобразователя и синхронного генератора с точки зрения токовой нагрузки преобразователя.

Система автоматического регулирования (САР) напряжения СГ с постоянными магнитами на основе АВН, изложенная в [3], обеспечивает стабилизацию напряжения СГ в установившихся режимах в широком диапазоне изменения токовой нагрузки АЭЭС. При построении САР напряжения СГ в соответствии с [3] для минимизации токовой нагрузки АВН следует устанавливать параметры СГ  $E_0$  и  $X_c$  в соответствии с изложенными выше рекомендациями и регулировочной характеристикой АВН согласно (3).

### Выводы

При соотношении параметров СГ  $E_0$  и  $X_c$ , которое обеспечивает ток короткого замыкания  $I_{СГкз}$  генератора примерно в 4 раза больший номинального тока нагрузки АЭЭС, оптимизированное значение индуктивного сопротивления генератора  $X_{c, \text{опт}}$  может быть найдено исходя из регулировочной характеристики АВН в составе АЭЭС (5).

Расчёт токовой нагрузки активного выпрямителя напряжения, включённого в качестве стабилизатора напряжения СГ параллельно сети, показывает его токовую нагрузку существенно меньшую ( $\approx 40\% \cdot I_{н, \text{ном}}$  при  $\cos(\varphi) = 0,7$ ), чем при последовательном соединении синхронного генератора и преобразователя ( $100\% \cdot I_{н, \text{ном}}$ ).

### Литература

1. Стабилизация напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной нагрузке / С. А. Харитонов, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров [и др.] // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1 (25). – С. 139 – 146.
2. Новый метод стабилизации напряжения в автономной системе электроснабжения горных предприятий / Б. Ф. Симонов, С. А. Харитонов, Е. Я. Букина [и др.] // ФТПРПИ. – 2017. – № 2. – С. 59 – 68.
3. Система автоматического регулирования напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами на основе активного выпрямителя напряжения / Н. Ю. Шевырева, Ю. Т. Портной, Ю. В. Шевырëв [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2021. – Т. 181. – № 2. – С. 10 – 17.

Поступила в редакцию 11.06.2021

**Юрий Теодорович Портной**, кандидат технических наук, доцент, главный специалист, т. 8 (916) 728-71-18, e-mail: otdel32@hq.vniiem.ru.

**Азим Седрединович Абдурагимов**, заместитель генерального директора, т. (495) 365-25-45, e-mail: aas@hq.vniiem.ru.

**Дмитрий Эдуардович Доброхотов**, ведущий инженер, т. 8 (967) 295-25-95, e-mail: otdel32@hq.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## REGULATING CHARACTERISTICS OF ACTIVE VOLTAGE RECTIFIER WITHIN INDEPENDENT ELECTRICAL POWER SYSTEM AT STABILIZATION OF VOLTAGE OF SYNCHRONOUS GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS

Iu. T. Portnoi, A. S. Abduragimov, D. E. Dobrokhotov

*The independent electrical power system, which contains synchronous generator with permanent magnets and active voltage rectifier connected in parallel to the buses of synchronous generator, is considered. The regulating characteristics of active voltage rectifier are suggested. It represents the dependence of its current on the reactive current of synchronous generator load in the operating range and ensures stabilization of the output voltage of synchronous generator. It is demonstrated that with a reasonable ratio between the parameters of synchronous generator, the active voltage rectifier can be rated for the current load equal to about 40% of the nominal total load current of a synchronous generator.*

**Key words:** permanent magnet synchronous generator, active voltage rectifier, reactive current, regulating characteristics, stabilization of voltage of synchronous generator.

### References

- 1 Stabilization of voltage of synchronous generator with permanent magnets at variable loading / S. A. Kharitonov, D. V. Korobkov, D. V. Makarov [et al.] // TUSUR reports. – 2012. – No. 1 (25). – Pp. 139 – 146.
2. New method of voltage stabilization in independent power supply system of mining enterprises / B. F. Simonov, S. A. Kharitonov, E. Ia. Bukina [et al.] // Journal of Mining Science. – 2017. – No. 2. – Pp. 59 – 68.
3. Automatic voltage regulation system for synchronous permanent-magnet generator based on active voltage rectifier / N. Iu. Shevyreva, Iu. T. Portnoi, Iu. V. Shevyrev [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2021. – Vol. 181. – No. 2. – Pp. 10 – 17.

*Iurii Teodorovich Portnoi, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Chief Specialist, tel.: +7 (916) 728-71-18, e-mail: otdel32@hq.vniem.ru.*

*Azim Sedredinovich Abduragimov, Deputy Director General, tel.: +7 (495) 365-25-45, e-mail: aas@hq.vniem.ru.*

*Dmitrii Eduardovich Dobrokhotov, Leading Engineer, tel.: +7 (967) 295-25-95, e-mail: otdel32@hq.vniem.ru. (JC «VNIEM Corporation»).*