

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

SIMULATION OF PROCESSES IN THE EXCITER SYSTEM OF SYNCHRONOUS GENERATORS OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS BY USING EXTERNAL CHARACTERISTICS OF CONVERTER

Ключевые слова: синхронные генераторы, системы возбуждения синхронных генераторов, полупроводниковые преобразователи, автономные системы электроснабжения.

Функционирование синхронных генераторов с вентильной системой возбуждения автономных систем электроснабжения существенно отличается от функционирования генераторов стационарных электростанций энергосистем. В таких системах возможны специфические аварийные и ненормальные режимы, которые маловероятны или невозможны в крупных энергосистемах, например, возникновение опасных перенапряжений в цепи возбуждения генераторов при внешних коротких замыканиях. С другой стороны, к автономным системам электроснабжения зачастую предъявляются повышенные требования надежности. Выявление факторов, влияющих на надежность таких систем, является достаточно сложной технической задачей. Причем решение такой задачи, порой, возможно лишь путем физического или математического моделирования. Представлены результаты математического моделирования процессов в вентильных системах синхронных генераторов как один из этапов

создания комплексной модели автономной системы электроснабжения.

Keywords: synchronous generators, exciter system of synchronous generators, semiconductor converter, autonomous power supply systems.

The functioning of synchronous generators with a valve exciter system of autonomous power supply systems significantly differs from the functioning of generators of stationary power plants of power systems. In such systems specific emergency and abnormal modes are possible which are unlikely or impossible in large power systems, for example, the occurrence of dangerous overvoltages in the generators exciter circuit during external short-circuit failures. On the other hand, autonomous power supply systems often have increased reliability requirements. Identifying factors affecting the reliability of such systems is a complicated technical task. Moreover, the solution of such a problem sometimes is possible only through physical or mathematical modeling. This paper presents the results of mathematical modeling of processes in the synchronous generators valve systems as one of the stages of creating a comprehensive autonomous power supply system model.

Белый Владимир Борисович, к.т.н., доцент, каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 20-33-16. E-mail: vladimir-belyi@inbox.ru.

Belyi Vladimir Borisovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 20-33-16. E-mail: vladimir-belyi@inbox.ru.

Введение

Исследование режимов, которые могут возникнуть в автономных системах электроснабжения, удобнее, а порою только возможно, вести с помощью математического моделирования. Особенно это касается таких аварийных режимов, как короткие замыкания в системах.

Основным элементом автономных систем электроснабжения являются синхронные генераторы. Функционирование синхронных генераторов с вентильной системой возбуждения автономных систем электроснабжения существенно отличается от функционирования генераторов стационарных электростанций энергосистем. В таких системах возможны специфические аварийные и не-

нормальные режимы, которые маловероятны или невозможны в крупных энергосистемах, например, возникновение опасных перенапряжений в цепи возбуждения генераторов при внешних коротких замыканиях. С другой стороны, к автономным системам электроснабжения зачастую предъявляются повышенные требования надежности.

Целью работы является создание математической модели вентильного возбудителя синхронного генератора как элемента автономной системы электроснабжения.

Результаты исследований

При детальном описании процессов в возбудителях, включающих электрические машины и полупроводниковые преобразователи, получаются весьма сложные зависимости с резко изменяющимися во время коммутации параметрами. Последнее обстоятельство приводит к плохо обусловленной в целом математической модели. Проблемным остается вопрос сходимости решения при реальных значениях обратных сопротивлений вентилей.

Вместе с тем, если нет необходимости в расчете распределения электрических потенциалов по отдельным элементам схемы, а основная задача сводится к анализу критериальных режимов и перенапряжений на обмотке возбуждения,

вполне удовлетворительные результаты удается получить на базе статических внешних характеристик преобразователей [1, 2, 4, 6]. Для их определения можно использовать квазилинейный метод, принимая следующие допущения:

1. Выпрямительный блок, в соответствии с рисунком 1, предполагается включенным на «неискаженную» синусоидальную ЭДС изменяющуюся с частотой ω_1 и имеющую амплитуду $U_{ЭМ}$, через индуктивное сопротивление x_K .

2. Преобразователь состоит из идеальных вентилей, у которых сопротивление в проводящем направлении равно нулю, а в обратном – бесконечности.

3. Постоянная времени цепи возбуждения достаточно велика, так что можно пренебречь пульсацией выпрямленного тока i_f .

Известно [3, 5], что в зависимости от величины нагрузки и коммутирующей индуктивности x_K трехфазной мостовой схемы преобразователя возможны следующие режимы:

1. Диоды проводят ток группами по два-три, а уравнение внешней характеристики имеет вид:

$$\frac{U_f}{U_{ЭМ}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} - \frac{3}{\pi} \frac{\omega_1 x_K i_f}{\omega_B U_{ЭМ}} \quad (1)$$

где ω_B – базисная угловая частота, принятая при расчете параметра x_K .

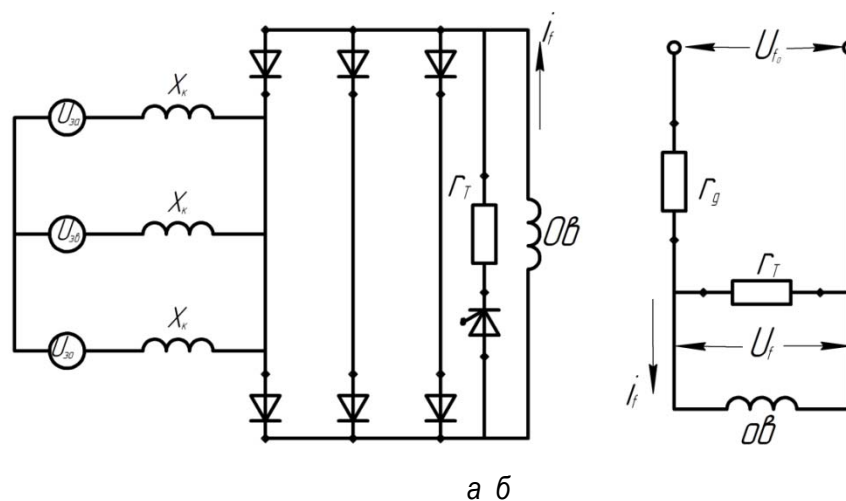


Рис. 1. Расчетная схема (а) и эквивалентная цепь возбуждения (б) синхронной машины

Предельная нагрузка, после которой преобразователь переходит на работу группами по три, находится из выражения:

$$\frac{\omega_1}{\omega_B} \frac{x_K i_f}{U_{ЭМ}} \leq \frac{\sqrt{3}}{4}. \quad (2)$$

2. Диоды работают в режиме по три, тогда

$$\left(\frac{U_f}{U_{ЭМ}}\right)^2 = \left(\frac{9}{2\pi}\right)^2 - \frac{4}{3} \left(\frac{9}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_B} \frac{x_K i_f}{U_{ЭМ}}\right)^2. \quad (3)$$

Равенство (3) справедливо, если

$$\frac{\sqrt{3}}{4} < \frac{\omega_1}{\omega_B} \frac{x_K i_f}{U_{ЭМ}} \leq \frac{3}{4}. \quad (4)$$

3. Наконец, вплоть до короткого замыкания выпрямительного блока ($U_f = 0$), вентили проводят ток группами по три-четыре, причем

$$\frac{U_f}{U_{ЭМ}} = \frac{9}{\pi} - \frac{9}{\pi} \frac{\omega_1}{\omega_B} \frac{x_K i_f}{U_{ЭМ}}. \quad (5)$$

Расчет напряжения U_f в переходных режимах с использованием кусочно-линейных функций (1,3,5), представленных на рисунке 2 сплошной линией, оказывается не всегда удобным. Проще подобрать для всех участков аппроксимирующее выражение, например, вида (4)

$$\left(\frac{U_f}{U_{ЭМ}}\right)^2 = 2,725 - 1,272 \frac{\omega_1}{\omega_B} \frac{x_K i_f}{U_{ЭМ}} \frac{U_f}{U_{ЭМ}} - \left(\frac{\omega_1}{\omega_B} \frac{x_K i_f}{U_{ЭМ}}\right)^2. \quad (6)$$

Построенная на рисунке 2 пунктирная кривая подтверждает высокую точность формулы (6).

Вполне удовлетворительные данные часто удается получить при линеаризации внешней характеристики, когда

$$\frac{U_f}{U_{ЭМ}} = a + b \frac{\omega_1}{\omega_B} x_K \frac{i_f}{U_{ЭМ}}. \quad (7)$$

В любом случае для заданных величин “неискаженной” ЭДС и коммутирующей индуктивности напряжение возбуждения является функцией лишь тока i_f . При этом первый член в (7), равный $U_{f0} = a U_{ЭМ}$, можно трактовать как напряжение источника эквивалентной цепи возбуждения (рис. 1б), активное сопротивление которой увеличено за счет добавочной составляющей $r_g = b \frac{\omega_1}{\omega_B} x_K$.

Отметим, что уравнения (1), (3), (5)-(7) пригодны только при соблюдении условий $U_f \geq 0, i_f \geq 0$.

Если в нестационарных режимах нарушается тождественность последних неравенств, следует положить $U_f = 0, i_f = 0$, что аналогично совмещению внешней характеристики рисунка 2 с осями абсцисс и ординат, соответственно, за пределами $\frac{\omega_1}{\omega_B} x_K \frac{i_f}{U_{ЭМ}} \geq 1$ и $\frac{U_f}{U_{ЭМ}} \geq 1,652$.

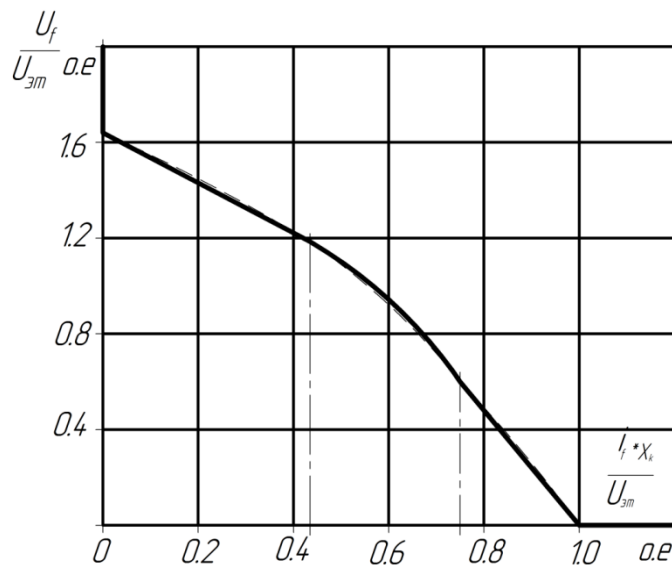


Рис. 2. Внешняя характеристика трехфазного выпрямительного блока (сплошная линия) и ее аппроксимация (пунктирная линия)

Таким образом, при переходе тока возбуждения через ноль, напряжение U_f , при наличии преобразования с идеальными вентилями, безгранично нарастает. С целью снижения его потолочного значения параллельно обмотке возбуждения через полупроводящий элемент включается защитное сопротивление (рис. 1а). Поэтому при $i_f < 0$ для определения U_f следует воспользоваться выражением $U_f = i_f r_T$.

В качестве иллюстрации на рисунке 1а представлена схема подключения обмотки возбуждения на выход трехфазного выпрямительного моста, питаемого от синусоидального напряжения через x_k , при этом постоянная времени обмотки возбуждения $T_f = \frac{x_f L_f}{r_f} = 0,487$ С, а в установленном режиме $\frac{U_f}{U_{ЭМ}} = 0,74$ С.

Результаты (кривые 1 и 2, рис. 2), полученные с использованием (6), (7), показывают, что в начальной стадии режима за счет перераспределения напряжений между обмоткой возбуждения и коммутирующей индуктивностью наблюдается почти двукратная форсировка U_f , даже при постоянной амплитуде $U_{ЭМ}$. В среднем вполне удовлетворительное совпадение теоретических и опытных (пунктирных) зависимостей позволяет рекомендовать описанный метод для многовариантных расчетов.

Выводы

Предлагаемый подход к моделированию процессов в вентильном преобразователе синхронного генератора позволяет с достаточной точностью описать его работу. Данная работа является одним из этапов создания математической модели автономной системы электроснабжения, которая позволит проводить исследования ненормальных и аварийных режимов. Результаты таких исследований могут служить основанием для корректировки подходов по обеспечению надежности

и живучести автономных систем электроснабжения.

Библиографический список

1. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование: пер. с англ. – К.: МК-Пресс, 2005. – 288 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink / Проектирование механотронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА Век, 2008. – 368 с.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.
4. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
5. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-кий дом МЭИ, 2007, 200 с.
6. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

References

1. Braun M. Istochniki pitaniya. Raschet i konstruirovaniye / per. s angl. – K.: «MK-Press», 2005. – 288 s.
2. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink / Proektirovaniye mekhanotronnykh sistem na PK. – SPb.: KORONA Vek, 2008. – 368 s.
3. Zinovev G.S. Osnovy silovoy elektroniki. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004. – 672 s.
4. Maevskiy O.A. Energeticheskie pokazateli ventilnykh preobrazovateley. – M.: Energiya, 1978. – 320 s.
5. Popkov O.Z. Osnovy preobrazovatelnoy tekhniki: ucheb. posobie dlya vuzov. – M.: Izd. dom MEI, 2007. – 200 s.
6. Shreyner R.T. Matematicheskoe modelirovaniye elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty. – Yekaterinburg: URO RAN, 2000. – 654 s.

