Список литературы

1. *Тюнин А. В.* Разработка методики численного моделирования течения газа в полости впускного канала двигателя внутреннего сгорания*:* дис. … канд. техн. наук / А. В. Тюнин. — Барнаул, 2010.

2. *Ганин Н. Б.* Поэлементное совершенствование выпускных систем дизелей с наддувом: дис. … канд. техн. наук / Н. Б. Ганин; ЦНИДИ. — Л., 1985.

УДК 621.313.12

А. П. Баранов,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

Л. Е. Егоров,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО БЕСЩЕТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

MATHEMATICAL MODEL OF HIGH-VOLTAGE BRUSHLESS SYNCHRONOUS GENERATOR

Предложены математические модели явнополюсного высоковольтного синхронного генератора и его бесщеточной системы возбуждения во вращающихся координатах.

The mathematical models of salient-pole high-voltage synchronous generator with brushless excitation system in d, q axis are presented.

Ключевые слова: математическая модель, бесщеточный синхронный генератор, бесщеточная система возбуждения.

Key words: mathematical model, brushless synchronous generator, brushless excitation system.

В СОВРЕМЕННЫХ единых высоковольтных судовых автоматизированных электроэнергетических системах (ЕВСАЭЭС) с комплексами Azipod, например на танкерах ледового класса типа «Михаил Ульянов» с системой динамического позиционирования судна, используются бесщеточные синхронные генераторы высокого напряжения (6.6 кВ) с дизельным приводом. В этом синхронном генераторе (СГ) в качестве возбудителя используется обращенная синхронная машина с трехфазной обмоткой на роторе и обмоткой возбуждения на статоре. Напряжение трехфазной обмотки выпрямляется вращающимся диодным выпрямителем и подается к обмотке возбуждения СГ.

Для регулирования напряжения возбуждения используется электронный импульсный регулятор постоянного напряжения, который преобразует постоянное напряжение источника питания в регулируемое напряжение обмотки возбуждения синхронного возбудителя. В таких преобразователях используются силовые полупроводниковые управляемые ключи IGBT-транзисторы, а регулирование напряжения в них происходит за счет широтно-импульсной модуляции напряжения источника питания.

Математическая модель СГ в осях d и q в относительных единицах может быть описана системой уравнений [1, с. 29]:

$$\left.\begin{aligned}
u_d &= -ri_d + p\psi_d + (1+s)\psi_q;\\
u_q &= -ri_q - p\psi_q + (1+s)\psi_d;\\
u_f &= i_f + T_{d0}p\psi_f;\\
0 &= i_D + T_D p\,\psi_D;\\
0 &= i_Q + T_Q p\,\psi_Q;\\
m_e &= m_э + T_J ps;\\
&\\
\psi_d &= -x_d i_d + i_f + i_D;\\
\psi_q &= x_q i_q + i_Q;\\
\psi_f &= -\frac{x_{ad}^2}{x_f} i_d + i_f + \frac{x_{ad}}{x_f} i_D;\\
\psi_D &= -\frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} i_d + \frac{x_{ad}}{x_{rd}} i_f + i_D;\\
\psi_Q &= \frac{x_{aq}^2}{x_{rq}} i_q + i_Q,
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где u_d, u_q — напряжения контуров статора; i_d, i_q — ток в обмотках статора; ψ_d, ψ_q — потокосцепления статорных обмоток; i_f, ψ_f — ток и потокосцепление обмотки возбуждения; i_D, i_Q — токи в демпферных обмотках; ψ_D, ψ_Q — потокосцепления демпферных обмоток; $s = \frac{\omega_r - \omega_s}{\omega_s}$ — скольжение ротора машины относительно синхронной скорости; $m_э = \psi_d i_q + \psi_q i_d$ — электромагнитный момент машины; $p = d/dt_б$ — символ дифференцирования при аргументе $t_б$; r — активное сопротивление обмотки статора; T_{d0}, T_D, T_Q — постоянные времени цепи возбуждения и демпферных обмоток по продольной и поперечной осям; $T_J = \frac{\omega_s^3 J}{P_б} = \frac{\omega_s^2 J}{M_б}$ — инерционная постоянная агрегата; x_d, x_q — синхронные реактивности статора по продольной и поперечной осям; x_{ad}, x_{aq} — реактивности самоиндукции статора по продольной и поперечной осям; x_{rd}, x_{rq} — полные реактивности демпферных обмоток по продольной и поперечной осям.

Для перевода величин из относительных единиц в физические необходимо умножить их на базисные величины.

Для статорной цепи СГ в качестве базисных величин принимаются величины: амплитуды номинальных статорных напряжения и тока: $U_б = U_{фн}\sqrt{2}$, $I_б = I_н\sqrt{2}$; потокосцепление $\Psi_б = U_б / \omega_б$, где $\omega_б = \omega_s = 2\pi f_б$ — синхронная угловая скорость вращения ротора (при $f_б$ = 50 Гц, $\omega_б$ = 314,16 рад/с); сопротивление $Z_б = U_б / I_б$; полная мощность $S_б = \frac{3}{2} U_б I_б$; вращающий момент, соответствующий активной мощности $P_б = S_б$ при синхронной угловой скорости ω_s, $M_б = \frac{P_б}{\omega_б}$.

Для обмотки возбуждения СГ принимаются следующие базисные величины:

$$I_{fб} = \frac{U_б}{\omega_б M_{fб}}; U_{fб} = I_{fб} R_f; \Psi_{fб} = L_f I_{fб}.$$

Для продольного демпфирующего контура:

$$I_{Dб} = \frac{U_б}{\omega_б M_{aD}}; U_{Dб} = I_{Dб} R_D; \Psi_{Dб} = L_D I_{Dб}.$$

Для поперечного демпфирующего контура:

$$I_{Q\text{б}} = \frac{U_\text{б}}{\omega_\text{б} M_{aQ}};\ U_{Q\text{б}} = I_{Q\text{б}} R_Q;\ \Psi_{Q\text{б}} = L_Q I_{Q\text{б}}.$$

В уравнениях (1) учтены все существенные электромагнитные и электромеханические процессы в синхронной машине и демпферной обмотке. В зависимости от конкретных особенностей поставленной задачи уравнения (1) могут быть заметно упрощены в той или иной их части без существенного ущерба искомому решению.

Что касается уравнений всех средств автоматизации СГ (системы автоматического регулирования напряжения и частоты вращения ротора СГ, системы распределения активных и реактивных нагрузок, системы автоматической синхронизации и других средств автоматизации, имеющих непосредственную связь с синхронной машиной), то их уравнения должны быть преобразованы таким образом, чтобы входные и выходные переменные токи и напряжения представлялись соответствующими составляющими изображающих векторов по осям d и q в относительных единицах.

Переходя к математической модели, описывающей бесщеточный возбудитель во вращающихся координатах, необходимо отметить, что так как машина является обращенной, то ее оси вращения связаны со статором, а не с ротором, как в традиционных моделях. Так как координатные оси возбудителя отличаются и не связаны с осями СГ, введем для них дополнительные обозначения d_1, q_1, Таким образом, уравнения синхронного возбудителя в относительных единицах примут вид:

$$\left.\begin{aligned}
u_{d_1} &= -r i_{d_1} + p\psi_{d_1} + (1+s)\psi_{q_1};\\
u_{q_1} &= -r i_{q_1} - p\psi_{q_1} + (1+s)\psi_{d_1};\\
u_f &= i_f + T_{d0} p\psi_f;\\
\psi_{d_1} &= -x_{d_1} i_{d_1} + i_f;\\
\psi_{q_1} &= x_{q_1} i_{q_1};\\
\psi_f &= -\frac{x_{ad_1}^2}{x_f} i_{d_1} + i_f,
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

u_{d_1}, u_{q_1}, u_f, i_{d_1}, i_{q_1}, i_f, ψ_{d_1}, ψ_{q_1}, ψ_f — напряжения, токи и потокосцепления по продольной и поперечной осям якоря и обмотки возбуждения возбудителя соответственно; p — оператор дифференцирования; s — скольжение ротора машины относительно синхронной скорости; T_{d0} — постоянная времени цепи возбуждения; r, x_{d_1}, x_{q_1}, x_f — активные и реактивные сопротивления обмоток; x_{ad_1} — реактивность самоиндукции якоря по продольной оси.

При приближенных исследованиях переходных процессов синхронных машин полные уравнения можно упростить за счет исключения трансформаторных ЭДС в контурах статора. При одновременном отбрасывании $p\psi_{d_1}$, $p\psi_{q_1}$ и $s\psi_{d_1}$, $s\psi_{q_1}$ погрешности в значительной степени взаимно компенсируются. Дальнейшее упрощение возможно за счет отказа от учета активных сопротивлений якоря машины ($r = 0$), в этом случае уравнения возбудителя будут иметь более простой вид:

$$\left.\begin{aligned}
u_{d_1} &= \psi_{q_1};\\
u_{q_1} &= \psi_{d_1};\\
u_f &= i_f + T_{d0} p\psi_f;\\
\psi_{d_1} &= -x_{d_1} i_{d_1} + i_f;\\
\psi_{q_1} &= x_{q_1} i_{q_1};\\
\psi_f &= -\frac{x_{ad_1}^2}{x_f} i_{d_1} + i_f.
\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Кроме того, необходимо учесть связь обмотки якоря возбудителя (ОЯВ) и обмотки возбуждения (ОВ) самой машины через вращающийся выпрямитель (ВВ). Для этого можно заменить реальную нагрузку ОЯВ в виде ОВ и ВВ некоторым эквивалентным активным сопротивлением $R_Э$ [2, с. 118].

Тогда

$$\left.\begin{aligned} &U_{\text{возб}} = k_u\sqrt{\left(u_{d_1}\right)^2+\left(u_{q_1}\right)^2};\; i_{\text{возб}} = k_i\sqrt{\left(i_{d_1}\right)^2+\left(i_{q_1}\right)^2};\\ &u_{d_1} = i_{d_1}R_Э;\; u_{q_1} = i_{q_1}R_Э;\; R_Э = R_{\text{возб}}k_u / k_i, \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

где коэффициенты преобразования напряжения k_u и тока k_i зависят от структуры вращающегося выпрямителя и параметров обмотки возбуждения машины.

Предложенная модель бесщеточного синхронного генератора может использоваться при компьютерном моделировании ЕВСАЭЭС с комплексами Azipod для перспективных судов.

Список литературы

1. *Баранов А. П.* Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации: учебник для вузов / А. П. Баранов, М. М. Раимов. — СПб.: ЭЛМОР, 1997. — 232 с.

2. *Бут Д. А.* Бесконтактные электрические машины / Д. А. Бут. — М.: Высш. шк., 1990. — 417 с.

УДК 621.873.019.3

Е. Н. Андрианов,
канд. техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. Н. Иванов,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА МЕХАНИЗМОВ ВРАЩЕНИЯ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ

FEATURES OF DESIGNING AND CALCULATION OF MECHANISMS OF ROTATION OF PORTAL CRANES

В статье анализируются вопросы повышения конструктивной надежности и расчета механизмов вращения, которые следует учитывать при проектировании новых портальных кранов в условиях современного состояния инженерной подготовки и отечественного производства.

The article is devoted to technical analysis of the efficient ways for increasing constructing reliability and revolving mechanism calculation. These efficient ways are needed to take into consideration portal crane projects in modern engineering training and domestic manufacture.

Ключевые слова: кран, конструкция, механизм, опорно-поворотное устройство, эксплуатационные нагрузки.

Key words: crane, construction, mechanism, supporting and turning arrangement, service loads.