

УДК 621.3.049

А.М. Олейников, профессор, д-р техн. наук, Л.Н. Канов, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет**Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sevastopol.ua***ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ МАЛОМОЩНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ МЕТОДОМ СХЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Построена схемная модель тихоходного мало мощного генератора переменного напряжения для автономных установок электроснабжения. Приведены результаты моделирования стационарных и переходных режимов генератора.

Введение

В автономных мало мощных установках электроснабжения все чаще применяются генераторы с возбуждением от постоянных магнитов на роторе, что объясняется их высокой надежностью и простотой конструкции. Повышение требований к качеству электрической энергии в системах электроснабжения при различных изменениях нагрузки требует исследования работы генераторов как в стационарных, так и в переходных режимах. В то время как вопросам исследования процессов в синхронных генераторах с электромагнитным возбуждением посвящено немалое количество работ, для генераторов с постоянными магнитами такие сведения не систематизированы. В [1-3] приведены методики расчета параметров и конструкции генераторов с постоянными магнитами, рассмотрены приемы стабилизации частоты и напряжения, построены опытные внешние характеристики. В [4] даны упрощенные математические модели мало мощных магнитоэлектрических машин, приведена методика расчета и экспериментальная методика определения параметров и электромагнитных характеристик вентильных двигателей с высококоэрцитивными магнитами. Таким образом, во многих публикациях рассматриваются отдельные аспекты двигательных режимов машин с постоянными магнитами. В то же время представляет интерес исследование генераторных режимов таких машин на основе их математического описания, характерной особенностью которого является зависимость параметров от частоты вращения. Эта особенность затрудняет исследование математической модели традиционными методами.

Целью статьи является разработка методики применения схемного моделирования для исследования основных энергетических характеристик генераторов с постоянными магнитами в стационарных и переходных режимах.

Постановка задачи

Математическое описание таких генераторов при общепринятых допущениях о ненасыщенности магнитной системы и синусоидальности токов и напряжений сохраняет общие черты описания синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением. В ортогональной системе координат с опережающим вращением поперечной оси уравнения статорной обмотки генератора имеют вид [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_d}{1,5} + r_a i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q i_q \omega p + M_{dD} \frac{di_D}{dt} - M_{qQ} i_Q \omega p &= 0; \\ \frac{u_q}{1,5} + r_a i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d i_d \omega p + M_{qQ} \frac{di_Q}{dt} + M_{dD} i_D \omega p + M_{md} I_M \omega p &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Здесь u_d, i_d, u_q, i_q – продольные и поперечные составляющие фазных напряжений и токов генератора; i_D, i_Q – составляющие демпфирующих токов в массивных областях магнитопровода ротора; L_d, L_q – индуктивности фазной обмотки статора вдоль соответствующих осей; M_{dD}, M_{qQ}, M_{md} – коэффициенты взаимной индукции между обмоткой статора, демпфирующими контурами и магнитом вдоль этих осей; I_M – фиктивный постоянный ток магнита; p – число пар полюсов; ω – угловая скорость вращения ротора.

Рассматриваемые генераторы обычно не имеют специальных демпфирующих обмоток на роторе; роль демпфирующих контуров выполняют массивные части магнитопровода ротора, которые описываются следующими уравнениями [2]

$$r_D i_D + L_D \frac{di_D}{dt} + 1,5 M_{dD} \frac{di_d}{dt} = 0; \quad r_Q i_Q + L_Q \frac{di_Q}{dt} + 1,5 M_{qQ} \frac{di_q}{dt} = 0, \quad (2)$$

где r_D, r_Q – сопротивления демпфирующих контуров вдоль соответствующих осей; L_D, L_Q – индуктивности этих контуров.

К выражениям (1), (2) следует добавить общее уравнение механического равновесия ротора

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_C + M_{ЭМ} = M_{BP}, \quad (3)$$

где M_C – момент сопротивления; $M_{ЭМ}$ – электромагнитный момент; M_{BP} – вращающий момент (ветроколеса или гидротурбины); J – момент инерции. Входящий в (3) момент сопротивления обусловлен трением и мощностью потерь в магнитопроводе якоря P_M

$$M_C = k_{TP}\omega + P_M\omega^{-1}, \quad (4)$$

где k_{TP} – коэффициент трения, а мощность потерь складывается из потерь в зубцах P_z и в спинке якоря P_a

$$P_M = p_z B_z^2 m_z + p_a B_a^2 m_a. \quad (5)$$

Здесь B_z, B_a, m_z, m_a – индукции и массы зубцов и спинки якоря; p_z, p_a – коэффициенты, зависящие от частоты перемагничивания [1]: $p_z = \frac{f(f+100)}{700}$, $p_a = \frac{f(f+220)}{2500}$, $f = \frac{p\omega}{2\pi}$.

Индукция определяется магнитным потоком

$$\Phi = \Phi_0 + 1,5M_{md}i_d + M_{mD}i_D, \quad (6)$$

где M_{mD} – коэффициент взаимной индукции между магнитом и продольным демпфирующим контуром; Φ_0 – поток холостого хода.

Электромагнитный момент генератора зависит от составляющих тока статора

$$M_{ЭМ} = 1,5pi_d(L_q i_q + 1,5M_{qQ}i_Q) - 1,5pi_q(L_d i_d + 1,5M_{dD}i_D + 1,5M_{md}I_M). \quad (7)$$

Задачей исследования является на основании уравнений (1)-(3) вместе с выражениями (4)-(7) построение схемной модели генератора, пригодной для анализа его статических и динамических характеристик в различных режимах.

Методика исследования

В вышеприведенной математической модели наибольший интерес представляет определение индуктивностей и взаимных индуктивностей $L_i, i = d, q, D, Q$; $M_{i,j}, i, j = d, q, D, Q, m$, а также сопротивлений демпфирующих контуров r_D, r_Q . Индуктивности L_D, L_Q и взаимные индуктивности $M_{dD}, M_{qQ}, M_{md}, M_{mD}$ выражаются через магнитные входные и взаимные проводимости

$$L_i = w_i^2 \Lambda_i; i = D, Q; w_i = 1; w_m = 1; \quad (8)$$

$$M_{dD} = w_d \Lambda_{dD}; M_{qQ} = w_q \Lambda_{qQ}; M_{md} = w_d \Lambda_{md}; M_{mD} = \Lambda_{mD}, \quad (9)$$

а числа витков эквивалентных обмоток находятся согласно [2] как

$$w_d = \frac{2,7wk_0k_{ad}}{p}; w_q = \frac{2,7wk_0k_{aq}}{p},$$

где k_{ad}, k_{aq} – коэффициенты приведения поля реакции к полю ротора по продольной и поперечной осям; k_0 – обмоточный коэффициент; w – число витков фазной обмотки.

Входные и взаимные магнитные проводимости определим из схем замещения магнитной цепи

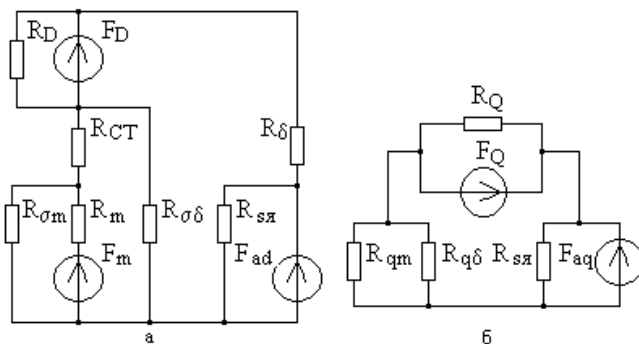


Рисунок 1 – Схемы замещения магнитных цепей генератора по продольной а) и поперечной б) осям

генератора по продольной и поперечной осям, изображенным на рисунке 1, а,б, где обозначены $F_{ad}, F_m, F_D, F_Q, F_{aq}$ – МДС соответственно продольной реакции якоря, постоянного магнита, одновитковых демпфирующих обмоток по осям d и q , поперечной реакции якоря; $R_D, R_{CT}, R_{\sigma m}, R_m, R_{\sigma \delta}, R_{sy}, R_{\delta}$ – магнитные сопротивления соответственно массивного магнитопровода по пути потока в магнит, стыка между магнитом и полюсным башмаком, рассеяния магнита, тела магнита,

рассеяния полюсных башмаков, рассеяния якорной обмотки, рабочего зазора; $R_Q, R_{q\delta}, R_{qm}$ – магнитные сопротивления соответственно массивного магнитопровода по поперечной оси, пути потока в воздухе через полюсный башмак, пути потока в воздухе через магнит под действием МДС F_{aq} [2].

Для определения индуктивности L_D и взаимной индуктивности M_{dD} из выражений (8), (9) найдем входную и взаимную проводимости Λ_D, Λ_{dD} по рисунку 1,а с заменой $F_D = 1, F_m = F_{ad} = 0$. Непосредственно из схемы получаем

$$\Lambda_{dD} = \frac{1}{R_{\delta} + (R_{\delta}^{-1} + (R_{CT} + (R_{\delta m}^{-1} + R_m^{-1})^{-1})^{-1})^{-1}}; \quad \Lambda_D = \frac{1}{R_D} + \Lambda_{dD}. \quad (10)$$

Для определения взаимных индуктивностей M_{md} и M_{mD} из выражений (8), (9) по схеме на рисунке 1,а с заменой $F_D = 0, F_{ad} = 0$ и $F_m = 1$ найдем $\Lambda_{mD} = \Lambda_{md} = \frac{1}{R_{CT} R_m R_{\delta} \Delta}$, где Δ – узловый определитель цепи. Для определения индуктивности и взаимной индуктивности L_Q, M_{qQ} из выражений (8), (9) по схеме на рисунке 1,б с заменой $F_Q = 1$ и $F_{aq} = 0$ найдем входную Λ_Q и взаимную Λ_{qQ} проводимости

$$\Lambda_{qQ} = \frac{1}{R_{qm}} + \frac{1}{R_{q\delta}}; \quad \Lambda_Q = \frac{1}{R_Q} + \Lambda_{qQ}. \quad (11)$$

Сопротивления рассеяния $R_{\delta m}, R_{q\delta}$ и магнитные сопротивления R_m, R_{CT}, R_{δ} определяются традиционными способами [1], а магнитные сопротивления отдельных участков массивных магнитопроводов находятся как вещественные части комплексного магнитного сопротивления по формуле Л.Р. Неймана

$$R_{D,Q} = 1,13 \frac{l}{\Pi} \sqrt{\frac{\gamma f}{\mu}}, \quad (12)$$

где l – эквивалентная длина участка магнитной цепи в направлении вектора магнитной индукции; Π – периметр поперечного сечения участка; γ – удельная электрическая проводимость магнитопровода; μ – эквивалентная магнитная проницаемость магнитопровода.

Аналогично определяются эквивалентные активные сопротивления

$$r_{D,Q} = 0,4 \frac{l'}{\Pi'} \sqrt{\frac{\mu_0 f}{\gamma}}, \quad (13)$$

где l' – эквивалентная длина линии вихревого тока в массивном участке; Π' – периметр эквивалентного сечения для вихревого тока: $\Pi' = 2(l + \Delta)$, где Δ – глубина проникновения в магнитопровод магнитной волны. Из выражений (12), (13) следует, что $R_{D,Q}, r_{D,Q}$ зависят от частоты перемагничивания. Следовательно, $L_D = \Lambda_D, L_Q = \Lambda_Q$ также являются функциями частоты.

Параллельная схемная модель генератора для индуктивной нагрузки, соответствующая системе уравнений (1)-(3), (6), изображена на рисунке 2, где обозначены линейные проводимости: $g1 = g3 = 1,5r_a, g2 = g4 = r_H, g8 = 1$; нелинейные проводимости $g5 = g6 = r_D(\omega), g7 = M_C \cdot \omega^{-1}$ по (4), (5); линейные емкости: $C1 = 1,5L_d, C2 = C4 = L_H, C3 = 1,5L_q, C7 = J$; нелинейные емкости: $C5 = L_D(\omega), C6 = L_Q(\omega)$;

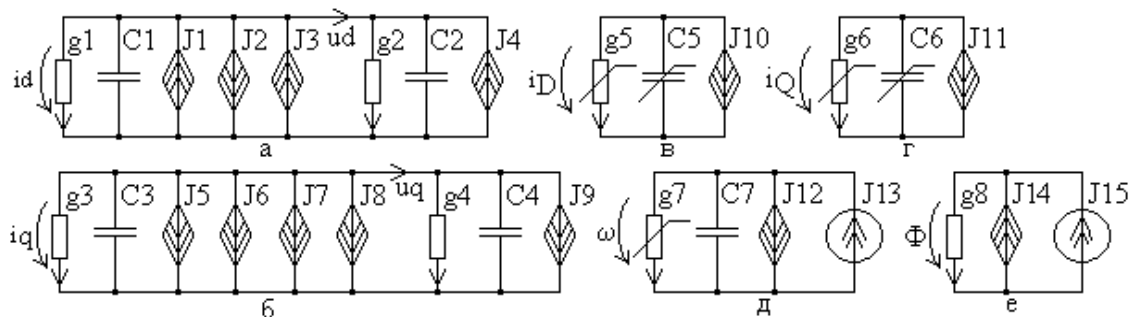


Рисунок 2 – Параллельная схемная модель генератора:
а, б – продольный и поперечный контуры статора; в, г – продольный и поперечный демпфирующие контуры;
д – контур скорости; е – формирователь магнитного потока

линейные управляемые источники тока: $J2 = 1,5M_{dD} \frac{di_D}{dt}$, $J6 = 1,5M_{qQ} \frac{di_Q}{dt}$, $J8 = 1,5M_{md} I_M p^0$, $J10 = 1,5M_{dD} \frac{di_d}{dt}$, $J11 = 1,5M_{qQ} \frac{di_q}{dt}$, $J14 = M_{mD} i_D + 1,5M_{md} i_d$ по (6); нелинейные управляемые источники тока: $J1 = 1,5L_q p^0 i_q$, $J3 = 1,5M_{qQ} p^0 i_Q$, $J4 = L_H p^0 i_q$, $J5 = 1,5L_d p^0 i_d$, $J7 = 1,5M_{dD} p^0 i_D$, $J9 = L_H p^0 i_d$, $J12 = M_{ЭМ}$ по (7); независимые источники тока: $J13 = M_{BP}$, $J15 = \Phi_0$. На рисунке 2 напряжения на проводимостях $g1, g3$ численно равны составляющим тока статора i_d, i_q ; напряжения на проводимостях $g5, g6$ – составляющим тока в демпфирующих контурах i_D, i_Q ; напряжение на емкости $C7$ численно равно скорости вращения ротора ω ; напряжение на проводимости $g8$ – магнитному потоку. Для анализа стационарного режима схемная модель упрощается за счет исключения емкостей $C1...C7$, контуров ϵ, ζ , а также управляемых источников тока, зависящих от производных.

Материалы и результаты исследования

Исследование проведено на примере генератора мощностью 10 кВА с напряжением $U_{\Phi H} = 133 \text{ В}$, частотой вращения $n = 1250 \text{ об/мин}$ [1]. Фазные обмотки статора этого генератора содержат по 188 витков и имеют сопротивление $r_a = 0,39 \text{ Ом}$. Число пар полюсов $p = 24$, магнитный поток в режиме холостого хода $\Phi_0 = 0,0027 \text{ Вб}$. Индуктивности статорной обмотки в продольном и поперечном направлениях, определенные при номинальной частоте 50 Гц , имеют значения $L_d = 5,248 \text{ мГн}$, $L_q = 3,178 \text{ мГн}$.

Магнитные сопротивления рассеяния магнита и полюсного башмака составляют соответственно $R_{\sigma m} = 2,96 \cdot 10^6 \text{ Гн}^{-1}$ и $R_{\sigma \delta} = 1,93 \cdot 10^6 \text{ Гн}^{-1}$, магнитные сопротивления постоянного магнита и стыка между магнитом и полюсным башмаком равны соответственно $8,02 \cdot 10^3 \text{ Гн}^{-1}$ и $8,9 \cdot 10^3 \text{ Гн}^{-1}$. Магнитное сопротивление рабочего зазора, равного $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, составляет $R_{\delta} = 2,28 \cdot 10^5 \text{ Гн}^{-1}$.

Частотно зависимые магнитные сопротивления массивных участков полюсных башмаков, подсчитанные по выражению (12), имеют вид $R_D(\omega) = R_Q(\omega) = 1,115 \cdot 10^4 \sqrt{\omega}$, а активные сопротивления этих участков, подсчитанные по выражению (13), определяются формулой $r_D(\omega) = r_Q(\omega) = 7,68 \cdot 10^{-4} \sqrt{\omega}$. В этих выражениях ω означает угловую скорость вращения ротора генератора в радианах в секунду.

На основании выражений (8)-(11) найдем индуктивности и взаимные индуктивности: $L_D = 4,09 \cdot 10^{-1} \left(\frac{21,9}{\sqrt{\omega}} + 1 \right) \text{ мГн}$, $M_{dD} = 1,08 \cdot 10^{-1} \text{ мГн}$; $M_{dm} = 1,07 \cdot 10^{-2} \text{ мГн}$, $M_{mD} = 4,06 \cdot 10^{-1} \text{ мГн}$; $M_{qQ} = 0,1 \text{ мГн}$ (здесь приняты $w_d = 26,4$; $w_q = 3,37$).

На рисунке 3 изображены внешние характеристики генератора, полученные просчетом схемной модели при изменении полного сопротивления индуктивной нагрузки при неизменном $\cos \varphi = 0,899$ и при номинальной скорости. Для наглядности графики мощности нагрузки P и потерь мощности ΔP показаны уменьшенными в 10^2 раз, а график потока – увеличенным в 10^4 раз. Из рисунка 3 следует, что максимальный КПД достигается вблизи номинального

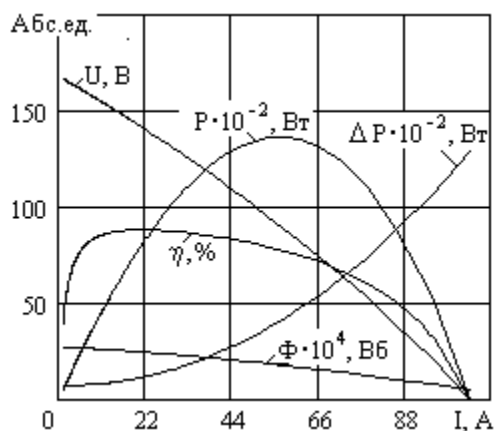


Рисунок 3 – Внешние характеристики генератора при неизменной скорости

тока $I_H = 27,7 A$ и составляет 82%. Ток короткого замыкания составит $104 A$. Увеличение тока сопровождается размагничиванием генератора из-за влияния продольной составляющей тока статора.

Ротаторы подобных генераторов сравнительно редко вращаются с постоянной скоростью; чаще при неизменной скорости ветра или падающей воды вращение происходит под действием постоянного

Рисунок 4 – Реостатные характеристики генератора при неизменном вращающем моменте

Рисунок 5 – Переходный процесс подключения дополнительного сопротивления нагрузки

момента.

На рисунке 4 изображены внешние характеристики рассматриваемого генератора при постоянном номинальном моменте $M_{вр} = 780 H \cdot м$ и при изменении активного сопротивления нагрузки. Как следует из рисунка 4, в этих условиях возникает эффект стабилизации тока нагрузки, сопровождающийся изменением скорости вращения и напряжения при сравнительно высоком КПД (график напряжения показан уменьшенным в 10 раз).

В заключение рассмотрим типичный переходный процесс подключения дополнительного активного сопротивления нагрузки на генератор в номинальном режиме. На рисунке 5 изображены графики такого процесса при подключении дополнительного активного сопротивления $5,68 \text{ Ом}$ последовательно с номинальным сопротивлением нагрузки. Процесс рассчитан по полной схемной модели с начальными напряжениями на конденсаторах, соответствующими номинальному, стационарному режиму с параметрами: $i_d(0) = -25,1 A$, $i_q(0) = -29,3 A$, $\omega(0) = 13,1 \text{ с}^{-1}$. Процесс сопровождается значительными всплесками токов в демпферных контурах ввиду малости их активных сопротивлений. Длительность переходного процесса невелика и определяется в основном моментом инерции ротора генератора.

Представленные характерные режимы работы генератора находятся в достаточной степени соответствия с опытными данными, полученными другими исследователями (см., например, опытные графики в [1,2]), что подтверждает достоверность построенной модели. Весьма перспективным направлением дальнейших исследований в этой области является применение построенной схемной модели для оптимизации генераторов по эксплуатационным и энергетическим показателям.

Выводы

Построена схемная модель генератора с постоянными магнитами, адекватно отражающая основные режимы его работы. Анализ стационарного режима показал, что ток короткого замыкания подобных генераторов превышает номинальный в 3...3,5 раза, а отсутствие стабилизации скорости существенно влияет на работу генератора. Исследование внешних характеристик выявило своеобразный режим стабилизации тока при изменении сопротивления нагрузки, когда ротор вращается под действием постоянного момента. Электромагнитные переходные процессы в обмотках таких генераторов кратковременны, и их длительность в основном определяется моментом инерции ротора. Предложенная схемная модель пригодна для анализа и других статических и динамических характеристик в различных режимах.

Библиографический список

1. Кривцов В.С. Ветрогенераторы / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. — Харьков; Севастополь: Изд-во Нац. аэрокосм. ун-та и Севастоп. нац. техн. ун-та, 2003. — 399 с.
2. Балагуров В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. — М.: Энергия, 1988. — 280 с.

3. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А.Н. Ледовский. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 168 с.

4. Белый П.Н. Упрощенная математическая модель для описания магнитного поля в рабочем зазоре магнитоэлектрических двигателей / П.Н. Белый // Електротехніка і електромеханіка. — 2004. — № 4. — С. 13–14.

Поступила в редакцию 13.11.2006 г.