

УДК 621.313.3

Определение реактивностей и кратности тока короткого замыкания синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов

А. М. Сугробов*, А. М. Русаков, Е. О. Казимиров,
Н. А. Окунеева, А. Н. Соломин

Получены аналитические выражения для определения индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов и кратности тока короткого замыкания, позволяющие оценить оказанное на них влияние принятых на стадии проектного расчета электромагнитных нагрузок, коэффициентов характеризующих геометрию полюсной системы и других параметров, а также производить выбор этих условно независимых переменных с учетом требуемой кратности тока короткого замыкания и стабильности магнитных свойств постоянных магнитов.

Ключевые слова: синхронная электрическая машина, постоянный магнит, индуктивные сопротивления и коэффициенты формы магнитного поля якоря по продольной и поперечной осям, кратность тока короткого замыкания, электромагнитные нагрузки, размеры постоянного магнита.

Успешное решение задач, поставленных при проектировании синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов, во многом зависит от точности электромагнитных расчетов на этапе формирования исходного расчетно-графического образа проектируемой машины в виде основных размеров активной части, ее обмоточных данных и основных электромагнитных параметров. К ним относят (важные с точки зрения влияния на результаты проектных расчетов) индуктивные сопротивления по продольной x_d и поперечной x_q осям, от которых зависят форма и положение точек номинального режима на их внешних и механических характеристиках, а также качество пере-

ходных процессов и кратность тока короткого замыкания для генераторов и пускового тока для электродвигателей, величина которой значимо влияет на размеры постоянных магнитов (в основном на их высоту вдоль линии намагничивания) и определяет способность электрических машин работать с перегрузками.

Определение индуктивных сопротивлений указанной классификационной группы электрических машин сопряжено с необходимостью учета влияния на продольную и поперечную составляющие магнитного потока реакции якоря магнитной проницаемости сплавов постоянных магнитов μ_m , которая для большинства используемых в настоящее время в электромашиностроении сплавов постоянных магнитов близка к магнитной проницаемости воздуха μ_0 .

* SugrobovAM@mpei.ru

Значительно более низкая по сравнению с магнитной проводимостью воздушного зазора магнитная проводимость постоянных магнитов вызывает существенные изменения в картине распределения МДС якоря по отдельным участкам магнитной цепи машины. Она же приводит к изменению традиционных для электрических машин с электромагнитным возбуждением соотношений между проводимостями и индуктивными сопротивлениями по продольной x_{ad} и поперечной x_{aq} осям. Электрические машины с постоянными магнитами характеризуются меньшими по сравнению с большинством конструктивных исполнений электрических машин с электромагнитным возбуждением значениями индуктивных сопротивлений по продольной оси, большими значениями отношения x_{aq}/x_{ad} и более заметной долей индуктивного сопротивления рассеяния обмоток якоря x_s .

Наиболее значимыми по степени влияния на выходные параметры, характеристики и показатели машины при построении ее системы возбуждения из постоянных магнитов являются магнитные проводимости рассеяния системы возбуждения, так как они в этом случае оказываются соизмеримыми или, что не исключено, при определенных условиях большими проводимостями самих постоянных магнитов и по ним может замыкаться значительная часть продольной составляющей магнитного потока реакции якоря.

Учесть все эти факторы при выполнении проектных электромагнитных расчетов по традиционным методикам расчета синхронных машин достаточно просто, если принять допущение, что первые гармонические потоки реакции якоря в воздушном зазоре, созданные первыми гармоническими МДС якоря по продольной и поперечной осям машины при изменении проводимостей магнитной системы индуктора, изменяются также, как изменяются вследствие этого магнитодвижущие силы, приложенные к воздушным зазорам каждой из этих осей.

В соответствии с этим допущением первую гармоническую магнитного потока по продольной оси машины с возбуждением от постоянных магнитов Φ_{adm} можно представить как произведение первой гармонической магнитного потока той же машины при $\mu \rightarrow \infty$ (применительно к машинам с электромагнитным возбуждением) на некоторый коэффициент $k_{\delta-d}$, учитывающий ту часть МДС якоря по продольной оси:

$$F_{dm} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{m I w_{\phi}}{p} k_{o1} \sin \psi,$$

которая затрачивается на проведение магнитного потока Φ_{adm} через воздушный зазор:

$$\Phi_{adm} = \Phi_{ad\infty m} k_{\delta-d}, \quad (1)$$

где $\Phi_{ad\infty m}$ — магнитный поток, найденный по первой гармонической кривой распределения поля продоль-

ной реакции якоря при $\mu \rightarrow \infty$, т.е. фактически в машине с электромагнитным возбуждением при тех же размерах и геометрии индуктора, что и в машине с возбуждением от постоянных магнитов.

$$\Phi_{ad\infty m} = \frac{2}{\pi} \tau l_i B_{ad\infty m} k_d. \quad (2)$$

В (1), (2) m , p , w_{ϕ} , k_{o1} , k_d , Ψ , τ , l_i , $B_{ad\infty m}$ — число фаз и пар полюсов проектируемой машины, число последовательно соединенных витков в фазе, обмоточный коэффициент, коэффициент формы кривой магнитного поля якоря по продольной оси машины с электромагнитным возбуждением, угол между векторами тока и ЭДС холостого хода машины (рис. 1), полюсное деление, расчетная длина расточки якоря, амплитуда первой гармонической распределения магнитной индукции якоря в воздушном зазоре.

Определение численных значений коэффициента k_d , применительно к электрическим машинам с возбуждением от постоянных магнитов, является значительно более сложной задачей по сравнению с определением их применительно к машинам с электромагнитным возбуждением, в которых без ощутимого изменения конечного результата представляется возможным пренебречь магнитным сопротивлением полюсной системы индуктора. Сплавы современных высококачественных в магнитном отношении материалов постоянных магнитов обладают низкой магнитной проницаемостью (близкой к магнитной проницаемости воздуха), но не настолько, чтобы ее можно было бы принять равной проницаемости воздуха и избежать при этом ошибок при определении значений коэффициента k_d , а также других коэффициентов и электромагнитных параметров проектируемых машин. Магнитная проводимость для потока реакции якоря, помимо проницаемости постоянных магнитов, зависит от его размеров. Вместе с тем данных, учитывающих это обстоятельство при определении коэффициентов формы магнитного поля якоря, в доступной для ознакомления литературе не содержится. Кривые для определения коэффициентов формы поля якоря приводятся в ней лишь в функции геометрии полюсной системы (см., например [1]). Объем, занимаемый в индукторе постоянными магнитами, считается при этом заполненным воздухом со свойственной ему магнитной проницаемостью, равной μ_0 .

Сформулированное выше допущение относительно перераспределения МДС якоря по продольной оси между воздушными зазорами и постоянными магнитами, предполагающее введение в расчет коэффициента $k_{\delta-d}$, позволяет устранить указанный недостаток, дополнив его аналитическими выражениями, определяющими параметры, характеризующие магнитное поле якоря с учетом магнитной проницаемости и размеров постоянных магнитов.

При приведенной выше форме записи первой гармонической магнитного потока по продольной оси в машинах с возбуждением от постоянных магнитов их

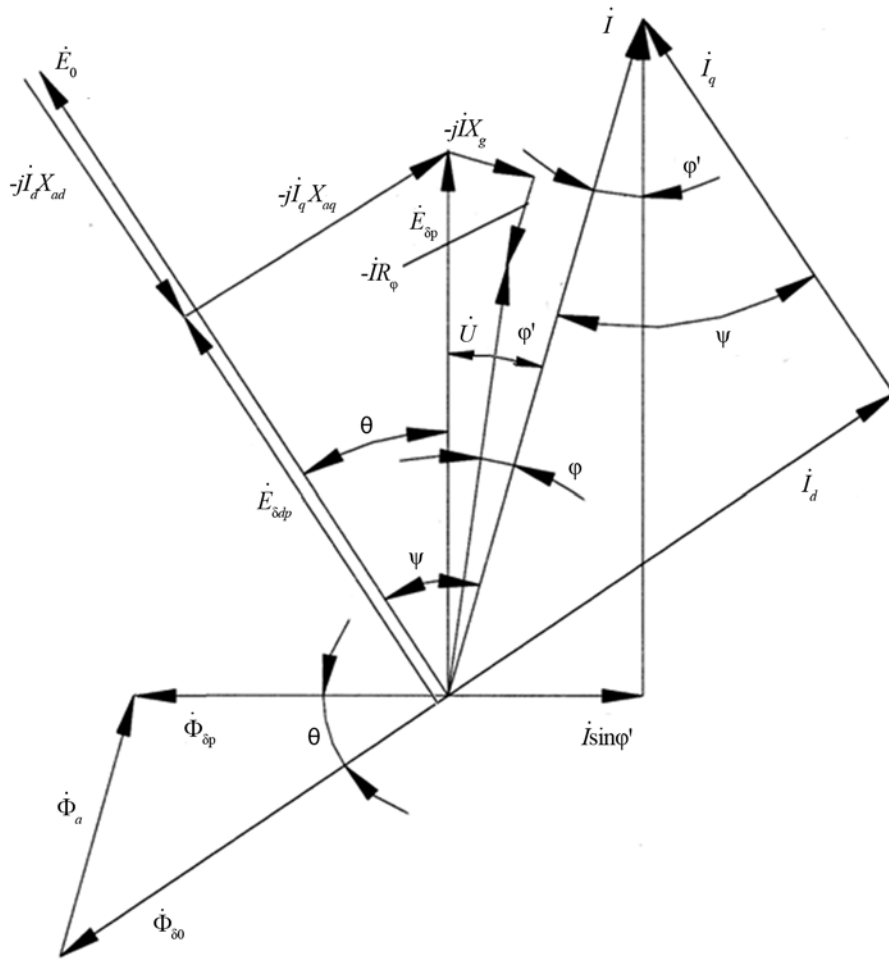


Рис. 1. Диаграмма Blondеля

индуктивное сопротивление по той же оси x_{adm} определяется из выражения:

$$x_{adm} = x_{ad} k_{\delta-d} = \frac{4}{\pi p} m f (w_{\phi} k_{o1})^2 \Lambda_{ad} k_{\delta-d}, \quad (3)$$

где x_{ad} — индуктивное сопротивление по продольной оси машины с электромагнитным возбуждением; f — частота тока; Λ_{ad} — магнитная проводимость по продольной оси машины, $\Lambda_{ad} = \mu_0 \tau l k_d / (\delta k_{\delta})$; δ — длина воздушного зазора; k_{δ} — коэффициент воздушного зазора.

При необходимости определения индуктивного сопротивления по продольной оси машины с электромагнитным возбуждением на самом начальном этапе проектирования до определения его главных размеров (диаметра D , и длины расточки l_i) может быть использовано выражение [2]:

$$x_{ad} = x_{ad}^* z'_n, \quad (4)$$

где z'_n — полное сопротивление электрической цепи фазы обмотки якоря,

$$z'_n = \sqrt{(R_n + R_{\phi})^2 + (x_n + x_s)^2} = S_s / (mI^2) = E_{\delta p} / I = k_E U_n, \quad (5)$$

где x_{ad}^* — индуктивное сопротивление по продольной оси машины с электромагнитным возбуждением, представленное в долях полного электрического сопротивления фазы обмотки якоря,

$$x_{ad}^* = \frac{x_{ad}}{z'_n} = \mu_0 k_{o1} k_d A^* / (\pi \delta^* k_{\delta} \alpha_i k_B). \quad (6)$$

При создании (5), (6) использованы следующие обозначения параметров, функцией которых являются z'_n и x_{ad}^* : R_n , x_n и R_{ϕ} , x_s — активные и индуктивные сопротивления нагрузки и обмотки якоря (x_s — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки); $E_{\delta p}$ — индуцируемая в обмотке якоря ЭДС; U_n — номинальное значение напряжения; $k_E = U_n / E_{\delta p}$; $A^* = A / B_{\delta}$ — отношение линейной нагрузки к магнитной индукции в воздушном зазоре; $\delta^* = \delta / \tau$ — длина воздушного зазора в долях полюсного деления τ ; k_{δ} — коэффициент воздушного зазора; α_i — расчетный коэффициент полюс-

ного перекрытия; k_B — коэффициент формы кривой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре. Согласно [2]:

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} k_{ис1} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{1}{k_\Phi},$$

где $k_{ис1} = \Phi_{\delta1} / \Phi_{\delta\max}$ — коэффициент использования магнитного потока, равный отношению первой гармоники магнитного потока в воздушном зазоре на длине полюсного деления $\Phi_{\delta1}$ к максимальному его значению на той же длине расточки $\Phi_{\delta\max}$; $k_\Phi = 1/k_{ис}$ — коэффициент магнитного потока [3].

Расчетные соотношения для определения коэффициента $k_{\delta-d}$ можно получить, воспользовавшись эквивалентной схемой замещения магнитной цепи машины по продольной ее оси при отсутствии насыщения магнитопровода статора (рис. 2).

Решение этой схемы относительно искомого коэффициента выглядит как:

$$k_{\delta-d} = F_\delta / F_{dm} = \left(1 + (0,5\Lambda_\delta + \Lambda_{\sigma M})\right)^{-1} = \left(1 + \frac{\alpha_M h_M^*}{\mu_M^* \delta^* k_\delta \left(1 + \frac{B_{M0}}{\mu_M H_{M0}} \frac{\sigma_{M0} - 1}{\sigma_{M0}}\right)}\right)^{-1}. \quad (7)$$

При выводе выражения (7) использованы следующие выражения:

$$\begin{aligned} \Lambda_\delta &= \mu_0 \alpha_i \tau l_i / \delta k_\delta; \\ \Lambda_M &= \mu_M b_M l_i / 2h_M = \mu_M \alpha_i \tau l_i / 2h_M \alpha_M; \\ \Lambda_{\sigma M} &= \Phi_{\sigma M} / F_{M0} = (\Phi_{M0} - \Phi_{\delta0}) / F_{M0} = \\ &= \Phi_{M0} (1 - 1/\sigma_{M0}) / (2H_{M0} h_M) = \\ &= 0,5 \frac{B_{M0} \alpha_i \tau l_i}{H_{M0} h_M \alpha_M} (1 - 1/\sigma_{M0}). \end{aligned}$$

В приведенных выражениях использованы следующие обозначения параметров: F_δ — падение магнит-

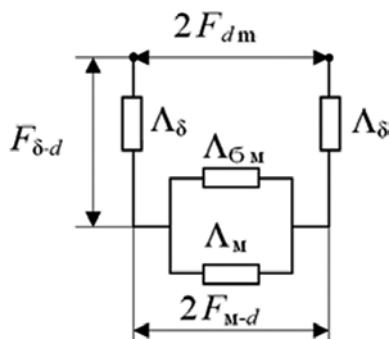


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения магнитной цепи индуктора

ного потенциала в воздушном зазоре; Λ_δ — магнитная проводимость воздушного зазора; Λ_M , $\Lambda_{\sigma M}$ — магнитные проводимости постоянного магнита и рассеяния постоянного магнита на пару полюсов; $\mu_M^* = \mu_M / \mu_0$ — относительная проницаемость постоянного магнита; B_{M0} , H_{M0} — магнитная индукция и напряженность магнитного поля в нейтральном сечении постоянных магнитов; Φ_{M0} , $\Phi_{\delta0}$, $\Phi_{\sigma M}$ — магнитные потоки в нейтральном сечении постоянного магнита, в воздушном зазоре и магнитный поток рассеяния постоянного магнита; F_{M0} , σ_{M0} — МДС и коэффициент рассеяния магнитного потока постоянного магнита при холостом ходе; h_M , $h_M^* = h_M / \tau$ — высота полюса постоянного магнита в абсолютных и относительных единицах (на стадии проектного расчета h_M^* определяется в соответствии с [4]. Коэффициент α_M определяется как:

$$\alpha_M = \alpha_i \tau / b_M,$$

где b_M — ширина постоянного магнита в поперечном сечении машины.

Аналитическое выражение для определения доли продольной составляющей МДС якоря, приложенной к постоянному магниту (размагничивающая его), согласно приведенной на рис. 2 схеме замещения, имеет вид:

$$k_{M-d} = \frac{F_M}{F_{dm}} = \left[1 + \frac{\mu_M^* \delta^* k_\delta}{\alpha_M h_M^*} \left(1 + \frac{B_{M0}}{\mu_M H_{M0}} \frac{\sigma_{M0} - 1}{\sigma_{M0}}\right)\right]^{-1}.$$

Сумма коэффициентов

$$k_{\delta-d} + k_{M-d} = 1.$$

Магнитная индукция и напряженность магнитного поля в нейтральном сечении постоянного магнита B_{M0} и H_{M0} применительно к редкоземельным магнитам определяются из выражений:

$$B_{M0} = \frac{B_r}{\alpha_M \sigma_{M0} + \mu_M^* \delta^* k_\delta k_{\mu 0} / h_M^*}; \quad H_{M0} = (B_r - B_{M0}) \frac{1}{\mu_M}, \quad (8)$$

где B_r — остаточная индукция сплава постоянных магнитов; $k_{\mu 0}$ — коэффициент насыщения магнитной цепи при холостом ходе,

$$k_{\mu 0} = 1 + \frac{\sum F_{\delta-Fe}}{2F_\delta},$$

где $\sum F_{\delta-Fe}$ — падение магнитного потенциала в воздушных зазорах и стальных участках магнитопровода.

Для определения индуктивного сопротивления по продольной оси x_{adm} при известных параметрах электрической машины с постоянными магнитами и магнитных характеристиках сплава из которого они изготовлены достаточно выполнить следующие расчеты:

из выражения (8) определить B_{M0} и H_{M0} ;

подставив их значения в (7), вычислить значение коэффициента $k_{\delta-d}$;

используя выражения (4) — (6), найти индуктивное сопротивление по продольной оси электрической машины с электромагнитным возбуждением x_{ad} при тех же размерах полюсов и той же геометрии полюсной системы, которые имеет индуктор с постоянными магнитами (для определения коэффициента k_d можно воспользоваться кривыми, определяющими зависимость этого коэффициента от геометрии полюсной системы и воздушного зазора, приведенными в [5]);

из выражения (3) определить индуктивное сопротивление по продольной оси машины с возбуждением от постоянных магнитов.

Индуктивное сопротивление по продольной оси является одним из главных параметров, определяющих величину кратности тока короткого замыкания проектируемой машины k , знание которой необходимо для определения высоты постоянных магнитов, обеспечивающей стабильность их магнитных свойств при всех предусмотренных техническим заданием режимах работы машины.

Применительно к генераторному режиму коэффициент k может быть предварительно найден из выражения:

$$k = \frac{I_k}{I_n} \approx \frac{E_0}{x_{dm} I_n}, \quad (9)$$

где I_k, I_n — действующие значения токов короткого замыкания и номинального; E_0 — ЭДС, индуцируемая в фазе обмотки якоря постоянными магнитами.

Согласно приведенной на рис. 1 диаграмме Блонделя:

$$\begin{aligned} E_0 &= E_{\delta dp} + I_d x_{adm} = \\ &= \sqrt{E_{\delta p}^2 - (I_n \cos \psi_p)^2} x_{aqm}^2 + (I_n \sin \psi_p) x_{adm} = \quad (10) \\ &= E_{\delta p} \left(\sqrt{1 - x_{aqm}^{*2} \cos^2 \psi_p} + x_{adm}^* \sin \psi_p \right). \end{aligned}$$

После подстановки (10) в (9) получим

$$k = \frac{1}{x_{dm}^*} \left(\sqrt{1 - x_{aqm}^{*2} \cos^2 \psi_p} + x_{adm}^* \sin \psi_p \right). \quad (11)$$

В выражениях (10), (11) приняты следующие обозначения входящих в них параметров: x_{dm} — полное индуктивное сопротивление по продольной оси проектируемой машины с постоянными магнитами, $x_{dm} = x_{adm} + x_s$; $E_{\delta dp}$ — результирующая ЭДС по продольной оси машины; ψ_p — значение угла ψ в расчетном режиме.

Если принять $\cos \varphi = 1$ (проектируемый генератор — вентильный) и считать, что сопротивление нагрузки R_n в расчетном режиме значительно больше активного сопротивления фазы обмотки якоря R_ϕ , то (см. рис. 2):

$$\psi = \arctg \frac{x_{aqm} + x_s}{\sqrt{z_n'^2 - x_s^2}} = \arctg \frac{x_{qm}^{*2}}{\sqrt{1 - x_s^{*2}}},$$

$$\text{где } x_{aqm}^* = x_{aqm} / z_n' = \mu_0 k_{o1} k_q A^* / (\pi \delta^* k_\delta \alpha_i k_B),$$

$$x_s^* = x_s / z_n' = \pi \mu_0 A^* \sum \lambda / \left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \alpha_i k_{o1} m q \right) \quad (\text{см. [6]}).$$

В последних двух выражениях: $q = z_c / 2mp$ — число пазов на полюс и фазу (p — число пар полюсов; z_c — число зубцов на статоре); k_q — коэффициент формы поля якоря по поперечной оси; $\sum \lambda$ — сумма коэффициентов пазового, лобового и дифференциального рассеяний обмотки якоря.

В электрических машинах с полюсными наконечниками при индукциях, не превышающих значений магнитной индукции в верхней части «колена» кривой намагничивания стали, введение в конструкцию индуктора постоянных магнитов вместо электромагнитов не приводит к заметному изменению картины магнитного поля по поперечной оси, поэтому значения коэффициента k_q можно определять также, как для машин с электромагнитным возбуждением, используя с этой целью кривые, приведенные, например в [5]. Можно воспользоваться с той же целью зависимостями значений этого коэффициента от геометрии полюсной системы, приведенными в [1].

Выводы

Приведенные в данной статье расчетные соотношения предназначены для использования в качестве составной части традиционных методик проектных расчетов генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, результаты которых являются исходными данными для дальнейших оптимизационных расчетов.

Литература

1. Зечихин Б.С., Журавлев С.В., Ситин Д.А. Расчетные коэффициенты синхронных машин с редкоземельными магнитами // Электричество. 2009. № 5. С. 35 — 40.
2. Сугробов А.М., Русаков А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов. М: Издательский дом МЭИ, 2012.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М: Изд-во МЭИ, 2004.
4. Сугробов А.М., Русаков А.М., Окунева Н.А., Казмиров Е.О. Алгоритм определения размеров редкоземельных постоянных магнитов применительно к системам возбуждения синхронных электрических генераторов // Электричество. 2015. № 10. С. 32 — 37.
5. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин. М: Высшая школа, 1982.
6. Сугробов А.М. Проектирование электромашинных преобразователей для систем электрооборудования автономных объектов. М: Изд-во МЭИ, 2005.

Статья поступила в редакцию 16.12.2015