

Защита от коротких замыканий высокоскоростных синхронных генераторов, возбуждаемых от постоянных магнитов

МАКРИДЕНКО Л.А., САРЫЧЕВ А.П., КОВАРСКИЙ М.Е., ПАНАСЮК М.Б., СИДОРОВ А.О.

Рассмотрены особенности электромагнитных и электромеханических процессов при внезапных коротких замыканиях (КЗ) в автономных генераторных установках с синхронными высокоскоростными турбогенераторами с магнитоэлектрическим возбуждением. Представлен анализ возможных мест возникновения КЗ: внутри турбогенератора или на его зажимах, между турбогенератором и преобразователем частоты, в преобразователе частоты, за преобразователем в судовой электросети. Отмечается, что при возникновении КЗ внутри турбогенератора или на его зажимах для снижения тока необходимо выполнить торможение ротора турбогенератора. Торможение обеспечивается подачей воды в полость рашетки статора. Время гашения КЗ при этом соизмеримо с таким значением времени в турбогенераторах традиционного исполнения, в которых снижение тока КЗ обеспечивается выведением тока из обмотки возбуждения. В остальных случаях защита от КЗ обеспечивается коммутационной аппаратурой.

К л ю ч е в ы е с л о в а: синхронный генератор, возбуждение от постоянных магнитов, электромагнитные процессы, короткое замыкание, схемы возникновения замыканий, защитные мероприятия

Аварийный режим короткого замыкания (КЗ) в судовой энергосети, в том числе в генераторной установке (ГУ), может приводить к тяжелым последствиям [1], поэтому защита от КЗ составляет предмет тщательного исследования.

До недавнего времени в качестве основного источника электроэнергии на судах применяли синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением. При возникновении КЗ вне ГУ происходит отключение потребителей. Время отключения определяется уставкой устройства защитного отключения и составляет с таким возбуждением доли секунды. При возникновении КЗ внутри генератора или на его выводах система управления снижает поток возбуждения, в результате чего ток якоря падает до нуля. Время отключения КЗ (время гашения тока возбуждения) составляет примерно 10 с [2]. Однако данный вид генераторов имеет ряд существенных недостатков. В последнее время в качестве судового источника электрической энергии все чаще используются высокоскоростные синхронные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов. Они позволяют создавать генераторные установки, удовлетворяющие высоким техническим требованиям, а также значительно улучшать массогабаритные показатели ГУ. Принципиальная схема установки с высокоскоростным синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов представлена на рис. 1, на

котором обозначено: ПТУ – паротурбинная установка; ПЧ – преобразователь частоты.

При создании синхронных генераторов с постоянными магнитами для выработки электроэнергии на судах возникает ряд вопросов, в том числе связанных с КЗ [3]. Как указывалось выше, оно может произойти: внутри генератора или на его выводных клеммах; в электросети от генератора до преобразователя частоты; в преобразователе частоты; в судовой электросети.

Защиты от КЗ в судовой сети и в преобразователе частоты хорошо отработаны и далее рассматриваться не будут.

Короткое замыкание внутри генератора может произойти между его фазами, между витками фазы обмотки статора, а также между фазами обмотки статора и корпусом.

Рассмотрим трехфазное КЗ на выводах классического синхронного генератора с обмоткой возбуждения. Примем допущение, что симметричное трехфазное КЗ обмотки статора происходит при

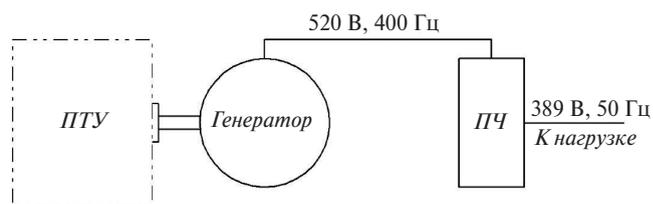


Рис. 1. Принципиальная схема генераторной установки с высокоскоростным синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов

работе генератора на холостом ходу, а частота вращения, насыщение и напряжение обмотки возбуждения не изменяются.

Активное сопротивление обмотки статора значительно меньше индуктивного, поэтому уравнение фазы имеет вид:

$$-\frac{d\psi}{dt} = ir.$$

При КЗ, когда активное сопротивление $r=0$,

$$-\frac{d\psi}{dt} = 0.$$

Это означает, что при внезапном КЗ потокосцепление обмотки статора не изменяется: $\psi = \text{const}$.

Процесс протекания КЗ в классическом синхронном генераторе с электромагнитным возбуждением (с обмоткой возбуждения) проиллюстрирован на рис. 2, а–в. Синхронный генератор выполнен двухполюсным, с одной обмоткой статора, с одной обмоткой возбуждения и демпферной обмоткой на роторе — для простоты понимания происходящих процессов при внезапном трехфазном КЗ; через Φ_a и Φ_b на рис. 2 обозначены поток обмотки статора и поток возбуждения.

На рис. 2, а показан начальный момент КЗ, при изменении тока статора демпферная обмотка препятствует проникновению потока в обмотку возбуждения. Этот этап КЗ характеризуется сверхпереходным сопротивлением X_d'' .

На рис. 2, б показан следующий момент развития КЗ. После того как поток от обмотки статора проник в демпферную обмотку, его изменению препятствует обмотка возбуждения. Этот этап КЗ характеризуется переходным сопротивлением X_d' .

На рис. 2, в показано распределение магнитных потоков при установившемся КЗ в генераторе с электромагнитным возбуждением. Режиму устано-

вившего КЗ соответствует синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси X_d .

Ударный ток КЗ в синхронных генераторах с электромагнитным возбуждением достигает 20-кратного значения номинального тока.

В синхронных генераторах с возбуждением от постоянных магнитов из-за отсутствия демпферных обмоток и обмоток возбуждения переходный процесс отсутствует, а момент времени КЗ, характеризующийся сверхпереходным сопротивлением, ничтожно мал, так как в качестве демпферной клетки в таких генераторах выступает бандаж ротора, выполненного из материала с большим удельным сопротивлением и, соответственно, с малой постоянной времени переходного процесса. По этой причине ударный ток КЗ в генераторах с возбуждением от постоянных магнитов максимально равен удвоенному установившемуся значению.

При возникновении КЗ коммутационно-защитная аппаратура отключает потребителей и дает команду на прекращение подачи пара в турбину. Однако из-за большой накопленной кинетической энергии ротор будет продолжать вращаться по инерции. Поскольку магнитное поле ротора, созданное постоянными магнитами, сохраняется неизменным, то под действием ЭДС токи КЗ практически неизменного значения будут продолжать протекать внутри генератора до полной остановки его ротора.

Исследование численных значений параметров КЗ проведено на примере высокоскоростного генератора с возбуждением от постоянных магнитов мощностью 1,5 МВт, 12000 об/мин (рис. 3).

При обнаружении КЗ внутри генератора время отключения подачи пара с момента сигнала на отключение составляет не более 1 с. Ротор рассматриваемого генератора при свободном выбеге останавливается за время, равное примерно 180 с.

Время выбега ротора генератора можно уменьшить, для этого предложен и исследован новый

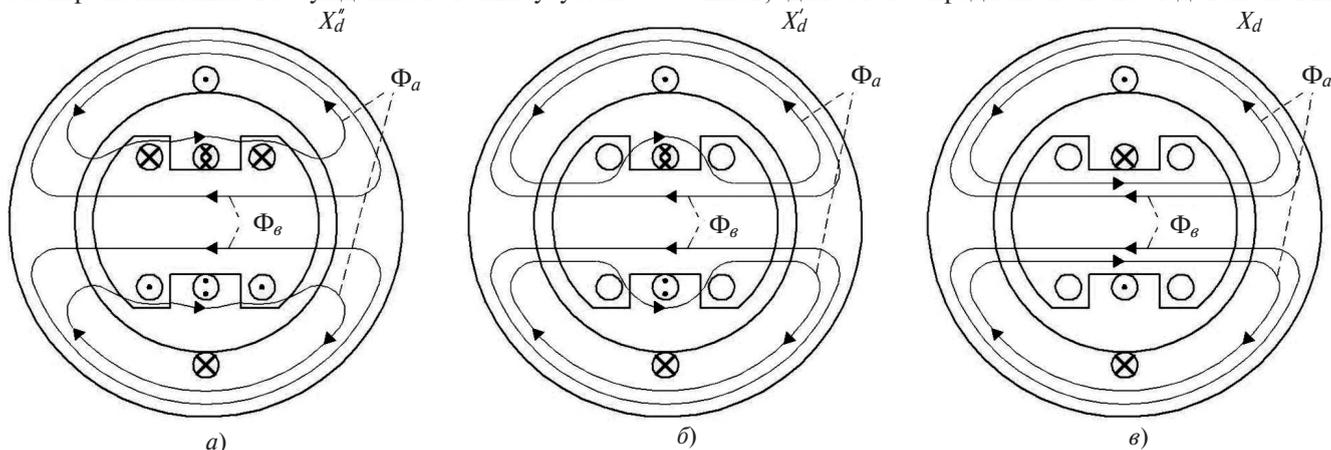


Рис. 2. Короткое замыкание в синхронном генераторе с электромагнитным возбуждением

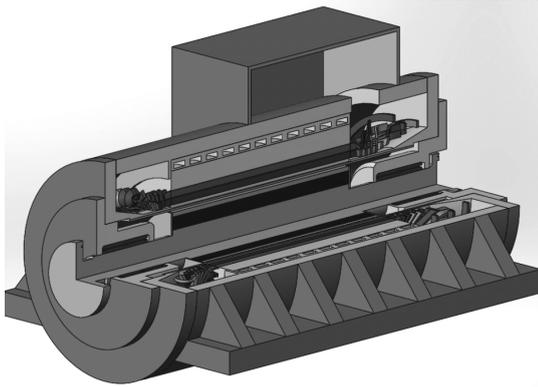


Рис. 3. Общий вид генератора 1,5 МВт, 12000 об/мин

способ торможения ротора. При диагностировании КЗ внутри генератора либо в цепи между его выводными концами и ПЧ полость вращения ротора заполняется водой, ее объем составляет примерно 10 л. Заполнение полости водой происходит со скоростью не менее 2 л/с. Мощность потерь на трение ротора генератора о воздух равна примерно 2 кВт, мощность потерь на трение ротора генератора о воду составляет 1,25 МВт. Потери, выделяемые при вращении ротора в воде, обеспечивают многократное увеличение тормозного момента.

Расчеты были проведены в программе конечно-элементного трехмерного моделирования гидрогазодинамики. Выбег ротора генератора с заполненной водой полостью ротора был исследован для трех случаев: без действия КЗ (рис. 4); под действием двухфазного КЗ (рис. 5); под действием трехфазного КЗ (рис. 6).

Из рис. 5 и рис. 6 видно, что время выбега ротора генератора с залитой водой полостью ротора под действием КЗ составляет не более 10 с. Накопленная энергия ротора

$$E = J \frac{\omega^2}{z} = 1,9 \text{ МДж},$$

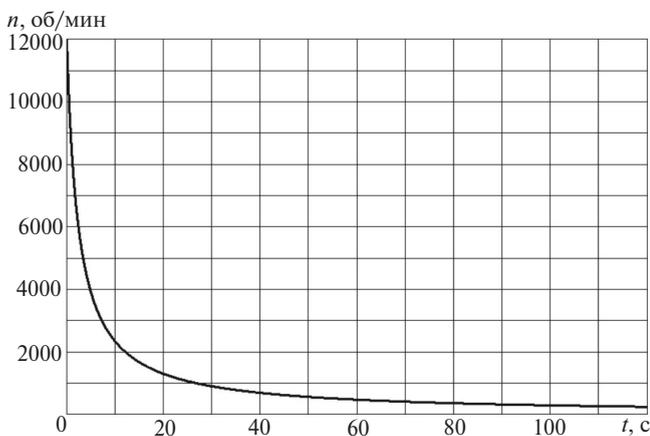


Рис. 4. Время выбега генератора с заполненной полостью ротора без действия короткого замыкания

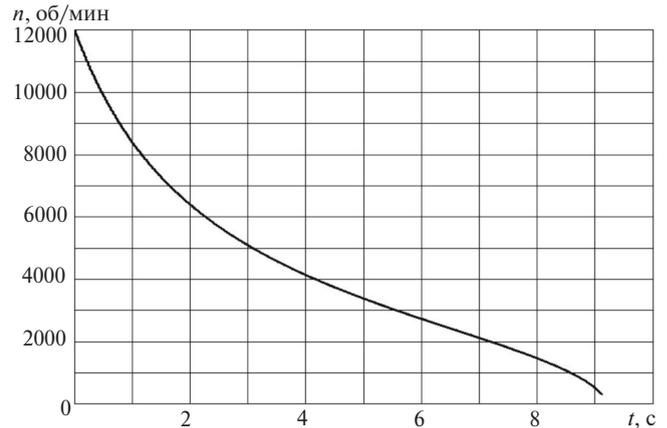


Рис. 5. Время выбега генератора с заполненной полостью ротора под действием двухфазного короткого замыкания



Рис. 6. Время выбега генератора с заполненной полостью ротора под действием трехфазного короткого замыкания

где J – момент инерции ротора генератора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; ω – угловая частота вращения ротора генератора, $\text{рад}/\text{с}$.

Если учесть, что масса статора генератора m составляет примерно 700 кг, а теплоемкость стали c принять равной 500 Дж/кг \cdot °С, то вся энергия, накопленная в роторе при коротком замыкании, увеличит подогрев воды в полости вращения ротора на 45°С, а генератор — на температуру

$$\Delta T = \frac{E}{cm} = 6^\circ\text{С}.$$

По результатам предварительного расчета выбега ротора генератора и подогрева статора под действием КЗ можно заключить, что КЗ внутри генератора не приведет к дополнительным аварийным последствиям вне ГУ.

Как указывалось ранее, время выбега генератора под действием КЗ при заливке полости вращения ротора водой составляет примерно 10 с; это время соответствует среднему значению времени гашения поля возбуждения в синхронных генераторах с электромагнитным возбуждением (7÷12 с) при возникновении внезапного КЗ внутри генератора.

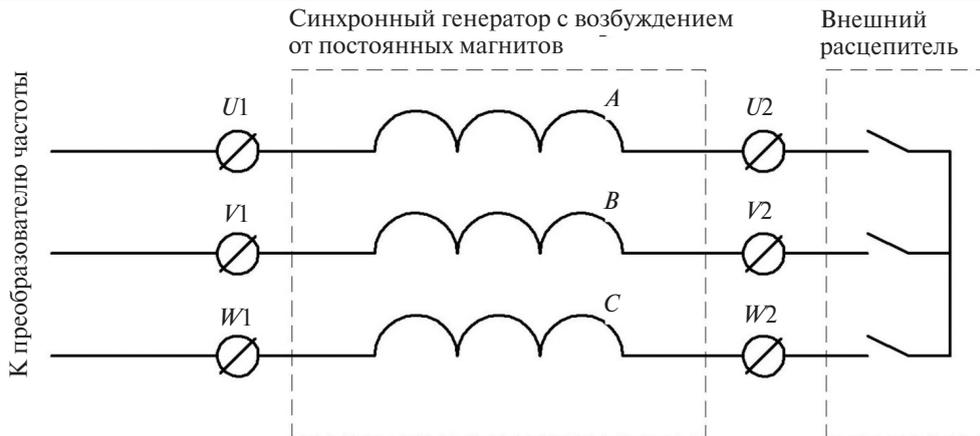


Рис. 7. Схема защиты от КЗ с расцепителем нулевой точки обмотки статора генератора

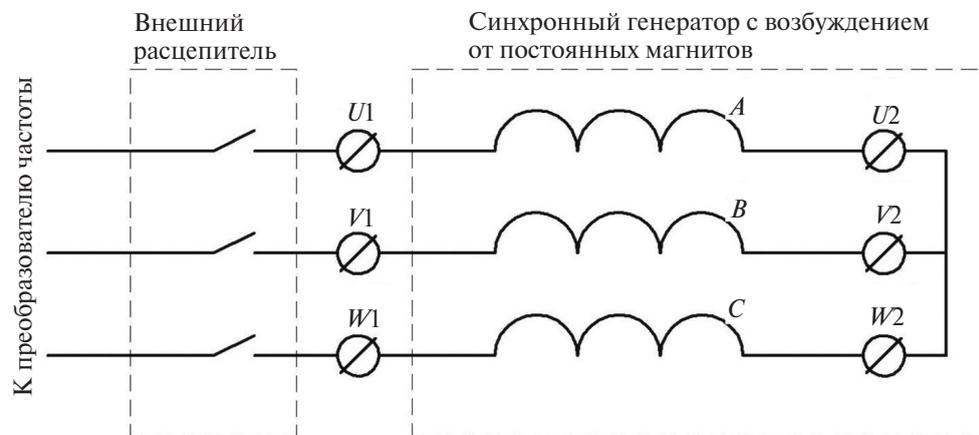


Рис. 8. Схема защиты от КЗ с расцепителем в коробке выводов

Указанный способ защиты ГУ от КЗ может быть применен и для ГУ большей мощности.

Замыкание сети от ГУ до преобразователя частоты приводит к возникновению токов КЗ, меньших по сравнению с их значениями при внутреннем КЗ генератора, однако опасность таких КЗ — в локальном нагреве кабелей в месте возникновения замыкания. Для защиты электросети от генератора до преобразователя частоты необходимо применять размыкатели выходных фаз генератора.

Основным способом предотвращения последствий КЗ синхронных генераторов с ПМ в основном является разрыв соединений фаз обмотки (разрыв общей точки при соединении в звезду) — см. рис. 7. Способ предусматривает выведение из машины всех выводов фаз обмотки (6 концов для трехфазной системы, 12 — для шестифазной, 24 — для двенадцатифазной и т.д.); вся схема обмотки собирается в коробке выводов.

Выводы обмотки со стороны соединения в общую точку подсоединяются через специальное устройство расщепления (предохранитель, автоматический выключатель и др.). Однако такая схема обеспечивает защиту генератора только от межфазного

либо корпусного КЗ и не защищает от виткового замыкания.

Как указывалось ранее, предложенный метод обеспечивает защиту генератора от внутреннего КЗ и замыкания на выводных клеммах. Поэтому с целью упрощения конструкции генератора (уменьшения числа выводных концов его обмотки) расцепители фаз достаточно ставить на выводных концах фаз обмотки генератора, что обеспечивает защиту электросети от генератора до преобразователя частоты (рис. 8).

Исследование показало, что при применении указанных выше мер возникновение КЗ внутри высокоскоростного синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов или в электросети от генератора до преобразователя частоты не приводит к дополнительным аварийным ситуациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов А.В., Карпов А.В., Смуров А.В., Чумаков В.В. Обеспечение пожаробезопасности на подводных лодках. — Морской сборник, 2013, т. 1992, № 3, с. 43–47.
2. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986, 360 с.
3. Калмыков А.Н., Михайлов В.М., Сеньков А.П. Способ снижения токов коротких замыканий в обмотке статора электродвигателей с постоянными магнитами на роторе. — Мате-

риалы Всероссийской научно-техн. конф. «Судовые единые электроэнергетические системы и гребные электрические установки», Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2013.

[31.10.2018]

А в т о р ы: **Макриденко Леонид Алексеевич** окончил Военную академию им. Ф.Э. Дзержинского в 1984 г. В 2007 г. защитил докторскую диссертацию. Генеральный директор АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Сарычев Алексей Петрович окончил МЭИ в 1985 г. В 2010 г. защитил докторскую диссертацию «Исследование и разработка ряда электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов». Первый заместитель генерального директора АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Elektrichestvo, 2019, No. 4, pp. 39–43

Коварский Михаил Ефимович окончил МЭИ в 1972 г. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию «Электродинамические процессы в сверхпроводниковых электрических машинах». Главный конструктор регулируемых электроприводов для ВМФ АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Панасюк Максим Борисович окончил МЭИ в 2012 г. Ведущий инженер НПЦ КЭ (4) АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Сидоров Антон Олегович окончил МЭИ в 2015 г. Инженер НПЦ КЭ (4) АО «Корпорация «ВНИИЭМ». Аспирант кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» Национального исследовательского университета «МЭИ».

DOI:10.24160/0013-5380-2019-4-39-43

Short-Circuit Protection of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Generators

Makridenko Leonid A. (Joint Stock Company (JSC) «Korporation «VNIIEМ», Moscow, Russia) – Director General

SARYCHEV Aleksey P. (JSC «Korporation «VNIIEМ», Moscow, Russia) – Ist Deputy Director-in-General

KOVARSKIY Mikhail Ye. (JSC «Korporatsiya «VNIIEМ», Moscow, Russia) – Chief Designer, Cand. Sci. (Eng.)

PANASYUK Maksim B. (JSC «Korporation «VNIIEМ», Moscow, Russia) – Leading engineer

SIDOROV Anton O. (JSC «Korporation «VNIIEМ», Moscow, Russia) – Engineer, Ph.D. of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

The article considers the specific features of electromagnetic and electromechanical processes triggered by abrupt short-circuit faults (SCs) in self-contained power-generating installations equipped with high-speed synchronous permanent magnet turbine generators. Possible short-circuit fault occurrence places are analyzed, including those inside the turbine generators or at its terminals, between the turbine generator and frequency converter, in the frequency converter, and after the converter in the ship power mains. It is pointed out that measures to slow down the turbine generator rotor must be taken to decrease the current if a short-circuit fault occurs inside the turbine generator or at its terminals. The rotor is slowed down by supplying water into the stator bore cavity. In this case, the short circuit clearing time is commensurable with that in conventional turbine generators, the short-circuit current in which is decreased by killing the field current. In other cases, the protection from short-circuit faults is ensured by switching apparatuses.

Key words: synchronous generator, excitation from permanent magnets, electromagnetic processes, short-circuit fault, fault occurrence schemes, protection measures

REFERENCES

1. Arkhipov A.V., Karpov A.V., Smurov A.V., Chumakov V.V. *Morskoy sbornik – in Russ. (Marine Bulletin)*, 2013, vol. 1992, No. 3, pp. 43 – 47.
2. Kopylov I.P. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Energoatomizdat, 1986, 360 p.
3. Kalmykov A.N., Mikhaylov V.M., Sen'kov A.P. *Sposob snizheniya tokov korotkikh замыkaniy v obmotke statora elektrodvigately s postoyannymi magnitami na rotore. Materialy*

Vserossiyskoy nauchno-tekh. konf. «Sudovye yedinye elektroenergeticheskiye sistemy i grebnye elektricheskiye ustanovki». (A method for decreasing short circuit fault currents in the stator winding of electric motors with permanent magnets on the rotor. In: Proceedings of the All-Russian Scientific-Technical Conference «United Ship Electric Power Systems and Electrical Propulsion Installations»). St. Petersburg State Marine Technical University, 2013.

[31.10.2018]