

DOI : 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103

THEORETICAL ISSUES OF CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN SHIPBOARD ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH ELECTRIC POWER DISTRIBUTION ON A DIRECT CURRENT

A. V. Grigoryev^{1, 2}, A. Yu. Vasilyev², Yu. A. Kulagin²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — JSC “RPC “Ship electric propulsion”, St. Petersburg, Russian Federation

In the article theoretical issues of short-circuit current flow in shipboard electric power systems with distribution on a direct current are considered. In these systems, electric power is generated by three-phase synchronous generators connected to semiconductor rectifiers, power distribution is carried out on a direct current, for supply of AC motor and shipboard consumers semiconductor inverters are used. Traditional methods for calculation of short-circuit currents in ship electric power systems with distribution on a direct current are not suitable. This is due to the fact that in these systems the generator operates with variable rotation speed, and the propulsion motor can energize the place of occurrence of a short circuit on the buses of the main DC switchboard through the back-up diodes of the autonomous inverters. The magnitude of the short-circuit current increases with a decrease of rotation speed of the synchronous generator. The magnitude of the charging current for the short-circuit place from the propulsion motor depends on the rotation speed and load. Significant effect on short-circuit currents is made by capacitors located at the input of semiconductor inverters of electric propulsion plant. When calculating the short-circuit currents, it is necessary to take into account the charging current from shipboard electric consumers through semiconductor inverters, at whose input capacitors are located too. In the article physical processes of short-circuit currents flow in shipboard electric power systems with distribution on direct current are considered. Recommendations on calculation of short circuit currents in these systems are formulated.

Keywords: short circuit, electric current, electric power systems, electric power distribution, semiconductor frequency converters, electric propulsion plants, rectifiers, inverters.

For citation:

Grigoryev, Andrey V., Aleksey Yu. Vasilyev, and Yurii A. Kulagin. “Theoretical issues of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with electric power distribution on a direct current.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.

УДК 621.315:621.3.025

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

А. В. Григорьев^{1, 2}, А. Ю. Васильев², Ю. А. Кулагин²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрены теоретические вопросы протекания токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе. В данных системах электроэнергию вырабатывают трехфазные синхронные генераторы, подключенные к полупроводниковым выпрямителям, распределение электроэнергии идет на постоянном токе, для питания гребного электродвигателя переменного тока и общесудовых приемников электроэнергии используются полупроводниковые инверторы. Традиционные методы для расчета токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением на постоянном токе не подходят. Это связано

с тем, что в данных системах генератор работает с переменной частотой вращения, а гребной электродвигатель может подпитывать током место возникновения короткого замыкания на шинах главного распределительного щита постоянного тока через обратные диоды автономных инверторов. Величина тока короткого замыкания увеличивается при снижении частоты вращения синхронного генератора. Величина тока подпитки места возникновения короткого замыкания от гребного электродвигателя зависит от частоты вращения и нагрузки. Значительное влияние на токи короткого замыкания оказывают конденсаторы, расположенные на входе полупроводниковых инверторов гребной электрической установки. При расчете токов короткого замыкания необходимо учитывать ток подпитки от общесудовых приемников электроэнергии переменного тока через полупроводниковые инверторы, на входе которых также расположены конденсаторы. В статье рассмотрены физические процессы протекания токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе. Сформулированы рекомендации по расчету токов короткого замыкания в данных системах.

Ключевые слова: короткое замыкание, электрический ток, электроэнергетические системы, распределение электроэнергии, полупроводниковые преобразователи частоты, гребные электрические установки, выпрямители, инверторы.

Для цитирования:

Григорьев А. В. Теоретические вопросы расчета токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, Ю. А. Кулагин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации вводятся в эксплуатацию суда с единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС) и распределением электроэнергии на постоянном токе, получившие название за рубежом Onboard DC Grid. В сентябре 2017 г. на площадке ООО «Краншип» (г. Темрюк, Краснодарский край) состоялась церемония спуска на воду ледокольного буксира «Юрибей» проекта «Т40105» ФГУП «Атомфлот», строящегося в рамках проекта «Портофлот». Судовая электростанция состоит из четырех главных дизель-генераторов мощностью 1,94 МВт каждый, работающих через тиристорные выпрямители на главный распределительный щит (ГРЩ) постоянного тока. Два аzipода мощностью 3,5 МВт каждый получают питание от автономных инверторов.

В 2018 г. на Выборгском судостроительном заводе планируют завершить постройку портового ледокола Aker ARC124 ФГУП «Атомфлот», судовая электростанция которого состоит из трех главных дизель-генераторов мощностью 5,26 МВт каждый, работающих через тиристорные выпрямители на ГРЩ постоянного тока. Четыре гребных двигателя мощностью 3 МВт каждый получают питание от автономных инверторов. В качестве генераторов в ЕЭЭС данного типа применяются трехфазные синхронные генераторы. Основным судовым приемником является система электродвижения с гребными электродвигателями переменного тока.

Расчет токов короткого замыкания (КЗ) с целью выбора защитно-коммутационной аппаратуры и проверки динамической устойчивости сборных шин ГРЩ производится на стадии технического проектирования с использованием нормативных документов.

Методы и материалы

Применение традиционных подходов для расчета токов КЗ в ЕЭЭС с распределением на постоянном токе применять нельзя, что связано с рядом причин, в частности с применением современных обратимых полупроводниковых преобразователей — выпрямителей и инверторов [1] – [3]. В составе традиционной автономной СЭЭС входят два или более генераторных агрегатов (ГА), как правило, дизель-генераторы, ГРЩ и понижающие трансформаторы. Расчет токов КЗ производится по известным методикам при одиночной и параллельной работе ГА. При расчете токов КЗ учитывается ток подпитки от судовых приемников электроэнергии в виде эквивалентного асинхронного электродвигателя. Следует отметить, что появление единых электроэнергетических

систем (ЕЭЭС) не изменило подход к расчету токов КЗ. Традиционная ЕЭЭС на базе системы электродвижения (СЭД) приведена на рис. 1 [4] – [6].

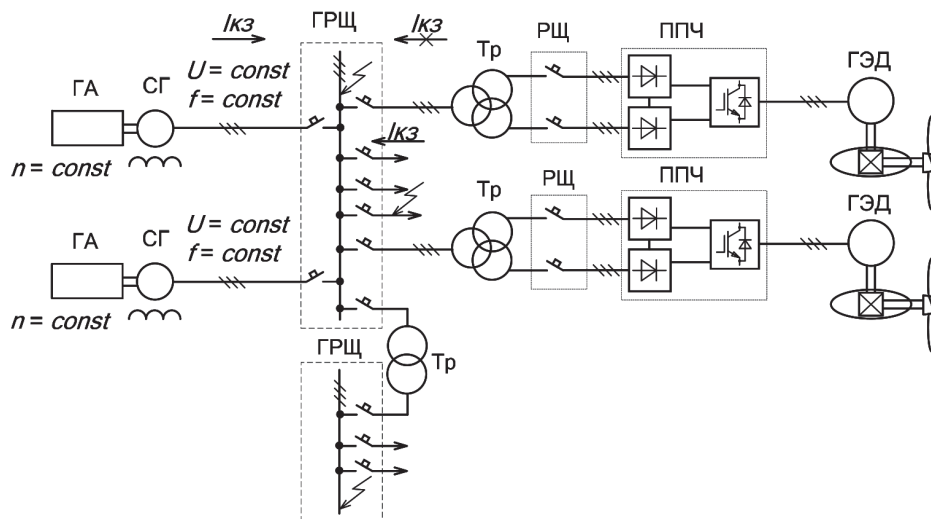


Рис. 1. Единая судовая электроэнергетическая система с СЭД

В состав ЕЭЭС с СЭД входит судовая электростанция с главными ГА и ГРЩ. СЭД состоит из двух или более гребных электроприводов. В состав современных гребных электроустановок (ГЭУ) входят согласующие трансформаторы, как правило, трехобмоточные, полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ) со звеном постоянного тока, гребные трехфазные электродвигатели переменного тока синхронного или асинхронного типа. Впервые данное схмотехническое решение ЕЭЭС с СЭД на судах, построенных в Российской Федерации, было применено на малом гидрографическом судне проекта 19910 «Вайгач». В дальнейшем по такой же схеме ЕЭЭС с СЭД были построены дизель-электрические ледоколы проекта 21900, 21900 М.

В настоящее время ведется строительство атомных ледоколов проекта 22220 и дизель-электрического электрохода проекта 22600. В связи с тем, что на данных судах применяются необратимые ППЧ со звеном постоянного тока, построенные на базе неуправляемых выпрямителей и автономных инверторов, ток КЗ от гребных электродвигателей (ГЭД) к точке КЗ на ГРЩ не протекает. Расчет токов КЗ в данных ЕЭЭС производится так же, как и для автономных СЭЭС. Электрическая схема необратимого ППЧ приведена на рис. 2.

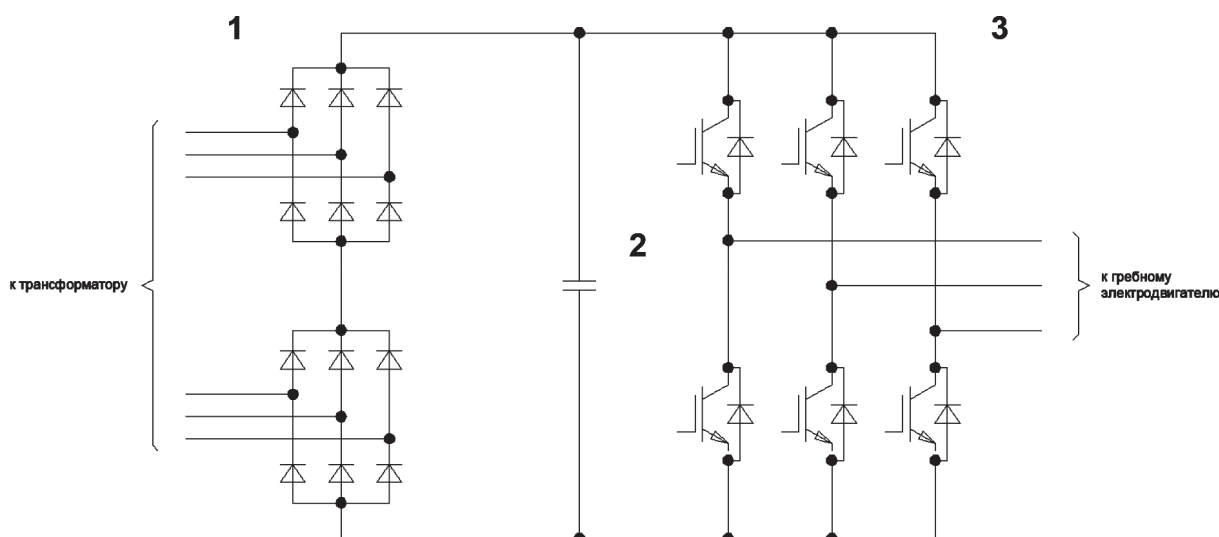


Рис. 2. Структурная схема необратимого ППЧ со звеном постоянного тока
1 — неуправляемый выпрямитель; 2 — конденсатор; 3 — автономный инвертор

Результаты и обсуждение

Построение ЕЭЭС с СЭД с распределением электроэнергии на постоянном токе имеют ряд особенностей, оказывающих принципиальное влияние на подходы к расчету токов КЗ. В данных ЕЭЭС трехфазные ГА переменного тока вырабатывают электроэнергию, которая через выпрямители поступает на шины ГРЩ. От ГРЩ электроэнергия постоянного тока посредством автономных инверторов напряжения преобразуется обратно в переменный ток, питающий гребной электропривод и общесудовые приемники электроэнергии. Структурная схема ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе приведена на рис. 3.

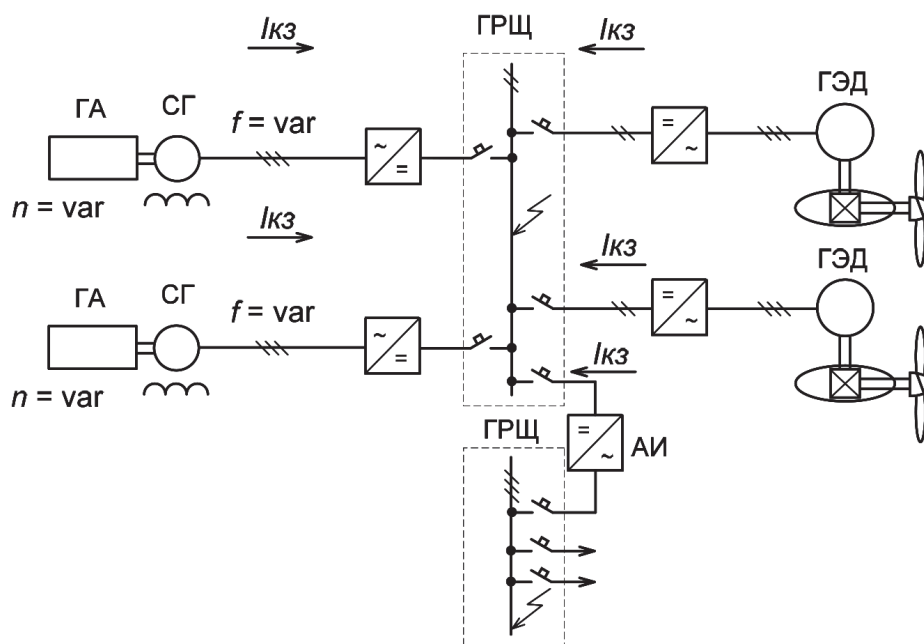


Рис. 3. Структурная схема ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе

Использование вентильных ГА, в состав которых входят приводной двигатель, генератор переменного тока и полупроводниковый выпрямитель, позволяет добиться существенной экономии топлива. Это достигается за счет снижения эксплуатационной частоты вращения ГА при работе на долевой нагрузке или нагрузке, близкой к холостому ходу. В традиционных СЭЭС ГА работают с номинальной частотой вращения, при которой происходит расчет токов КЗ. При снижении частоты вращения, а следовательно, и частоты электрического тока уменьшаются индуктивные сопротивления трехфазного генератора и возрастают токи КЗ. Следовательно, при работе ГА с переменной частотой вращения расчет токов КЗ необходимо выполнять при минимальной эксплуатационной частоте вращения приводного двигателя.

Величины внутренних сопротивлений полупроводникового выпрямителя значительно меньше величин сопротивлений генератора. В связи с этим при возникновении КЗ выпрямитель оказывает минимальное токоограничивающее действие, и значениями сопротивлений полупроводниковых вентилей (диоды, тиристоры, транзисторы) можно пренебречь, рассчитывая ток КЗ. Однако следует иметь в виду, что тиристоры и транзисторы не допускают превышения значений предельно-допустимых номинальных токов и не могут коммутироваться в процессе КЗ, а значение интеграла Pt по заданному интервалу времени (интеграл Джоуля) представлено в справочных данных только для силовых диодов. Поэтому оборудование, подключаемое к шинам распределительных устройств постоянного тока, содержащее указанные полупроводниковые элементы, должно быть рассчитано на режимы КЗ. От ГРЩ постоянного тока получают питание автономные инверторы, которые являются обратимыми и проводят электрический ток в обоих направлени-

ях. Данное обстоятельство является принципиально важным, поскольку оказывает существенное влияние на величину тока КЗ на шинах ГРЩ. К токам КЗ, протекающим от генератора, добавляется периодическая составляющая тока КЗ, протекающего от ГЭД, через инвертор. При этом в данных ГЭУ отсутствуют согласующие трансформаторы, оказывающие токоограничивающее действие на токи КЗ в традиционных ЕЭЭС.

Необходимо отметить, что мощность ГЭД в ЕЭЭС соизмерима, а зачастую и превышает мощность главных генераторов. При этом в каждой СЭД применяется, в соответствии с Правилами Российского морского регистра судоходства, не менее двух ГЭУ. ГЭД эксплуатируется с переменной частотой вращения. Момент возникновения аварийного режима КЗ может произойти при любой частоте вращения гребного винта. Если на выходе вентильных генераторов напряжение имеет постоянное значение, то на выходе автономного инвертора напряжение, а, следовательно, и противоЭДС ГЭД могут отличаться от номинальной величины.

Силовая схема распределения электроэнергии в ЕЭЭС данного типа приведена на рис. 4. Протекание процессов КЗ на шинах щита постоянного тока в частотно-управляемом электроприводе с транзисторным инвертором приведено на рис. 5 – 7 [7] – [9].

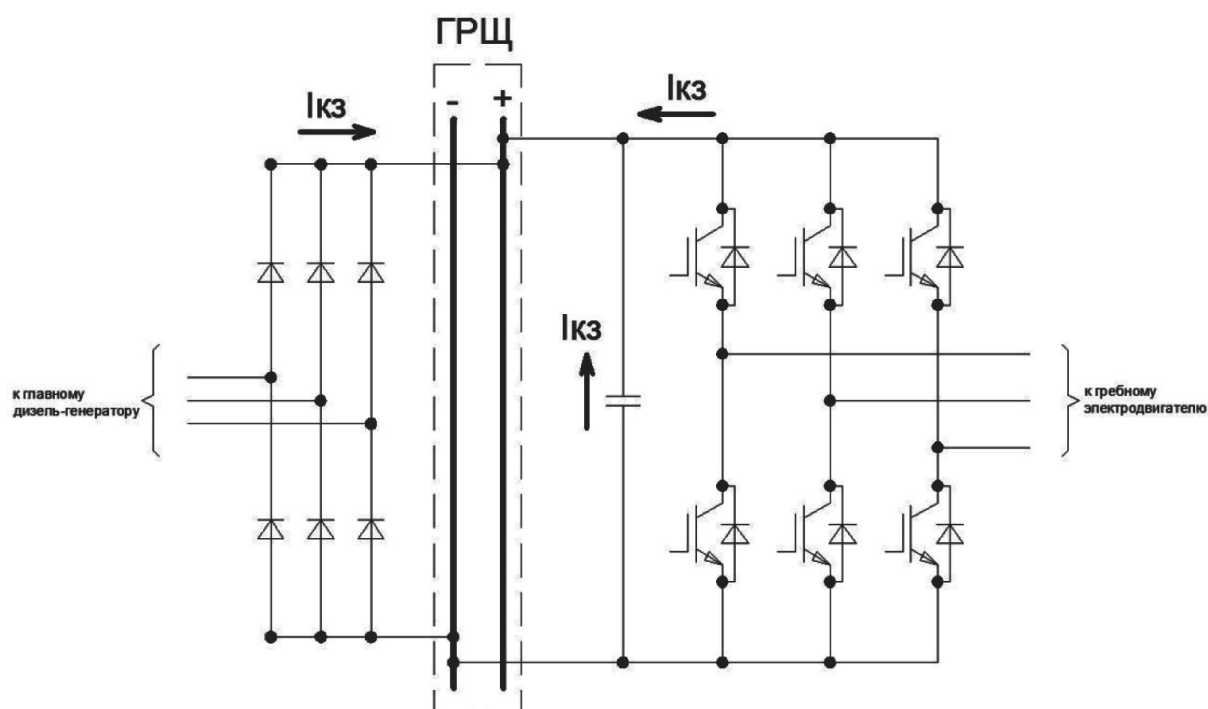
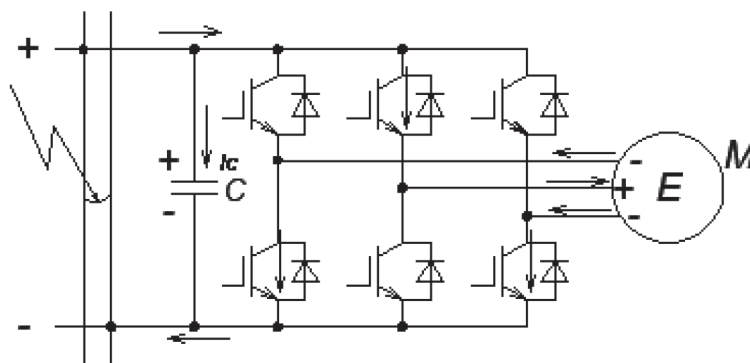


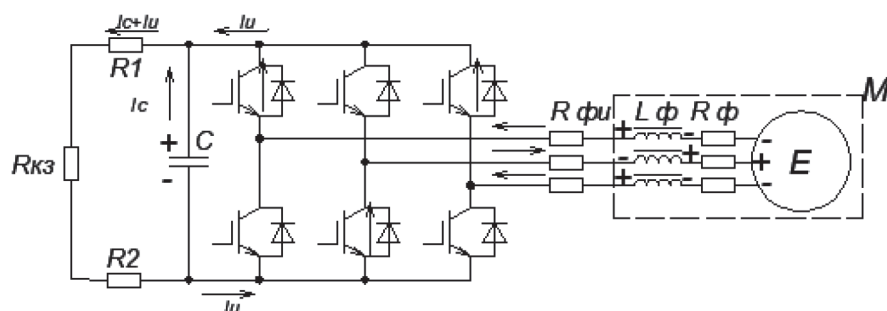
Рис. 4. Схема подпитки точки КЗ на шинах ГРЩ постоянного тока от инверторов

На рис. 5, а на схеме представлена нормальная работа электропривода в момент времени, предшествующий режиму КЗ, когда ГЭД потребляет электроэнергию переменного тока от инвертора. Три транзистора инвертора, коммутируемые с несущей частотой около 4 – 5 кГц, за период частоты модуляции (например, 50 Гц) меняют шесть проводящих конфигураций. Также на рис. 5, а условно показана полярность мгновенных значений ЭДС двигателя и стрелками обозначены направления токов проводящих транзисторов случайной конфигурации. Стрелками показан ток инвертора с ответвлением тока I_c заряда батареи конденсаторов с ёмкостью C , и обозначено место последующего КЗ. Следует отметить, что конденсатор или конденсаторная батарея является обязательной принадлежностью инвертора, подключается непосредственно между полюсами к выводам транзисторов для минимизации паразитной индуктивности и служит для устранения индуктивной реакции внешних цепей при коммутации транзисторов [10], [11].

а)



б)



в)

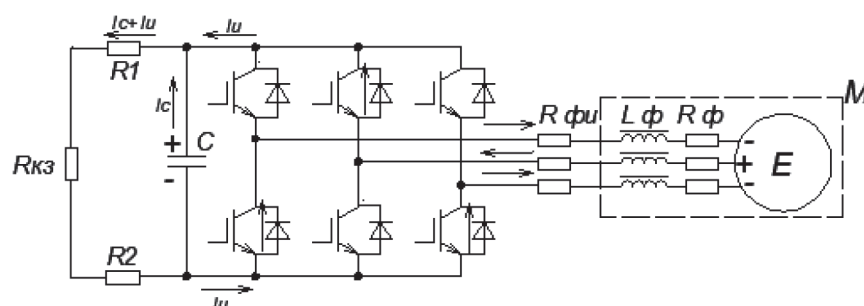


Рис. 5. Схемы гребного электропривода: а — в момент времени, предшествующий режиму КЗ; б — в момент наступления КЗ на шинах распределительного щита; в — в режиме подпитки точки КЗ от ЭДС главного электродвигателя

В момент наступления КЗ (см. рис. 5, б) полярность собственной противоЭДС ГЭД (M) не изменилась за счёт ЭДС самоиндукции индуктивности L_ϕ обмоток, поддерживающей величину и направление тока за счёт накопленной электрической энергии, величина которой зависит от индуктивности и протекавшего по ней тока на момент КЗ:

$$W = LI^2/2.$$

С учётом того, что индуктивности в фазных обмотках электрической машины (M) равны между собой, по закону Кирхгофа, втекающий ток равен сумме вытекающих токов:

$$I_2 = I_1 + I_3 = kI_2 + (1-k)I_2;$$

$$W_\Sigma = W_1 + W_2 + W_3 = 1/2 L_\phi [(kI_2)^2 + (I_2)^2 + \{(1-k)I_2\}^2],$$

где 1, 2, 3 — условные номера фазных обмоток.

Работа транзисторов заблокирована устройством защиты, но токи фаз протекают через обратные диоды. Конденсаторная батарея разряжается током I_c или I_c в точку КЗ по цепи $R, R_{кз}$,

R_2 и суммируется с током инвертора I_{in} . После разряда индуктивности L_{ϕ} обмоток (см. рис. 5, в) точку КЗ подпитывают ток I_c и токи, вызванные ЭДС машины M . Подпитка токами КЗ от общесудовых приемников электроэнергии также происходит через полупроводниковые инверторы, на входе которых установлены конденсаторы.

Выводы

1. Расчет токов КЗ в ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе не может быть проведен с использованием стандартных методов и методик.

2. Расчет токов КЗ в ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе должен производиться при минимальной и максимальной частоте вращения вентильного ГА. Внутренним сопротивлением полупроводниковых вентилей выпрямителей в связи с их малыми значениями можно пренебречь. Максимальные токи КЗ ожидаются при минимальной частоте вращения вентильного ГА.

3. При расчетах тока КЗ в сети постоянного тока необходимо учитывать ток подпитки места КЗ от ГЭД через полупроводниковые инверторы. Расчет токов КЗ необходимо производить при разных режимах эксплуатации ГЭУ.

4. При расчетах токов КЗ необходимо учитывать токи разряда конденсаторов, расположенных на входе полупроводниковых инверторов напряжения, питающих как ГЭД, так и общесудовые приемники электроэнергии. Конденсаторные батареи могут также располагаться на выходе выпрямителей ГА или быть подключенными к сборным шинам ГРЩ.

5. Оборудование, питаемое от шин распределительных устройств постоянного тока, содержащее полупроводниковые элементы в контуре токов КЗ, должно быть испытано изготовителем в наиболее тяжелых режимах работы при КЗ в источнике электроэнергии постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. XI. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2017.
2. ОСТ 5Р.6181-81. Судовые электроэнергетические системы. Методы расчета переходных процессов. — 1981. — 596 с.
3. ОСТ 6126-77. Судовые электроэнергетические системы постоянного тока. Метод расчета токов короткого замыкания. — 1977.
4. Григорьев А. В. Перспективы внедрения вентильных газотурбогенераторов на морском флоте / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова — 2016. — № 1 (35). — С. 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169.
5. Григорьев А. В. Опыт эксплуатации электроэнергетической установки гидрографического судна «Вайгач» / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер, А. И. Лившиц, Д. И. Улитовский // Судостроение. — 2010. — № 6. — С. 29–30.
6. Григорьев А. В. Единая электроэнергетическая установка малого гидрографического судна «Вайгач»: опыт проектирования и результаты испытаний / А. В. Григорьев // Российский морской регистр судоходства. — 2008. — № 31. — С. 271–278.
7. Гольдштейн М. Е. Функции передачи постоянного тока на базе преобразователей напряжения в режиме установившегося короткого замыкания в энергосистеме / М. Е. Гольдштейн, Н. В. Корбуков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2015. — Т. 15. — № 3. — С. 20–24. DOI: 10.14529/power150303.
8. Приходько В. М. Особенности расчетов токов короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах / В. М. Приходько, И. В. Приходько, В. Ю. Лучкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 185–195. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-185-195.

9. Жуков В. В. Влияние обратимых двигатель-генераторов и статических преобразователей на ток КЗ в системе постоянного тока электростанций / В. В. Жуков, В. Ф. Казайкин, М. А. Шиша [и др.] // Электрические станции. — 1990. — № 10. — С. 44–48.

10. Кузнецов Ю. П. Математическое моделирование и расчеты дуговых процессов при коротких замыканиях в сетях постоянного тока / Ю. П. Кузнецов, Эль-Зейн Адам // Тезисы докладов Всесоюзной науч. конф. «Токи короткого замыкания в энергосистемах». — М., 1995. — С. 64–67.

11. Азовцев А. А. Короткие замыкания в мощных электроустановках постоянного тока / А. А. Азовцев, Ю. В. Рокотян // Судовая электромеханика и связь. — 1968. — № 40. — С. 3–15.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. Ch. XI. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2017.
2. OST 5R.6181-81. Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy. Metod rascheta perekhodnykh protsessov. 1981.
3. OST 6126-77. Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy postoyannogo toka. Metod rascheta tokov korotkogo zamykaniya. 1977.
4. Grigoryev, Andrey Vladimirovich, Ruslan Rinatovich Zaynullin, and Sergey Mihaylovich Malyshev. “Opportunities of introduction of ship valve gas turbogenerators in marine fleet.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169.
5. Grigoryev, A. V., E. A. Glekler, A. I. Livshyts, and D. I. Ulitovsky. “Surveying ship «Vaygach» powerplant operational experience.” *Sudostroyeniye* 6 (2010): 29–30.
6. Grigor'yev, A. V. “Yedinaya elektroenergeticheskaya ustanovka malogo gidrograficheskogo sudna «Vaygach»: opyt proyektirovaniya i rezul'tatov ispytaniy.” *Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva* 31 (2008): 271–278.
7. Goldstein, M. E., and N. V. Korbukov. “VSC-HVDC transmission functions under short-circuit conditions in ac power system.” *Bulletin of South Ural State University. Series “Power Engineering”* 15.3 (2015): 20–24.
8. Prikhodko, Valentin Makarovich, Irina Valentinovna Prikhodko, and Vasily Yuryevich Lucchino. “Features of payments current short circuit in view of resistance arc in the ship electric power system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(39) (2016): 185–195. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-185-195.
9. Zhukov, V. V., V. F. Kazaikin, M. A. Shisha, et al. “Vliyanie obratimyykh dvigatel'-generatorov i staticheskikh preobrazovatelei na tok KZ v sisteme postoyannogo toka elektrostantsii.” *Elektricheskie stantsii* 10 (1990): 44–48.
10. Kuznetsov, Yu. P., and El'-Zein Adam. “Matematicheskoe modelirovanie i raschety dugovykh protsessov pri korotkikh zamykaniyakh v setyakh postoyannogo toka.” *Tezisy dokladov Vsesoyuznoi nauchnoi konferentsii «Toki korotkogo zamykaniya v energosistemakh»*. M., 1995: 64–67.
11. Azovtsev, A. A., and Yu. V. Rokotyan. “Korotkie zamykaniya v moshchnykh elektroustanovkakh postoyannogo toka.” *Sudovaya elektromekhanika i svyaz'* 40 (1968): 3–15.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, доцент, генеральный директор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryev, Andrey V. —
PhD, associate professor, CEO
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
JSC “RPC “Ship electric propulsion”
12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178, St.
Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

Васильев Алексей Юрьевич —

начальник отдела

АО «НПЦ «Электродвижение судов»

197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178

e-mail: alex_was@mail.ru

Кулагин Юрий Александрович —

начальник отдела

АО «НПЦ «Электродвижение судов»

197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178

e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru

Vasilyev, Aleksej Yu. —

Head of Department

JSC “RPC “Ship electric propulsion”

12 Fermskoe shosse Str., let. E,

office 178, St. Petersburg, 197341,

Russian Federation

e-mail: alex_was@mail.ru

Kulagin, Yurii A. —

Head of Department

JSC “RPC “Ship electric propulsion”

12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178,

St. Petersburg, 197341, Russian Federation

e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2017 г.

Received: September 15, 2017.