

DOI: 10.47026/1810-1909-2024-2-130-140

УДК 621.316.658.58

ББК 39.462

А.В. САУШЕВ, А.М. СМОЛЕНКОВ, Н.В. ШИРОКОВ

ПРЕВЕНТИВНАЯ ЗАЩИТА СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОТ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ В ДВИГАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, нагрузка, генераторный агрегат, предупредительное управление, обратная мощность, первичный двигатель, защита.

В статье представлены результаты исследования функционирования судовой электроэнергетической системы в нештатной ситуации, вызванной переходом одного из генераторных агрегатов в двигательный режим. Показано, что существующие средства защиты от обратной мощности оказываются неэффективными в случаях неконтролируемого увеличения подачи топлива в первичный двигатель одного из работающих генераторных агрегатов и не могут предотвратить перерыв в электропитании потребителей первой категории. В этой связи сформулирована задача по разработке методов и средств для обеспечения безаварийного перехода в состояние правильного функционирования судовой электроэнергетической системы, предотвращающих работу исправных генераторов в двигательном режиме.

Целью исследования является разработка способа формирования управляющего воздействия на судовую электроэнергетическую систему, в составе которой работают три и более генераторных агрегата, для обеспечения ее безаварийного функционирования в состоянии неконтролируемого увеличения подачи топлива в дизель одного из агрегатов.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели исследования применялись функционально-логический подход и метод предупредительного управления судовой электроэнергетической системой.

Результаты исследований. Предложен новый диагностический признак неработоспособного состояния судовой электроэнергетической системы, согласно которому система признается неработоспособной в момент, когда нагрузка только одного из работающих агрегатов растет, а разность нагрузок генераторов превысила допустимое значение и продолжает увеличиваться. Разработан оригинальный способ превентивной защиты судовой электроэнергетической системы, обеспечивающий безаварийный переход в состояние правильного функционирования в случае неконтролируемого увеличения подачи топлива в дизель одного из агрегатов. Согласно предложенному подходу идентифицируют неработоспособное состояние системы, в составе которой более двух генераторных агрегатов осуществляют превентивную разгрузку сети, определяют агрегат, нагрузка которого увеличивается, и подают команду на размыкание его автоматического выключателя. Представлена функциональная схема устройства, реализующего разработанный способ превентивной защиты.

Выводы. Предложенный подход позволяет своевременно идентифицировать и отключить неработоспособный генераторный агрегат в случае несанкционированного увеличения подачи топлива в дизель. При этом не допускаются переход в двигательный режим и отключение работоспособных агрегатов, исключается перерыв в электропитании потребителей электроэнергии первой категории.

Введение. Автономные электроэнергетические системы (АЭЭС) выполняют ответственные функции по электроснабжению предприятий и населенных пунктов в удаленных и труднодоступных районах, на транспорте [3, 10]. В последние

годы все более широкое распространение получила технология Smart Grid (интеллектуальных сетей), в рамках которой осуществляют размещение генераторных агрегатов (ГА) и распределительных устройств низкого напряжения в непосредственной близости от потребителей [6, 12]. Данные установки распределенной мощности могут работать в параллель с электроэнергетической системой более высокого уровня или в островном режиме, при котором возможно создание энергетических кластеров распределенной генерации с параллельной работой ГА [2, 17]. Работа электроэнергетического комплекса в островном режиме полностью соответствует функционированию АЭЭС, что позволяет рассматривать его как автономную систему и дополнительно инициирует проведение всесторонних исследований в данной области электроэнергетики. Особый интерес представляют разработки, направленные на обеспечение безаварийной работы АЭЭС в нештатных ситуациях, вызванных отказом ее элементов, в том числе переходом одного из ГА в двигательный режим вследствие неисправности системы управления (СУ) или его первичного двигателя [4, 16, 18].

Данное направление исследований особенно актуально для судовых электроэнергетических систем (СЭЭС), которые, являясь АЭЭС, имеют ряд особенностей. К основным из них относятся малые постоянные инерции ГА и существенные колебания нагрузки, которые наиболее характерны для маневренного режима работы судна. В данном режиме работает подруливающее устройство, создающее нагрузку, величина которой изменяется в широком диапазоне и соизмерима с мощностью генератора. При этом переход ГА в двигательный режим часто вызывает перерыв в электроснабжении ответственных устройств судна первой и второй категории. На практике это приводит к аварийной ситуации, вызванной перерывом в питании рулевого электропривода, электроприводов подачи смазочного масла и топлива главных двигателей, потерей управляемости и хода судна. Существующие системы защиты, как правило, оказываются неэффективными, и при работе судна в штормовых условиях, узкостях или местах с интенсивным движением это может привести к трагическим последствиям. В этой связи наиболее перспективным направлением в исследованиях следует считать развитие методов превентивной защиты на основе предупредительного управления СЭЭС, основные положения которого представлены в работах [7, 19]. При этом в случае неисправности первичного двигателя ГА или СУ, способной вызвать работу генератора в двигательном режиме, необходимо решить задачу безаварийного перехода СЭЭС в состояние правильного функционирования.

Целью исследования является разработка способа превентивной защиты ответственных потребителей первой категории от перерыва в электроснабжении для СЭЭС с параллельной работой трех и более ГА, функционирующих в режиме неконтролируемого увеличения подачи топлива в дизель одного из агрегатов.

Материалы и методы. В статье рассматривается работа электроэнергетической системы судна в режиме неконтролируемого увеличения подачи топлива в один из ГА. Для достижения поставленной цели исследования применялись функционально-логический подход и метод предупредительного управления СЭЭС.

Результаты исследования. При переходе ГА в двигательный режим его нагрузка переводится на остальные машины, работающие параллельно, и судовая сеть дополнительно нагружается на величину собственных потерь вышедшего из строя агрегата. В данном случае, во-первых, возникает возможность перегрузки работоспособных ГА, поскольку при работе в составе СЭЭС только двух генераторов нагрузка на исправный генератор увеличивается вдвое, а во-вторых, задержка в отключении и остановке неработоспособного агрегата часто приводит к дальнейшему развитию неисправности. Последнее обстоятельство обуславливает необходимость применения на судах противоаварийного управления СЭЭС, называемого защитой от обратной мощности. При этом формируется команда на размыкание автоматического выключателя генератора, создающую нагрузку, превышающую допустимое значение в течение заданного времени.

Правила классификации и постройки морских судов [9] предписывают СУ СЭЭС обеспечивать отключение ГА переменного тока при наличии обратной мощности в диапазоне 8–15% от номинальной мощности генератора для агрегатов, использующих в качестве приводного двигателя дизель, и 6%, если первичный двигатель – это турбина. При этом время срабатывания защиты не должно превышать 10 с [8]. Данный подход позволяет исключить ошибку первого рода и не отключать работоспособный агрегат, но в случае выхода ГА из строя процесс идентификации его технического состояния и отключения от сети затягивается, что существенно снижает эффективность защиты и может содействовать дальнейшему развитию неисправности [11, 15]. В то же время применяемая на практике защита от обратной мощности никак не способствует своевременной разгрузке сети, что часто приводит к перерыву в электроснабжении и аварийной ситуации на судне. Это объясняется тем, что защита от перегрузки имеет выдержку времени при срабатывании, величина которой обуславливается переходными процессами, происходящими при пуске мощных электродвигателей. При этом динамика перехода ГА в двигательный режим такова, что применение различных режимов частотной разгрузки в береговых сетях, обладающих существенно большей инерционностью и использующих отключение отдельных групп потребителей [1, 20] или переключение управляемых приемников на режим минимального потребления электроэнергии, как показано в работе [6], практически невозможно.

Предложенный рядом авторов вариант превентивного отключения нагрузки в функции изменения частоты сети [13, 14] также малоэффективен для применения в СЭЭС, так как в штатном режиме эксплуатации допускаются провалы по частоте до 5% от номинальной величины, которые компенсируются регуляторами дизелей в течение 5 с. В этой связи предупредительная сигнализация и команда на превентивную разгрузку подаются только по истечении этого времени, но частота перегруженного агрегата при переходе другой машины в двигательный режим, как правило, уже снижается более чем на 10%, что ведет к отключению работоспособного ГА и перерыву в электроснабжении судна.

Существующие средства защиты от обратной мощности можно признать достаточно эффективными только в случае, если ГА в момент возникновения

дефекта работают с малой нагрузкой и отключение неработоспособного агрегата не приведет к перегрузке остальных машин. По этой причине при прохождении судна в узкостях, при шторме и в районах с интенсивным движением СЭЭС, как правило, функционируют в режиме «с обеспечением резерва мощности», при котором в параллель работает хотя бы на один агрегат. больше, чем требуется по условиям нагрузки. Это крайне неэффективный режим работы СЭЭС, так как низкая загрузка дизелей ведет к резкому увеличению расхода топлива и смазочного масла, дополнительному расходованию ресурса первичных двигателей и более частому ремонту аппаратуры вследствие неполного сгорания топлива. При этом применение классического метода повышения надежности посредством функционального резервирования для случая параллельной работы ГА в ряде ситуаций может привести к катастрофическому снижению живучести системы.

В качестве примера рассмотрим инцидент, произошедший с финским грузо-пассажирским паромом «Mariella» в порту Стокгольма в ноябре 2016 г. «Mariella» – это достаточно крупное морское судно водоизмещением 37 860 регистровых тонн, оснащенное четырьмя главными двигателями общей мощностью 23 000 кВт и тремя вспомогательными ГА мощностью по 1800 кВт каждый, одновременно может перевезти 2500 пассажиров и 430 автомобилей. С целью обеспечения надежного электроснабжения на время перехода судна с территории порта были запущены все три ГА. Через несколько минут работы третий агрегат начал стремительно принимать нагрузку, разгружая остальные ГА и переводя их в двигательный режим. После отключения защиты первой и второй машины дизель третьего генератора увеличил частоту вращения и был остановлен защитой от угрозы разноса. Причиной возникшей аварийной ситуации стал отказ выходного реле блока автоматики электростанции, сформировавшего постоянный сигнал на увеличение подачи топлива в дизель третьего агрегата. При этом штатные устройства защиты от обратной мощности отключили работоспособные ГА, их работа только усугубила ситуацию. В данном случае перерыв в электроснабжении и вызванная им потеря управляемости судна не привели к серьезным проблемам, но при этом на практике продемонстрировали неспособность современных СУ адекватно реагировать на дефекты, вызывающие неконтролируемое увеличение подачи топлива в первичный двигатель.

В этой связи для повышения живучести СЭЭС в работах [5, 19] предложено воспользоваться методом превентивной защиты в рамках ее предупредительного управления. При этом возникает необходимость в идентификации неработоспособного состояния системы до момента перегрузки хотя бы одного из работающих агрегатов. Известные способы решения этой задачи, предложенные в работе [19], разрабатывались для случаев неконтролируемого снижения нагрузки хотя бы одним из работающих ГА, например, вследствие прекращения подачи топлива, поэтому они не носят универсального характера. Необходим комплексный подход к решению поставленной задачи на основе диагностических параметров, учитывающих все возможные ситуации.

Функциональный анализ происшествия, связанного с исчезновением напряжения в сети грузопассажирского парома «Mariella», показывает, что, с одной стороны, в результате аналогичных отказов СУ нагрузка только одного из ГА начнет увеличиваться и это событие можно рассматривать как диагностический параметр неработоспособного состояния СЭЭС. С другой стороны, регуляторы даже однотипных дизелей обладают различной инерционностью. В этой связи следует исключить появление ошибки первого рода, например, в случае резкого уменьшения нагрузки сети после ее увеличения. Обычно для этих целей применяют цепи задержки, однако в рассматриваемом случае более правильно, как показано в работе [19], использовать такой параметр, как превышение разности нагрузок ГА допустимой величины. Данное обстоятельство объясняется тем, что при работе СЭЭС в зоне высоких нагрузок (80-90% от номинальной мощности ГА) резкое увеличение подачи топлива в одну из машин может привести к ее перегрузке и отключению в течение установленной выдержки времени, что приведет к возникновению аварийной ситуации на судне [8]. Поэтому предложенный диагностический параметр является более информативным, не зависящим от величины загрузки электростанции и скорости принятия нагрузки ГА.

Следует также иметь в виду особенности функционирования работоспособной СЭЭС при ее переходе с ручного режима работы на автоматический режим или при включении на параллельную работу дополнительного агрегата. В данном случае возможна ситуация, при которой увеличивается нагрузка только одного из генераторов, а разница нагрузок превышает допустимую величину, но постоянно монотонно снижается [19]. Если происходит неконтролируемое увеличение нагрузки одного из ГА, то величина разности нагрузок обязательно будет расти, как и в случае неконтролируемого уменьшения нагрузки одной из машин [8]. Это условие следует считать дополнительным диагностическим параметром неработоспособного состояния системы.

Таким образом, диагностический признак неработоспособного состояния СЭЭС (F_0) можно записать следующим образом:

$$F_0 = L_1 \wedge L_2 \wedge L_3, \quad (1)$$

где L_1 – событие, заключающееся в том, что увеличивается нагрузка только одного ГА; L_2 – разность нагрузок ГА превысила допустимое значение; L_3 – событие, характеризующее тем, что разность нагрузок увеличивается.

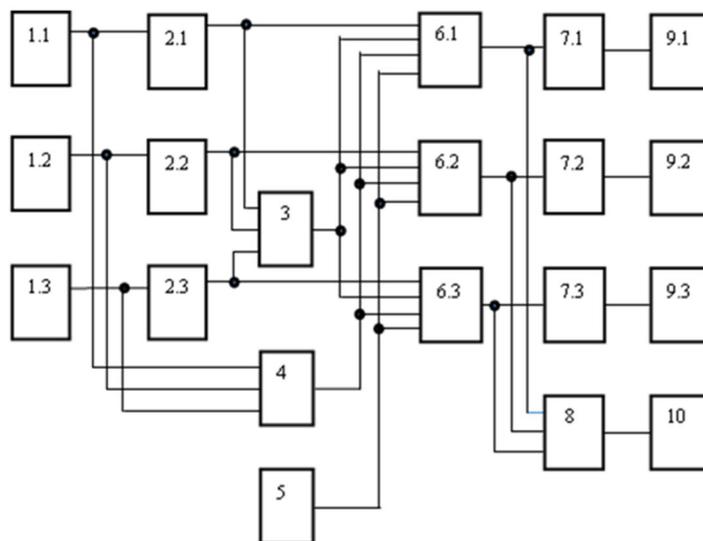
В момент перехода СЭЭС в неработоспособное состояние, определяемый выражением (1), и в соответствии с алгоритмом, описанным в работе [19], целесообразно применить превентивную разгрузку сети. При этом, согласно материалам, изложенным в [8], можно спрогнозировать режим работы СЭЭС после отключения одного из ГА и, при необходимости, отключить группы приемников электроэнергии требуемой мощности. После разгрузки сети требуется определить агрегат, отключение которого позволит СЭЭС безаварийно перейти в режим правильного функционирования. В этой связи для повышения живучести системы при работе электростанции с обеспечением резерва мощности, когда работают три и более ГА, предлагается способ, который можно представить в виде следующего логического выражения:

$$F_i = F_0 \wedge L_4 \wedge L_5, \quad (2)$$

где F_i – i -й диагностический признак, на основании которого выбирается отключаемый ГА, $i = \overline{1, n}$ (n – количество ГА, работающих в параллель); L_4 – событие, согласно которому в составе электростанции работают более двух генераторов; L_5 – событие, при котором непрерывно увеличивается нагрузка i -го агрегата.

Обоснованность данного решения объясняется тем, что неисправность СЭС, которая характеризуется неконтролируемым изменением подачи топлива в один из ГА, встречается достаточно редко. В этой связи вероятность одновременного возникновения такого отказа сразу в двух агрегатах, имеющих независимые системы питания, очень мала и в инженерной практике подобное событие может не учитываться.

Рассмотрим практическую реализацию предложенного способа превентивной защиты СЭС на примере устройства, функциональная схема которого представлена на рисунке.



Функциональная схема устройства для превентивной защиты СЭС от обратной мощности:

- 1.1–1.3 – датчики активной нагрузки первого, второго и третьего ГА соответственно;
- 2.1–2.2 – блоки контроля увеличения нагрузки соответствующего ГА;
- 3 – блок контроля увеличения нагрузки только одного из ГА;
- 4 – блок идентификации увеличивающегося превышения разности нагрузок ГА;
- 5 – блок контроля режима работы СЭС более чем с двумя ГА; 6.1–6.3 – логические элементы «И»;
- 7.1–7.3 – одновибраторы с задержкой формирования импульса;
- 8 – логический элемент «ИЛИ»; 9.1–9.3 – блоки отключения соответствующих ГА;
- 10 – устройство превентивной разгрузки СЭС

Датчики 1.1–1.3 генерируют сигналы, пропорциональные нагрузке соответствующего агрегата; каждый из блоков 2.1–2.3 формирует на своем выходе сигнал логической «1», если нагрузка соответствующего ГА увеличивается, а блок 3 выдает сигнал, если нагружается только один агрегат, контролируя при этом наступление события L_1 . Блок 4 осуществляет попарное сравнение

нагрузок агрегатов. На его выходе появляется сигнал логической «1», если разность нагрузок хотя бы одной из пар ГА превысит допустимое значение и будет расти, что соответствует выполнению условий L_2 и L_3 .

Наличие сигнала логической «1» на выходе блока 5 свидетельствует о том, что в данный момент в составе электростанции работает более двух генераторов, т.е. событие L_4 наступило. Появление аналогичного сигнала на выходе одного из блоков 2.1-2.3 при условии его присутствия на выходе блока 3 свидетельствует о выполнении условия L_5 . Следовательно, появление сигнала логической «1» на втором и третьем входах каждого из логических элементов «И» согласно условию (1) позволит идентифицировать неработоспособное состояние СЭЭС, а поступление этого сигнала на первый и четвертый входы одного из этих блоков, например блока 6.3, в соответствии с выражением (2) позволит определить ГА, отключение которого предотвратит переход исправных агрегатов в двигательный режим работы. Сигнал логической «1» с выхода данного логического элемента «И» поступит на третий вход логического элемента «ИЛИ» (блок 8) и на вход третьего одновибратора (блок 7.3). При этом на выходе блока 8 сформируется сигнал логической «1», который инициирует работу устройства превентивной разгрузки (блок 10). После снижения нагрузки СЭЭС на выходе одновибратора 7.3 появится сигнал логической «1», который поступит на вход блока 9.3 и отключит третий ГА. При этом первый и второй агрегаты будут работать без перегрузки и перерыва в электроснабжении ответственных приемников электроэнергии не произойдет, СЭЭС перейдет в состояние правильного функционирования, минуя аварийную ситуацию.

Выводы. 1. Практикуемый в настоящее время способ защиты ГА от обратной мощности оказывается неэффективным в случае дефектов, приводящих к несанкционированному увеличению подачи топлива в первичный двигатель одного из агрегатов.

2. Сформулирован диагностический признак, позволяющий своевременно, до перегрузки одного из ГА, идентифицировать неработоспособное состояние СЭЭС и при необходимости разгрузить сеть.

3. Предложен способ превентивной защиты СЭЭС, который обеспечивает безаварийный переход системы в состояние правильного функционирования в случае дефектов, приводящих к несанкционированному увеличению подачи топлива в первичный двигатель одного из ГА. При этом не допускается отключение работоспособных агрегатов при их работе с обратной мощностью.

4. Разработанный подход может применяться в случае, когда в составе судовой электростанции работают три и более ГА, в том числе и в режиме работы с обеспечением резерва мощности. При параллельной работе двух агрегатов данный способ применяться не может. Для этого случая требуется проведение дальнейших исследований с целью совершенствования метода превентивной защиты СЭЭС.

Литература

1. Арцишевский Я.Л., Гиёев Б.М. Эффективность автоматической частотной разгрузки с передачей команд на отключение электроприемников 0,4 кВ // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. Т. 60, № 6. С. 37–44.

2. Булатов Ю.Н. Интеллектуальные системы управления установками распределенной генерации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 10(129). С. 78–94. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-78-94.

3. Бычков Е.В., Захаров П.А. Обеспечение устойчивой работы автономных энергосистем в газовой промышленности // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой промышленности. 2019. № 3(37). С. 30–40.

4. Воронай Н.И., Чулюкова М.В. Противоаварийное управление нагрузкой для обеспечения гибкости электроэнергетических систем // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24, № 4. С. 781–794. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-781-794.

5. Саушев А.В., Широков Н.В. Превентивная защита автономных электроэнергетических систем от обратной мощности на основе предупредительного управления // Электротехника. 2023. № 2. С. 34–40.

6. Филиппов С.П., Дильман М.Д., Илюшин П.В. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 4–17. DOI: 10.1134/S0040363619120038.

7. Широков Н.В. Предупредительное управление судовой электроэнергетической системой при отказе источников электроэнергии // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11, № 2. С. 396–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.

8. Широков Н. В. Превентивная защита судовой электроэнергетической системы с параллельно работающими генераторными агрегатами // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2021. №. 62-63. С. 121–130.

9. Правила классификации и постройки морских судов. СПб.: РМРС, 2017. 807 с.

10. Эффективность распределенной энергетики в условиях минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов и др. // Промышленная энергетика. 2019. № 5. С. 8–16.

11. Aman M.M. Modeling and simulation of reverse power relay for generator protection. In: 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka. Malaysia, 2012, pp. 317–322. DOI: 10.1109/PEOCO.2012.6230882.

12. Dileep G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 2020, vol. 146, pp. 2589–2625. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.092.

13. Davarzani S., Pisica I., Taylor G.A., Munisami K.J. Residential demand response strategies and applications in active distribution network management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 138, p. 110567. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110567.

14. Guo J., Badesa L., Teng F. et al. Value of point-of-load voltage control for enhanced frequency response in future GB power system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, vol. 11(6), pp. 4938–4948. DOI: 10.1109/TSG.2020.3000728.

15. Holguin J.P., Rodriguez D.C., Ramos G. Reverse Power Flow (RPF) Detection and Impact on Protection Coordination of Distribution Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, vol. 56(3), pp. 2393–2401. DOI: 10.1109/TIA.2020.2969640.

16. Mishra D.P., Senapati R., Patra S. et al. Enhancing the Performance of Reverse Power Relay for Generator Protection. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 2021, vol. 16, pp. 336–343. DOI: 10.37394/232016.2021.16.33.

17. Rammal Z.A., Daher N.A., Kanaan H. et al. Optimal PMU placement for reverse power detection. In: 2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (RE-DEC). IEEE, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/REDEC.2018.8597975.

18. Samami M.M., Azary N. Novel fast and secure approach for reverse power protection in synchronous generators. *IET Electric Power Applications*, 2019, vol. 13(12), pp. 2128–2138. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5961.

19. Saushev A., Shirokov N., Kuznetsov S. Preventive Protection of Ship's Electric Power System from Reverse Power. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, 1258 AISC, pp. 388–398. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-533.

20. Xiong J. The additional control strategies to improve primary frequency response for hybrid power plant with gas turbines and steam turbines. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 557–564.

САУШЕВ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ – доктор технических наук, заведующий кафедрой электропривода и электрооборудования береговых установок, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Россия, Санкт-Петербург (saushev@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2657-9500>).

СМОЛЕНКОВ АНАТОЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт кораблестроения и вооружения Военно-Морского Флота, Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», Россия, Санкт-Петербург (saman48@mail.ru).

ШИРОКОВ НИКОЛАЙ ВИКТОРОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования береговых установок, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Россия, Санкт-Петербург (shirokovn@inbox.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7170-0678>).

Aleksandr V. SAUSHEV, Anatoly M. SMOLENKOV, Nikolay V. SHIROKOV
PREVENTIVE PROTECTION OF THE SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEM
FROM THE OPERATION OF GENERATOR SETS
IN THE PROPULSION MODE

Keywords: marine electric power system, load, generator set, warning control, reverse power, primary engine, protection.

The paper presents the results of a study of the functioning of the ship's electrical power system in an emergency situation caused by the transition of one of the generating sets to propulsion mode. It has been shown that existing means of protection against reverse power are not effective in cases of an uncontrolled increase in fuel supply to the prime mover of one of the operating generating sets and cannot prevent an interruption in the power supply to consumers of the first category. In this regard, the task was formulated to develop methods and means to ensure a trouble-free transition to a state of proper functioning of the ship's electrical power system, preventing the operation of serviceable generators in propulsion mode.

The purpose of the work is to develop a method for generating a control effect on a ship's electrical power system, which includes three or more generating units, to ensure its trouble-free operation in a state of uncontrolled increase in fuel supply to the diesel engine of one of the units.

Methods and materials. To achieve the research goal, a functional-logical approach and a method of predictive management of the ship's electrical power system were used.

Research results. A new diagnostic sign of the inoperative state of the ship's electrical power system is proposed, according to which the system is recognized as inoperative at the moment when the load of only one of the operating units increases, and the difference in the loads of the generators has exceeded the permissible value and continues to increase. An original method has been developed for the preventive protection of the ship's electrical power system, ensuring a trouble-free transition to a state of proper operation in the event of an uncontrolled increase in the fuel supply to the diesel engine of one of the units. According to the proposed approach, the inoperative state of the system, which includes more than two generating units, is identified, preventive unloading of the network is carried out, the unit whose load is increasing is determined, and a command is given to open its circuit breaker. A functional diagram of a device that implements the developed method of preventive protection is presented.

Conclusions. The proposed approach makes it possible to timely identify and turn off an inoperative generating set in the event of an unauthorized increase in the fuel supply to the diesel engine. In this case, a transition to the motor mode and shutdown of operable units is not allowed, and a break in the power supply to consumers of electricity of the first category is excluded.

References

1. Artsishevskii Ya.L., Gieev B.M. *Effektivnost' avtomaticheskoi chastotnoi razgruzki s peregazovoi komand na otklyuchenie elektroprivodnikov 0,4 kV* [Efficiency of automatic frequency unloading with transmission of commands to turn off 0.4 kV electric receivers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 37–44.
2. Bulatov Yu.N. *Intellektual'nye sistemy upravleniya ustanovkami raspredelennoi generatsii* [Intelligent control systems for distributed generation installations]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, vol. 21, no. 10(129), pp. 78–94. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-78-94.
3. Bychkov E.V., Zakharov P.A. *Obespechenie ustoichivoi raboty avtonomnykh energosistem v gazovoi promyshlennosti* [Ensuring the stable operation of autonomous power systems in the gas industry]. *Avtomatizatsiya i IT v neftegazovoi promyshlennosti*, 2019, no. 3(37), pp. 30–40.
4. Voropai N.I., Chulyukova M.V. *Protivoavariinoe upravlenie nagruzkoj dlya obespecheniya gibkosti elektroenergeticheskikh sistem* [Emergency load management to ensure the flexibility of electric power systems]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 781–794. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-781-794.
5. Saushev A.V., Shirokov N.V. *Preventivnaya zashchita avtonomnykh elektroenergeticheskikh sistem ot obratnoi moshchnosti na osnove predupreditel'nogo upravleniya* [Preventive protection of autonomous electric power systems from reverse power on the basis of preventive control]. *Elektrotehnika*, 2023, no. 2, pp. 34–40.
6. Filippov S.P., Dil'man M.D., Ilyushin P.V. *Raspredelennaya generatsiya i ustoichivoe razvitie regionov* [Distributed generation and sustainable development of regions]. *Teploenergetika*, 2019, no. 12, pp. 4–17. DOI: 10.1134/S0040363619120038.
7. Shirokov N.V. *Predupreditel'noe upravlenie sudovoi elektroenergeticheskoi sistemoi pri otkaze istochnikov elektroenergii* [Preventive management of the ship's electric power system in case of failure of power sources]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 396–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.
8. Shirokov N.V. *Preventivnaya zashchita sudovoi elektroenergeticheskoi sistemy s parallel'no rabotayushchimi generatormymi agregatami* [Preventive protection of a ship's electric power system with parallel operating generator sets]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva*, 2021, no. 62-63, pp. 121–130.
9. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov* [Rules of classification and construction of marine vessels]. St. Petersburg, RMRS Publ., 2017, 807 p.
10. Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Ustinov D.A. et al. *Effektivnost' raspredelennoi energetiki v usloviyakh mineral'no-syr'evogo kompleksa* [Efficiency of distributed energy in the conditions of a mineral resource complex]. *Promyshlennaya energetika*. 2019, no. 5, pp. 8–16.
11. Aman M.M. Modeling and simulation of reverse power relay for generator protection. In: 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka. Malaysia, 2012, pp. 317–322. DOI: 10.1109/PEOCO.2012.6230882.
12. Dileep G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 2020, vol. 146, pp. 2589–2625. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.092.
13. Davarzani S., Pisica I., Taylor G.A., Munisami K.J. Residential demand response strategies and applications in active distribution network management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 138, p. 110567. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110567.
14. Guo J., Badesa L., Teng F. et al. Value of point-of-load voltage control for enhanced frequency response in future GB power system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, vol. 11(6), pp. 4938–4948. DOI: 10.1109/TSG.2020.3000728.
15. Holguin J.P., Rodriguez D.C., Ramos G. Reverse Power Flow (RPF) Detection and Impact on Protection Coordination of Distribution Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, vol. 56(3), pp. 2393–2401. DOI: 10.1109/TIA.2020.2969640.
16. Mishra D.P., Senapati R., Patra S. et al. Enhancing the Performance of Reverse Power Relay for Generator Protection. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 2021, vol. 16, pp. 336–343. DOI: 10.37394/232016.2021.16.33.

17. Rammal Z.A., Daher N.A., Kanaan H. et. al. Optimal PMU placement for reverse power detection. In: 2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC). IEEE, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/REDEC.2018.8597975.

18. Samami M.M., Azary N. Novel fast and secure approach for reverse power protection in synchronous generators. *IET Electric Power Applications*, 2019, vol. 13(12), pp. 2128–2138. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5961.

19. Saushev A., Shirokov N., Kuznetsov S. Preventive Protection of Ship's Electric Power System from Reverse Power. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, 1258 AISC, pp. 388–398. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-533.

20. Xiong J. The additional control strategies to improve primary frequency response for hybrid power plant with gas turbines and steam turbines. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 557–564.

ALEKSANDR V. SAUSHEV – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electric Drive and Electrical Equipment Shore Installations, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Russia, St. Petersburg (saushev@bk.ru).

ANATOLY M. SMOLENKOV – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Research Institute of Shipbuilding and Weapons of the Navy, The Military Education and Scientific Centre of the Navy «The Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov», Russia, St. Petersburg (saman48@mail.ru).

NIKOLAY V. SHIROKOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Russia, St. Petersburg (shirokovn@inbox.ru).

Формат цитирования: Саушев А.В., Смоленков А.М., Широков Н.В. Превентивная защита судовой электроэнергетической системы от работы генераторных агрегатов в двигательном режиме // Вестник Чувашского университета. – 2024. – № 2. – С. 130–140. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-2-130-140.