

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

© 2020 г. А. Г. Фишов¹, *, А. И. Марченко¹, **, В. В. Денисов¹, И. С. Мурашкина¹

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

*e-mail: fishov@ngs.ru

**e-mail: andrey1991@ngs.ru

Поступила в редакцию 29.01.2020 г.

После доработки 03.02.2020 г.

Принята к публикации 05.02.2020 г.

Одной из основных современных тенденций развития электроэнергетики является ее децентрализация с переходом к использованию электрогенераторов небольшой мощности (1–25 МВт), располагаемых в непосредственной близости к электрическим нагрузкам, а также децентрализации управления режимами, главным образом, в распределительных электрических сетях. Использование таких электрогенераторов (электростанций малой мощности) в качестве основного источника энергоснабжения с соответствующей системой управления, обеспечивающего в том числе надежность энергоснабжения потребителей, позволяет говорить о создании на их основе качественно новых энергосистем малой мощности (Minigrid). Цель работы – исследование способа, обеспечивающего техническую возможность безопасной синхронной работы энергоблоков малой мощности в составе Minigrid при параллельной работе с внешней электрической сетью, определение требований к уставкам срабатывания опережающего сбалансированного отделения локальной системы электроснабжения от внешней электрической сети. Представлены результаты моделирования режимов параллельной работы Minigrid на базе топливной генерации и схемы эквивалентного района электрической сети электроэнергетической системы. Результаты позволяют сделать выводы о безопасности параллельной работы Minigrid на базе когенерационной многоагрегатной электростанции с внешней с электрической сетью при применении разработанного способа.

Ключевые слова: малая распределенная генерация, синхронный режим, параллельная работа, устойчивость, противоаварийная автоматика, электрическая сеть

DOI: 10.31857/S0002331020010136

1. ВВЕДЕНИЕ

Современный тренд развития электрических сетей и электроэнергетических систем, как глобальных открытых систем Internet of Things с множеством активных элементов, включая распределенную генерацию, усиливает акцент на применении децентрализованного технологического управления, в том числе и для осуществления коммерческого управления (сделок по закупкам и поставкам энергии и услуг на различных рынках) [1–4].

Синтез инновационных технологий управления электрическими сетями с установками малой генерацией на базе солнечной-, ветро- и топливной когенерации, преобразователями разного рода тока, накопителями энергии, а также фазо-поворотными

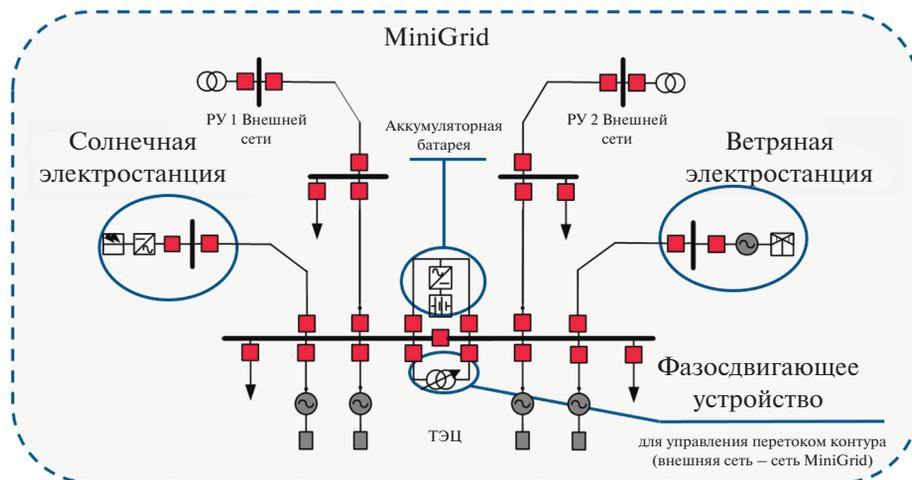


Рис. 1. Локальная система электроснабжения на базе энергетической ячейки Интернета энергии.

устройствами формирует энергетическую ячейку или интеллектуальную управляемую MiniGrid Интернета энергии (Internet of Energy, IoE) (рис. 1).

Главными факторами, стимулирующими развитие распределенной генерации потребителями энергии, являются:

- Необходимость адаптации к рыночной неопределенности в развитии электроэнергетики и в ценах на электроэнергию;
- Необходимость снижения рисков дефицита мощности и повышения собственной энергетической безопасности;
- Техническая и ценовая доступность новых высокоэффективных энергетических газотурбинных и газопоршневых установок, а также солнечных панелей, ветрогенераторов и накопителей энергии.

При этом малая генерация обеспечивает потребителю:

- снижение зависимости от централизованного энергоснабжения;
- одновременное производство электроэнергии и тепла (когенерация энергии);
- снижение затрат на энергию, связанное со снижением затрат на передачу энергии;
- снижение отрицательного воздействия на окружающую среду;
- повышение надежности энергоснабжения;
- малый срок окупаемости инвестиций;
- инвестирование в собственный энергетический бизнес.

Для экономической эффективности малой генерации недостаточно ее работы на локальную нагрузку, а необходимо включение во внешнюю электрическую сеть, однако, плохая электромеханическая совместимость генераторов малой и большой мощности требует решения проблемы управления подобными режимами [5–7].

2. ИНТЕГРАЦИЯ MINIGRID В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ВНЕШНЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Распределенное производство энергии – концепция совместного развития источников энергии и распределительных сетей, которая подразумевает наличие множества небольших по мощности энергетических ячеек, производящих тепловую и электрическую энергию для собственных нужд, а также направляющих излишки в общую электрическую сеть [8–10].

Таблица 1. Технологические барьеры и риски параллельной работы Minigrid с внешней электрической с сетью

| № | Риски и барьеры |
|---|--|
| 1 | Плохая электромеханическая совместимость вследствие малой механической инерции роторов синхронных генераторов энергоблоков Minigrid. Высокие риски возникновения опасных асинхронных режимов |
| 2 | Риски возникновения недопустимых ударных моментов на валах синхронных машин энергоблоков Minigrid при проходящих коротких замыканий в электрической сети |
| 3 | Увеличение токов короткого замыкания (особенно в схеме Minigrid) |
| 4 | Необходимость реконструкции средств релейной защиты и автоматик на подстанции присоединения Minigrid |
| 5 | Необходимость интеграции Minigrid в систему оперативного управления |
| 6 | Повышение требований к профессиональному уровню оперативного персонала Minigrid |

Интеграция энергетических ячеек как Minigrid в электрические сети содержит высокий потенциал технической и экономической выгоды для всех участников и субъектов объединения, это генерация, распределительные электрические сети и потребители энергии и электроэнергетических услуг [11, 12].

Наиболее простым и малозатратным способом интеграции Minigrid с внешней электрической сетью является их прямое включение на параллельную работу без вспомогательных устройств (роутеров). Однако без специального управления параллельная работа малой генерации с внешней электрической сетью при ее прямом включении имеет риски для оборудования и способна снижать надежность электрообеспечения как потребителей Minigrid, так и внешней электрической сети. Риски и технологические барьеры прямого включения на параллельную работу электростанций Minigrid и внешней электрической сети приведены в табл. 1.

Для исключения рисков при параллельной работе Minigrid в составе энергосистемы с сохранением положительных эффектов от их объединения разработан способ управления Minigrid в режимах как автономной, так и параллельной работой с внешней электрической сетью.

3. ПРОТИВОАВАРИЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ MINIGRID НА БАЗЕ СИНХРОННОЙ ГЕНЕРАЦИИ С ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ

3.1. Ударные моменты на валах синхронных генераторов в переходных процессах и при ошибках синхронизации электростанции

Максимальный ударный момент на валах синхронной машины может возникнуть при включении на параллельную работу Minigrid и внешней электрической сети с фазовым рассогласованием, соответствующим выдаче максимальной (предельной) электрической мощности.

Определим минимальные времена выбега роторов синхронных генераторов электростанции Minigrid в режиме параллельной работы с внешней электрической сетью до угла с максимальным моментом на валу синхронных машин.

Рассмотрим процесс при трехфазном коротком замыкании вблизи шин присоединения синхронных генераторов с отключением короткого замыкания через время Δt (рис. 2 и 3).

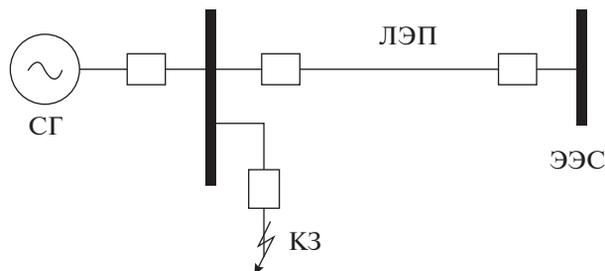


Рис. 2. Принципиальная схема для оценки времени выбега роторов генераторов.

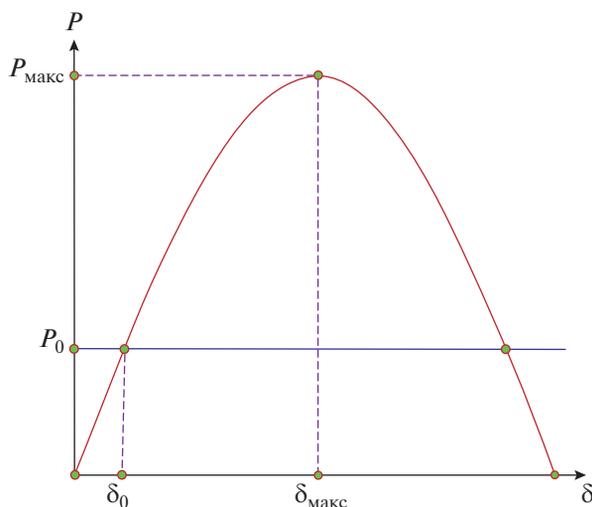


Рис. 3. Угловая характеристика мощности генератора.

Длительность короткого замыкания Δt и изменение угла от δ_0 до δ_{\max} связано выражением:

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2T_j \Delta \delta}{\omega_0}}.$$

Определим времена достижения угла максимальных ударных моментов на валу генераторов в зависимости от их постоянной времени инерции (T_j) и длительности короткого замыкания (табл. 2).

Постоянная времени инерции T_j газопоршневых энергоблоков ТЭС находится в диапазоне 1–2 с, поэтому проходящее короткое замыкание в электрической сети способно вызвать возникновение ударных моментов на валах кратностью 4–6 от номинальных, что может быть причиной их повреждения и/или отключения.

3.2. Способ противоаварийного управления параллельной работой Minigrid с внешней электрической сетью путем опережающего сбалансированного деления

Предлагаемый способ управления параллельной работой Minigrid с внешней электрической сетью с опережающим сбалансированным делением системы направлен на

Таблица 2. Предельные времена достижения угла максимальных ударных моментов на валу генераторов в зависимости от длительности короткого замыкания

| $T_j, \text{с}$ | $\Delta t, \text{с}$ |
|-----------------|----------------------|
| 1 | 0.1 |
| 2 | 0.14 |
| 3 | 0.175 |
| 4 | 0.195 |

ограничение токов короткого замыкания, предотвращение нарушений устойчивости параллельной работы с возникновением асинхронных режимов, исключение ударных моментов на валах синхронных машин, исключение необходимости согласования защит внешней сети с защитами и автоматикой Minigrid на базе электростанцией малой генерации [13–15].

Базовые идеи способа – опережающее сбалансированное деление системы, то есть деление до срабатывания релейной защиты и выключателей внешней электрической сети по фиксированным сечениям сети при нарушениях нормального режима с переходом в островной режим работы с последующим автоматическим восстановлением синхронизма и нормального режима с требуемой загрузкой оборудования.

Рассмотрим способ на простейшем принципиальном примере, соответствующем присоединению Minigrid к одной из шин 10 кВ подстанции 110/10 кВ (рис. 4).

Исходно система работает в одном из трех режимов:

1. Без выдачи значимой мощности во внешнюю сеть ($P_{\text{выд}} = 0$);
2. С выдачей значимой мощности во внешнюю сеть ($P_{\text{выд}} = P_{\text{зад}}$);
3. С потреблением значимой мощности из внешней сети ($P_{\text{выд}} = -P_{\text{зад}}$).

Первый режим является частным случаем второго при ($P_{\text{выд}} = P_{\text{зад}} = 0$).

Рассмотрим второй режим, как основной и наиболее интересный.

В этом режиме один из генераторов станции Minigrid (или несколько генераторов, образующих группу А) несет нагрузку $P_{\text{г}} = P_{\text{выд}}$, т.е. равную выдаваемой во внешнюю сеть мощности.

Это условие поддерживается режимной автоматикой в нормальных условиях работы системы.

При возникновении внешнего или внутреннего для сети Minigrid короткого замыкания, по факту снижения напряжения (например, на распределительном пункте) или появления напряжения обратной последовательности, опережающим образом

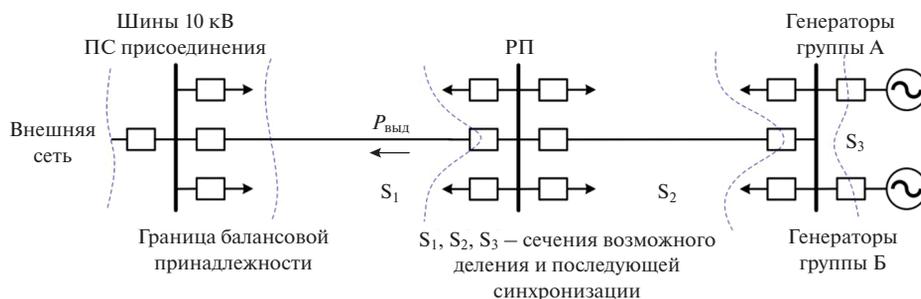


Рис. 4. Принципиальная схема, отражающая условия параллельной работы сети Minigrid на базе ТЭС с внешней сетью.

(менее уставок срабатывания защит внешней сети (за время 0.1 с)) отключаются выключатели сечения S_1 и генератора (выключатели генераторов группы А), обеспечивающих выдачу мощности во внешнюю сеть.

Если короткое замыкание было внешним, то при таком делении сохранился баланс мощности в отделившемся острове и его работоспособность при переходе оставшихся генераторов в режим регулирования частоты. Во внешней сети после деления восстанавливаются условия работы релейной защиты и автоматики, соответствующие отсутствию параллельной работы, поэтому не требуется согласование работы защит острова и внешней сети.

Если короткое замыкание было внутренним с нарушением баланса после его отключения, то в отделившемся острове после восстановления напряжения автоматика действует на предотвращение нарушения недопустимого снижения или повышения частоты путем отключения части нагрузки, включения дополнительной нагрузки, изменения выдаваемой генераторами мощности. Этим обеспечивается сохранение работоспособности отделившейся части.

Восстановление системы (параллельной работы) осуществляется автоматически путем точной синхронизации при восстановлении нормальных условий (по напряжению и частоте с обеих сторон выключателя сечения для деления).

Рассмотрим третий режим

Если в исходном режиме Minigrid была дефицитной ($P_{\text{выд}} = -P_{\text{зад}}$), то деление будет происходить по сечению S_2 с ликвидацией основного дефицита мощности отделившегося района путем отнесения части нагрузки (нагрузки РП) к внешней сети.

Таким образом, быстродействующее опережающее деление (деление до срабатывания релейной защиты и выключателей внешней сети) по фиксированным сечениям позволяет:

- полностью восстановить условия работы релейной защиты внешней сети после деления, соответствующие отсутствию подключения к сети Minigrid, т.е. исключить необходимость изменения релейной защиты и автоматики внешней сети;
- сохранить неизменными отключаемые выключателями токи короткого замыкания (кроме двух выключателей в сечении S_1 и S_2);
- радикальным образом предотвратить возможность нарушения устойчивости параллельной работы Minigrid с внешней электрической сетью;
- исключить возникновение на валах синхронных машин разрушительных динамических моментов из-за больших электромагнитных моментов, возникающих при восстановлении напряжения в сети после отключения короткого замыкания с учетом выбега роторов генераторов.

3.3. Асинхронные режимы в электрической сети и их предотвращение

Основными причинами отключения энергоблоков станции обычно являются: превышение номинального тока, перегрузка по активной мощности, снижение напряжения, превышение напряжения обратной последовательности, наброс или сброс электрической нагрузки на генератор, а также возникновение недопустимых асинхронных режимов [16, 17].

Моделирование динамических процессов при присоединении Minigrid с малой генерацией на параллельную работу к внешней электроэнергетической системе выполнялось в ПВК “Мустанг”. На рисунке 5 приведена схема моделируемого района электрической сети Новосибирской энергосистемы Единой энергетической системы России с эквивалентным замещением внешней части в узлах примыкания.

Номинальная мощность когенерационной ТЭС 10 МВт (состав оборудования: 5 газопоршневых установок электрической мощностью по 2 МВт). В базовом расчетном режиме Minigrid работает параллельно с энергосистемой по одной линии через ши-

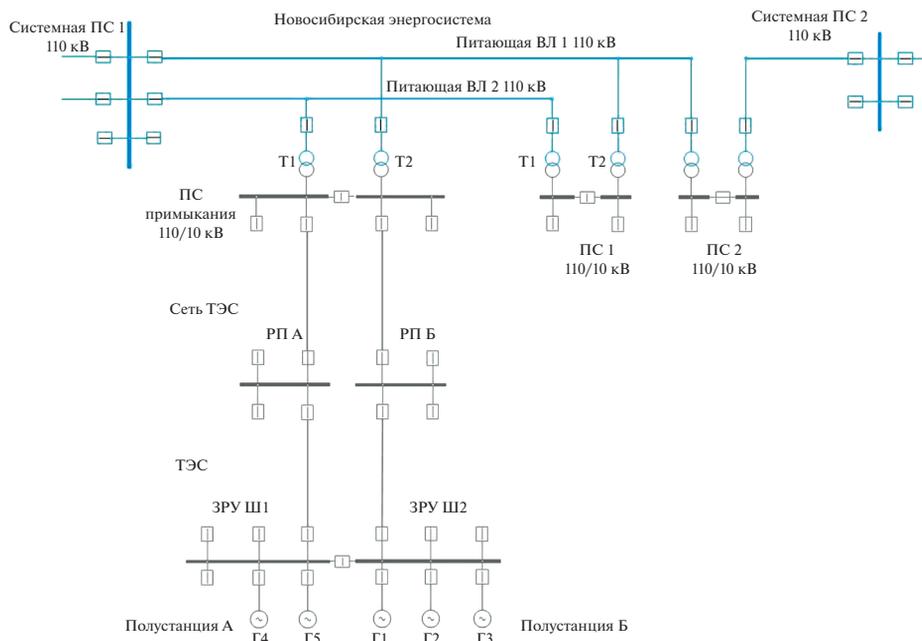


Рис. 5. Схема присоединения Minigrid базы малой генерации к подстанции внешней сети эквивалентной Новосибирской электроэнергетической системы.

ны 10 кВ подстанции присоединения в режиме выдачи избыточной мощности 3.6 МВт (2 блока электростанции по 1.8 МВт) во внешнюю электрическую сеть Новосибирской энергосистемы. Остальные 3 блока ТЭС с нагрузкой 5.4 МВт (по 1.8 МВт каждый) работают в режиме следования за собственной нагрузкой Minigrid.

Осциллограмма переходного процесса при проходящем трехфазном коротком замыкании на шинах 110 кВ (в узле № 109) основной питающей подстанции без отделения ТЭС от внешней электрической сети представлена на рис. 6.

Контролируемые параметры: P_g в 11 узле схемы – выдаваемая активная мощность одного блока (генератора) ТЭС. U в 1121 узле схемы – измеряемое напряжение на шинах распределительного пункта Minigrid, т.е. в месте расположения пускового органа делительной автоматики. Частота в 11 узле схемы – частота на блоке (генераторе) ТЭС. Относительный угол ротора узла 11 и узла 1 – измеряемый относительный угол ротора генераторов в 11 узле относительно опорного узла 1.

График мощности приведен для одного генератора электростанции. При произошедшем возмущении возникает снижение напряжения на шинах распределительного пункта локальной системы электроснабжения до 1.6 кВ (при уставке срабатывания пускового органа противоаварийного управления автоматики – 8 кВ). Из осциллограммы видно, что устойчивость параллельной работы Minigrid с внешней электрической сетью нарушилась, возник краткосрочный асинхронный режим с двумя проворотами роторов генераторов ТЭС относительно внешней сети, произошла ресинхронизация. Колебания мощности каждого генератора в переходном процессе от 4.5 до – 3.2 МВт, что приведет к отключению энергоблока и погашению в целом электростанции Minigrid ее защитам.

По представленным результатам можно сделать вывод о необходимости решения задачи недопущения угрожающих оборудованию режимов.

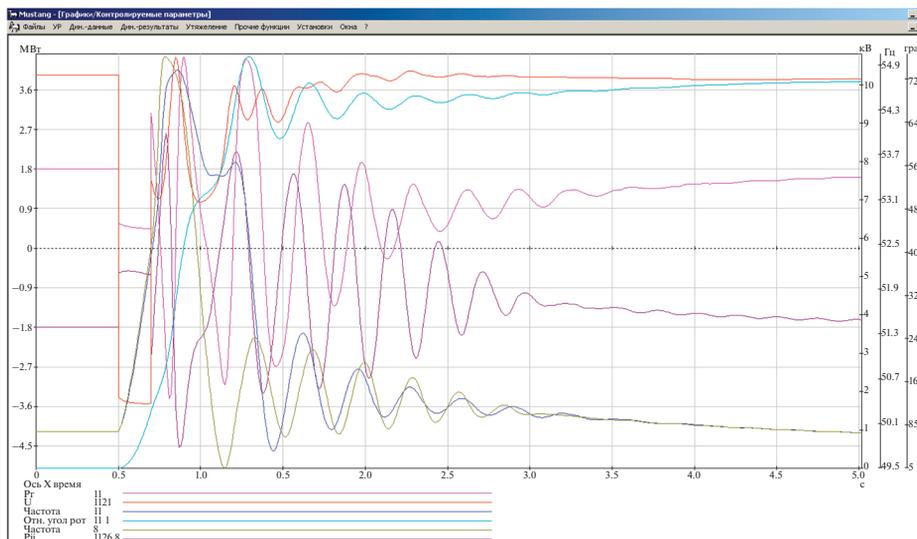


Рис. 6. Переходный процесс в Minigrad при проходящем трехфазном коротком замыкании на шинах 110 кВ основной питающей подстанции (в узле № 109) с нарушением устойчивости режима (без отделения Mini-grid от внешней сети).

Для этого предлагается применение вышеописанного способа автоматического противоаварийного управления режимом подобных объектов.

Ниже представлены результаты исследования эффективности данного способа при трех вариантах реализации опережающего сбалансированного отделения Minigrad при возмущении нормального режима:

- Балансирующее отключение части энергоблоков ТЭС Minigrad сигналом пускового органа делительные автоматики без дополнительной задержки (время отключения с учетом времени срабатывания пускового органа и выключателя энергоблока (генератора) ТЭС 0.09 с).
- Балансирующее отключение части энергоблоков с задержкой на передачу сигнала от пускового органа до выключателя энергоблока (генератора) ТЭС.
- Отделение локальной системы электроснабжения от внешней электрической сети с балансирующим отключением части энергоблоков по факту повышения частоты на 0.1 Гц от номинальной (50 Гц) с учетом времени срабатывания выключателя генератора ТЭС (0.07 с).

Ниже представлены результаты моделирования второго варианта как технически наиболее вероятного.

Характеристика режима – балансирующее отключение части энергоблоков с задержкой на передачу сигнала от пускового органа до выключателя энергоблока (генератора) ТЭС. Длительность короткого замыкания составляет $t_{кз} = 0.2$ с. Пусковой орган делительной автоматики срабатывает через $t_{по} = 0.02$ с, а отключение Minigrad происходит за время менее 0.09 с. Балансирующее отключение 2-х генераторов происходит с задержкой 0.09 с. В результате действия автоматики Minigrad переходит в режим изолированной работы с самобалансом в 5.4 МВт по генерации и потреблению мощности электроприемниками. Переходный процесс данного режима при трехфазном коротком замыкании на шинах подстанции 110 кВ на (в узле № 109) представлен на рис. 7.

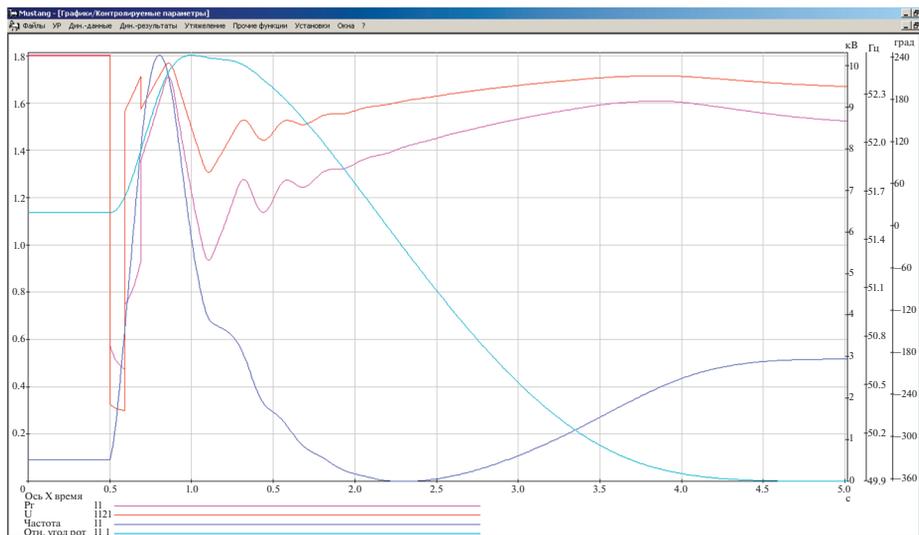


Рис. 7. Переходный процесс в локальной системе электроснабжения без нарушения устойчивости режима при проходящем трехфазном коротком замыкании на шинах 110 кВ (в узле № 109) основной питающей подстанции с отделением ТЭС от внешней электрической сети под действием разработанной автоматики.

Из полученной осциллограммы следует, что максимальное повышение частоты составило 2.8 Гц. Колебания и отклонения режимных параметров сохраняемых в работе генераторов допустимы и не приводят к их отключению защитами энергоблоков. Параметры процесса обеспечивают в послеаварийном режиме работоспособность Mini-grid в автономном режиме.

4. АВТОМАТИКА ДЛЯ MINIGRID

Разработанная на кафедре Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), с участием авторов статьи, автоматика предназначена для осуществления полностью автоматического управления режимами Minigrid по активной и реактивной мощности в нормальных и аварийных условиях с выбором состава работающего оборудования и вариантов работы – островном или параллельном с внешней электрической сетью [18–21]. Объекты управления автоматикой:

- Minigrid на базе многоагрегатной малой синхронной генерации, способные к островной работе и включаемые напрямую (синхронные связи) на параллельную работу с внешними электрическими сетями;
- Районы существующих электрических сетей, образуемые при включении электростанций малой мощности, способных сохранить электроснабжение всех или части потребителей при отключении от остальной электрической сети. Подобные районы обладают потенциалом создания на их основе полноценных Minigrid.

Общий вид стойки устройства, размещенной в лаборатории и подключенной к физической электродинамической модели энергосистемы показан на рис. 8.

Среди других подсистем управления автоматики (режимной, измерительной, контрольно и блокировочной, визуализирующей и сигнализирующей) наиболее важной является противоаварийная, осуществляющая выдачу команд на опережающее сбалансированное отделение Minigrid по связям с внешней электрической се-



Рис. 8. Общий вид автоматика Minigrad в Центре испытаний устройств контроля и управления режимами электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета.

тью. Пусковой орган противоаварийной подсистемы выявляет факт снижения (провала) напряжения прямой последовательности ниже уставки срабатывания и выдает сигнал на отключение выключателей за время менее 20 мс.

Сигнал на отключение проходит по заранее подготовленным маршрутам с воздействием на отключение либо одного из выключателей в цепи связи с внешней электрической сетью, либо дополнительно на отключение генераторов, осуществляющих выдачу мощности во внешнюю сеть. Совместное действие (поддержание условий сбалансированного деления) режимной автоматикой и быстрого деления (отключение сетевого выключателя и, при необходимости, генераторных) при коротком замыкании в электрической сети приводит к сбалансированному отделению Minigrad без нарушения электроснабжения потребителей.

ВЫВОДЫ

При подключении на параллельную работу Minigrad с мощной внешней энергосистемой, Minigrad не способна оказывать возмущающих воздействий, угрожающих нарушению устойчивости режима региональной электроэнергетической системы, однако, возникающие динамические моменты на валах генераторов электростанции Minigrad в переходных процессах могут приводить к их повреждению.

Необходимо принимать специальные меры, обеспечивающие безопасность режима параллельной работы для генераторов Minigrad без нарушения электроснабжения ее

нагрузки. На основе анализа проблемы параллельной работы Minigrd с внешней мощной энергосистемой предложено ее решение средствами автоматического управления. Для этого предложен способ противоаварийного опережающего сбалансированного прерывания параллельной работы Minigrd с внешней электрической сетью, обеспечивающей ограничение отключаемых токов короткого замыкания, предотвращение нарушений устойчивости параллельной работы с возникновением асинхронных режимов, исключение ударных моментов на валах синхронных машин, исключение необходимости согласования защит внешней сети с защитами и автоматикой присоединяемой сети с электростанцией. При восстановлении условий для нормальной работы производится автоматическое восстановление нормального режима ее работы.

Представлены результаты моделирования устойчивости параллельной работы при управлении предложенным способом для параллельно работающих систем Mini- и MascoGrid. Опытный образец автоматики разработан в Новосибирском государственном техническом университете совместно с компанией партнером ООО “Модульные системы Торнадо” (г. Новосибирск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Caballero V., Vernet D., Zaballos A., Corral G.* Prototyping a web-of-energy architecture for smart integration of sensor networks in smart grids domain // *Sensors (Switzerland)*. 2018. V. 18. № 2. <https://doi.org/10.3390/s18020400>
2. *Cao Y.* A comprehensive review of Energy Internet: basic concept, operation and planning methods, and research prospects // *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2018. V. 6. № 3. P. 399–411. <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0350-8>
3. *Wu F.F., Varaiya P.P., Hui R.S.Y.* Smart Grids with Intelligent Periphery: An Architecture for the Energy Internet // *Engineering*, 2015. V. 1. № 4. P. 436–446. <https://doi.org/10.15302/J-ENG-2015111>
4. *Zhou Y., Ni W., Zhu Z.* Architecture of Energy Internet and Its Technologies in Application Reviewed // *J. Clean Energy Technol.* 2017. V. 5. № 4. P. 320–327. <https://doi.org/10.18178/jocet.2017.5.4.391>
5. *Mukatov B.B., Fishov A.G.* Disintegration of power grid as part of the task of increasing functionality of electric system // *Proc. E3S Web of Conferences*. 2017. V. 25. P. 03009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172503009>
6. *Ilyushin P.V., Fedorov Yu.G., Filippov S.P., Kucherov Yu.N., Nekrasov S.A., Veselov F.V., Yarosh D.N., Zeygarnik Yu.A., Zhuk A.Z.* Features of small dispersed CHP integration into the power system // *Proc. of 45th International Conference on Large High Voltage Electric Systems, CIGRE Session 45*. Paris. France. August 24–29. 2014. P. 1–10.
7. *Kucherov Yu.N., Yarosh D.N., Fedorov Yu.G., Oudalov A.* An analysis of technical aspects of smart grid technologies integration into power system of megacity // *Proc. CIGRE International Symposium “The electric power system of the future – Integrating supergrids and microgrids”*. Bologna. Italy. 13–15 September 2011.
8. *Ilyushin P.V., Pazderin A.V.* Requirements for power stations islanding automation // *Proc. of 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Moscow. Russia. May 15–18. 2018. P. 1–6. Doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728682.
9. *Ilyushin P.V., Filippov S.P.* Under-frequency load shedding strategies for power districts with distributed generation // *Proc. of 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Sochi, Russia. March 25–29. 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8743001>.
10. *Bulatov Yu.N., Kryukov A.V.* A multi-agent control system of distributed generation plants // *Proc. of 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, IEEE Conference Publications. 2017. P. 1–7.
11. *Ghasempour A.* Internet of things in smart grid: Architecture, applications, services, key technologies, and challenges // *Inventions*. V. 4. № 1. 2019. <https://doi.org/10.3390/inventions4010022>
12. *Saleem Y., Crespi N., Rehmani M. H., Copeland R.* Internet of Things-Aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions // *IEEE Access*. V. 7. P. 62962–63003. 2019.
13. Патент на изобретение 2662728 РФ. Способ противоаварийного управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях / Марченко А.И., Мукатов Б.Б., Фишов А.Г. // 2016. Бюллетень Изобретений № 22.

14. *Fishov A., Marchenko A., Murashkina I., Erdenebat E., Serdyukov O., Ivkin Y.* Automation of Unmanned Low Capacity Power Plant with Synchronized Generation // Proc. 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk. 2018. P. 108–114. Doi: <https://doi.org/10.1109/APEIE.2018.8545916>
15. *Марченко А.И., Денисов В.В., Мурашкина И.С.* Средства и способы управления параллельной работой электрической станции малой генерации с электрической сетью // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2019. № 1(74). С. 77–90. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-1-77-90>
16. *Ilyushin P.V.* Emergency and post-emergency control in the formation of micro-grids // Proc. of Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES), E3S Web of Conferences, Vol. 25. Bishkek. Kyrgyzstan. September 11–15. 2017. P. 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172502002>
17. *Ilyushin P.V.* The analysis of dispersed generation influence on power system automatics settings and function algorithms // Proc. of Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES), E3S Web of Conferences. V. 58. Irkutsk. Russia. July 02–07 2018. P. 1–5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185802001>
18. *Гежа Е.Н., Глазырин В.Е., Глазырин Г.В., Ивкин Е.С., Марченко А.И., Семендяев Р.Ю., Сердюков О.В., Фишов А.Г.* Системная автоматика для интеграции локальных систем электроснабжения с синхронной малой генерацией в электрические сети // Релейщик. 2018. № 2. С. 24–31.
19. *Мукатов Б.Б., Карджаубаев Н.А., Фишов А.Г.* Особенности обеспечения надежности электроснабжения в изолированно работающих энергосистемах с малой генерацией // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. №4. 2015. С. 94–104. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2015-4-94-104>
20. *Фишов А.Г., Карджаубаев Н.А.* Децентрализованное мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 6(137). С. 183–195. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-183-195>
21. *Marchenko A., Fishov A.* The impact of distributed generation on power quality of the electric network // Proc. Applied Mechanics and Materials, V. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. 2015. P. 248–254. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.248.

The Study of Low Capacity Local Power Supply System Parallel Operation Stability with the External Power Network

A. G. Fishov^{a,*}, A. I. Marchenko^{a,**}, V. V. Denisov^a, and I. S. Murashkina^a

^a*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

**e-mail: fishov@ngs.ru*

***e-mail: andrey1991@ngs.ru*

One of the key aspects for development of power engineering is decentralization with the transition to the use of low capacity electric units (1–25 MW) located in close proximity to electric loads, as well as decentralization of mode control, mainly in distributed electric networks. The employment of such electric units (small-scale generation power plants) as the main source of energy supply with an appropriate control system, which ensuring reliability of energy supply to consumers, allows us to talk about creating qualitatively new low capacity power systems (Minigrid) based on it. The objective of this paper is to study of method that provides the technical feasibility of safe synchronous operation of low capacity power units in Minigrid with network for parallel operation, determinate the setpoint settings of the leading balanced division of the local power supply system from the external electric network. The outcomes of Minigrid mode simulation based on fuel generation and network equivalent area scheme of Power System are presented. The results has allowed drawing conclusions about the safety of parallel operation with Minigrid based on a cogeneration multi-unit power plant and external power supply network introducing the developed method.

Keywords: distributed low capacity generation, synchronized mode, parallel operation, emergency control automatics, electric network