

Способы предотвращения излишних отключений ветровых электростанций при нормативных возмущениях в распределительных сетях

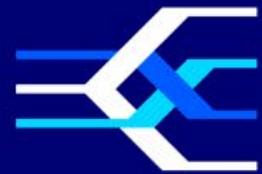
Илюшин Павел Владимирович

Д.т.н., руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики

ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук»

2023 / 5–6 июля

Москва / Конгресс-центр ЦМТ



VIII Международная
научно-техническая конференция

«Развитие и повышение надежности
распределительных электрических сетей»

ОРГАНИЗАТОРЫ



Существующее положение

В соответствии со СИПР ЕЭС России к 2025 г. мощность ВЭС составит 3,4 ГВт, а программой ДПМ ВИЭ 2.0 на 2025-2035 гг. запланирован ввод еще около 3,2 ГВт на ВЭС.

ВЭС и СЭС, как правило, интегрируются в распределительные сети среднего 6-35 кВ (мощностью до 1 – 10 МВт на одну цепь) и высокого 110-220 кВ напряжения (мощностью до 15 – 100 МВт на одну цепь).

Доля ВЭС и СЭС в структуре генерирующих мощностей отдельных энергосистем достигнет к 2035 г. – 15-30 %.

Необходимы групповые и индивидуальные технические решения, позволяющие решить проблему излишних отключений ВЭУ, без проведения масштабной реконструкции устройств РЗ в прилегающей распределительной сети

На ВЭС применялось либо оборудование зарубежных заводов-изготовителей, либо собранное в России по лицензии, с локализацией производства отдельных элементов.

На ВЭУ IV типа инверторные преобразователи соответствуют требованиям сетевых кодексов других стран, в т.ч. в отношении функции LVRT.

При ликвидации КЗ в сети резервными защитами с выдержками времени 1-2,5 с ВЭУ отключаются раньше, что приводит к набросам нагрузки на генерирующие установки традиционных электростанций, ЛЭП и силовые трансформаторы.

Реализация функции LVRT в ВЭУ IV типа

Если на выходе инверторного преобразователя $U < 0,25 U_{ном}$, то контроллер временно блокирует его работу, с прекращением инжекции реактивного тока, а если $U < 0,2 U_{ном}$, то действует на отключение автоматического выключателя 690 В ВЭУ

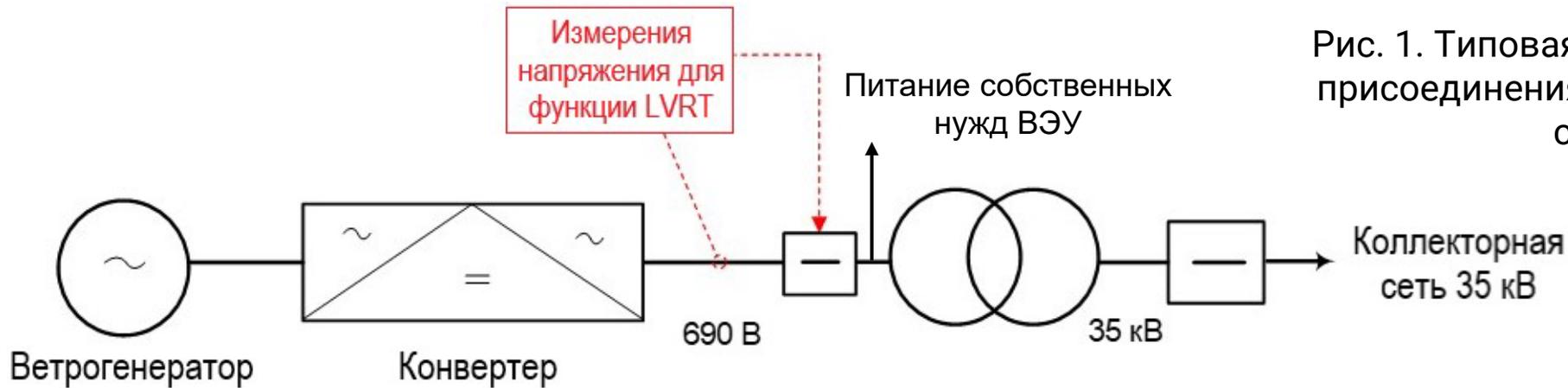


Рис. 1. Типовая однолинейная схема присоединения ВЭУ к коллекторной сети ВЭС

- измеряются линейные напряжения (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}) на выходе инверторного преобразователя (690 В)
- функция LVRT срабатывает при снижении любого из линейных напряжений ниже заданной уставки, в соответствии с заданной временной характеристикой функции LVRT
- ВЭУ отключается автоматическим выключателем с приводом 690 В для сохранения питания собственных нужд ВЭУ

Причины ограничений режимов работы инверторного преобразователя

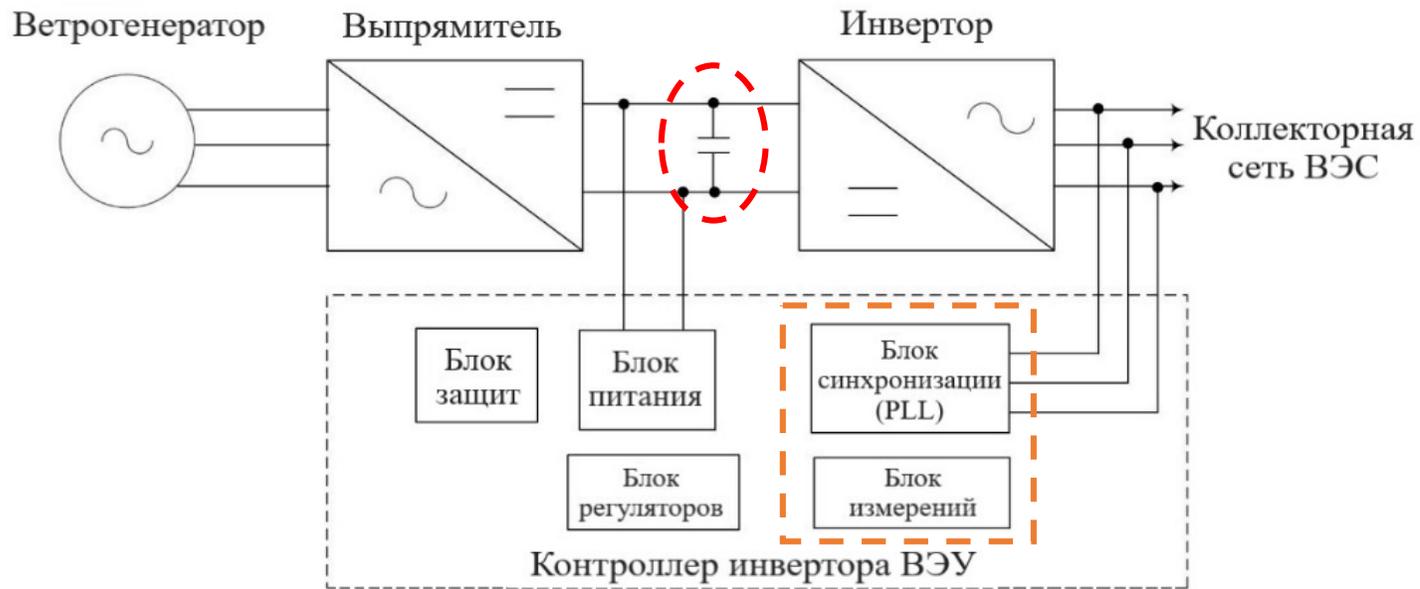


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема сетевого инверторного преобразователя ВЭУ IV типа

Ограничения на режимы работы инверторного преобразователя ВЭУ обусловлены:

- организацией питания цепей управления контроллера инвертора от звена постоянного тока
- величиной емкости конденсатора в звене постоянного тока между выпрямителем и инвертором для сглаживания пульсаций
- формированием ошибочных сигналов блоками измерений и синхронизации (PLL) при напряжении на входе ниже $0,2 U_{ном}$

Присоединение СТАТКОМа к шинам РУ 35 кВ ВЭС

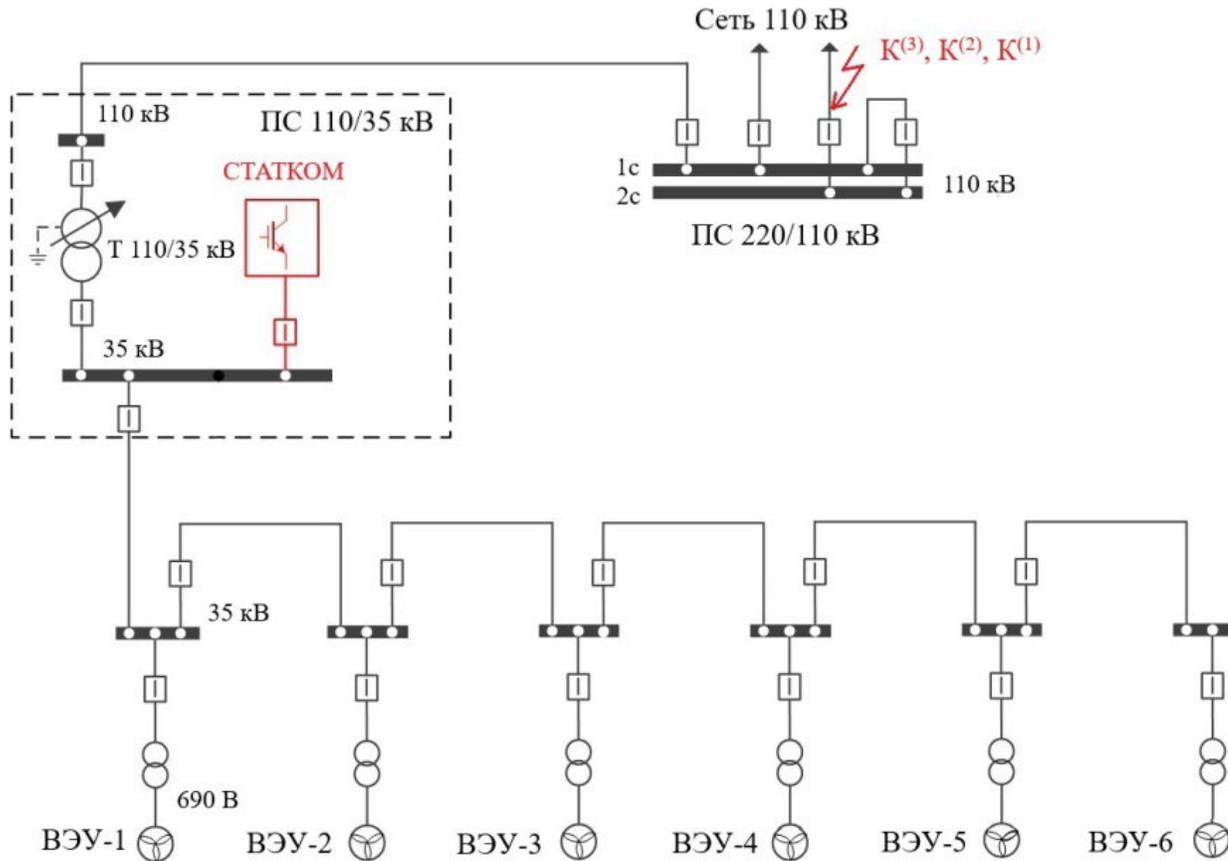


Рис. 3. Схема присоединения СТАТКОМа к сети 35 кВ ВЭС

Технические характеристики СТАТКОМ:

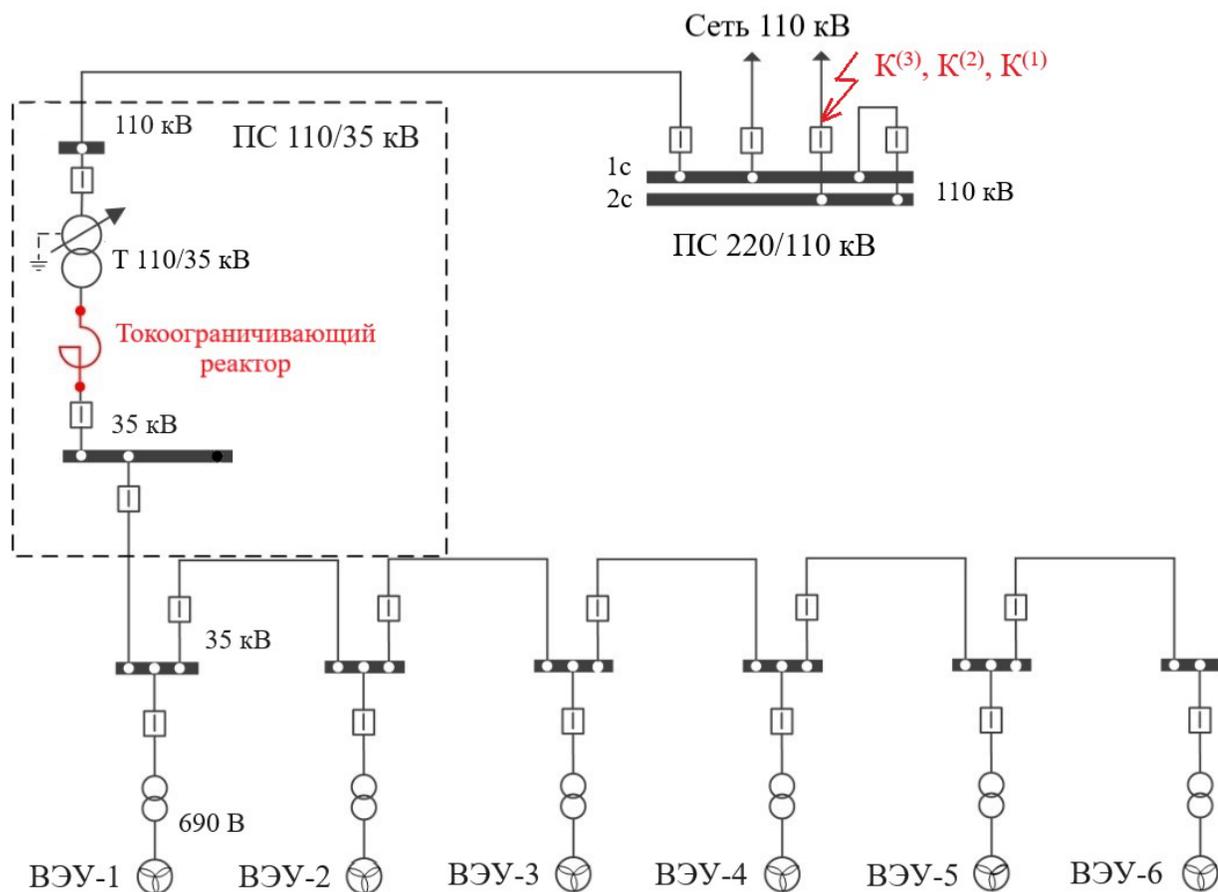
- $U_{ном} = 35 \text{ кВ}$
- $S_{ном} = 10 \text{ Мвар}$
- диапазон рабочих напряжений $0,8 U_{ном} \leq U_{раб} \leq 1,2 U_{ном}$
- быстродействие 5-10 мс
- уставки защиты на отключение при $U < 0,8 U_{ном}$, $t_{откл} = 50 \text{ мс}$

При близких КЗ СТАТКОМ отключается.

При удаленных КЗ ($U_{ост} > 0,8 U_{ном}$) напряжение на выходе инверторного преобразователя ВЭУ повышается с $0,806 U_{ном}$ до $0,857 U_{ном}$ (на 6,3 %).

Стоимость СТАТКОМа, без учета затрат на проектные, монтажные и наладочные работы, составляет $\approx 150 \text{ млн. руб. с НДС}$.

Установка ТОР в сети 35 кВ ВЭС до повышающего трансформатора



Технические характеристики ТОР:

- $U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$
- $I_{\text{ном}} = 300 \text{ А}$
- $X_{\text{ТОР}} = 7,5 \text{ Ом}$

При близких трехфазных КЗ напряжение на выходе инверторных преобразователей ВЭУ повышается с $0,08 U_{\text{ном}}$ до $0,25 U_{\text{ном}}$, что особенно важно.

Стоимость ТОР ($X_{\text{ТОР}} = 7,5 \text{ Ом}$), без учета затрат на проектные, монтажные и наладочные работы, составляет $\approx 25 \text{ млн. руб. с НДС}$.

Рис. 4. Схема присоединения ТОР к сети 35 кВ ВЭС

Результаты расчетов переходных процессов при КЗ в прилегающей сети

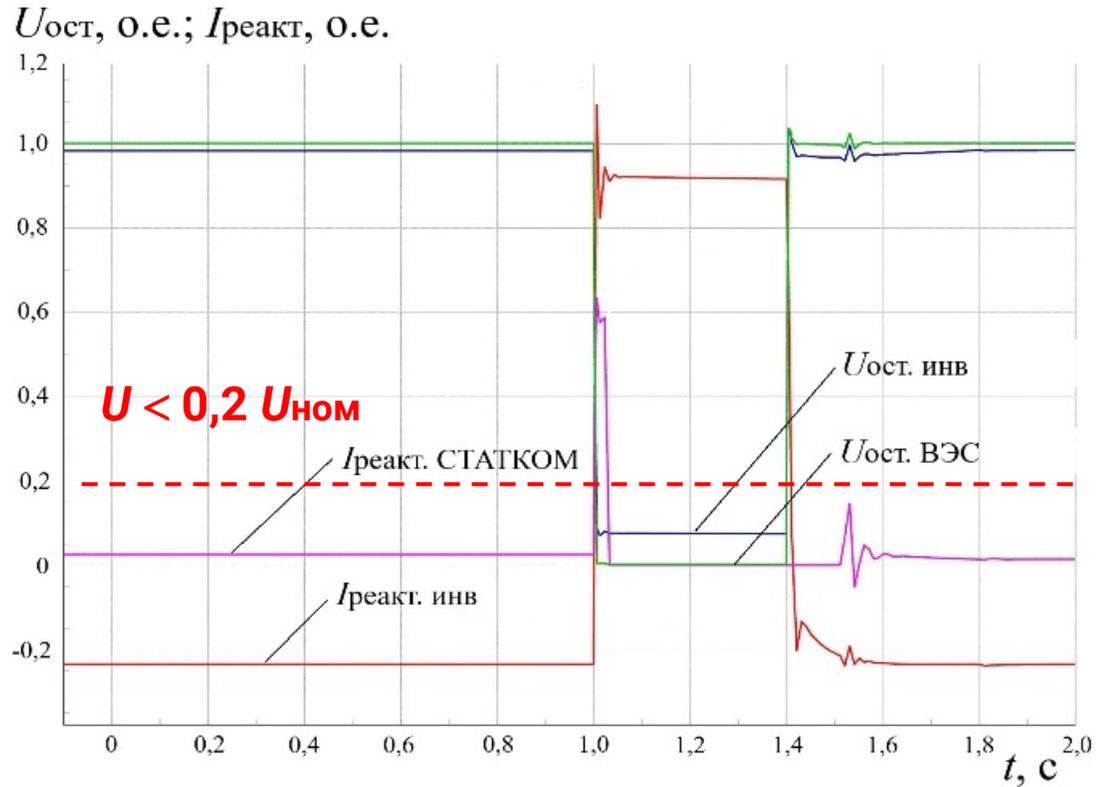


Рис. 5. Переходный процесс при 3-х фазном КЗ (СТАТКОМ)

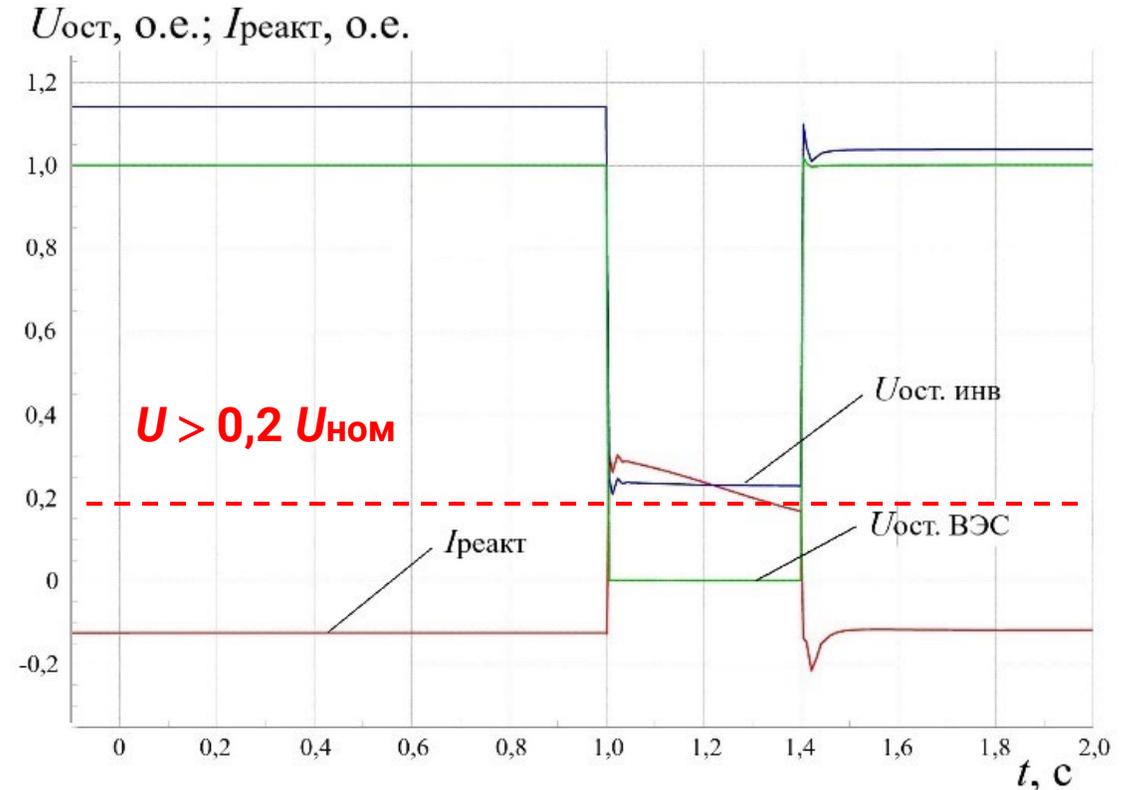


Рис. 6. Переходный процесс при 3-х фазном КЗ (TOP)

Расчеты переходных процессов были выполнены в ПК PowerFactory при трехфазном, двухфазном и однофазном КЗ на воздушной ЛЭП 110 кВ (вблизи шин ПС 220/110 кВ) с ее отключением

Эффективность установки ТОР на ВЭС

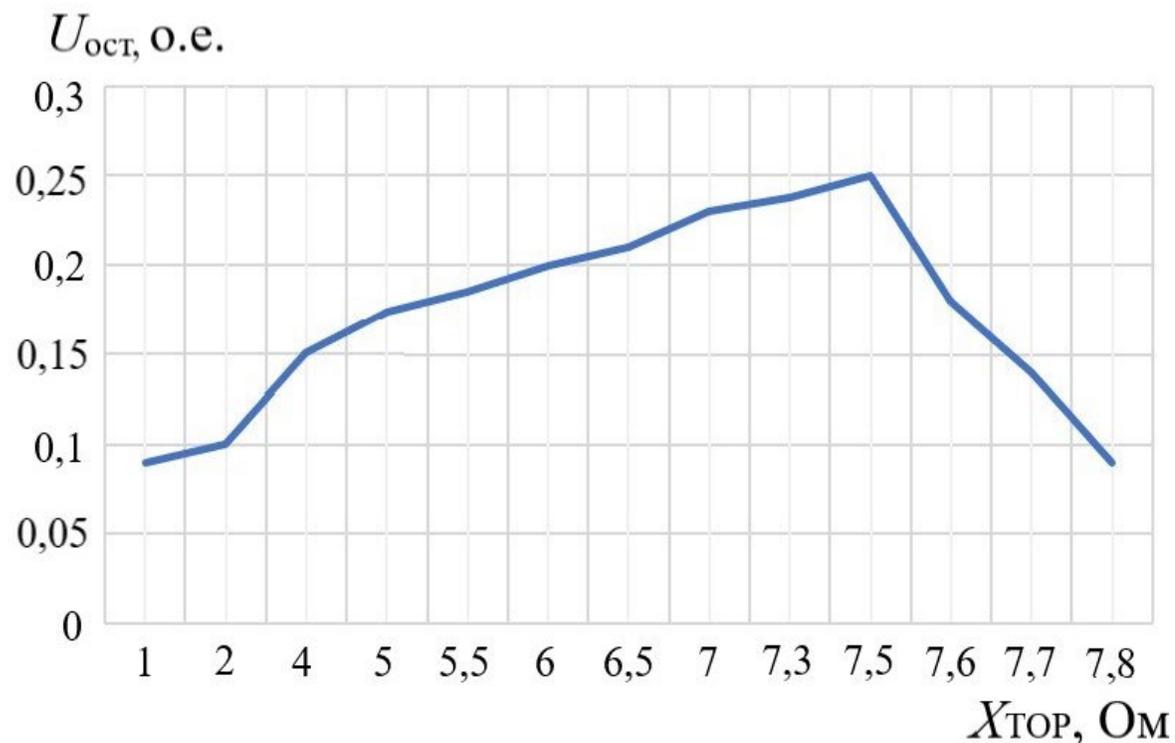


Рис. 7. График зависимости $U_{ост}$ на выходе инверторных преобразователей ВЭУ от величины $X_{ТОР}$

Установка ТОР позволила увеличить величину $U_{ост}$ на выходе инверторных преобразователей ВЭУ при длительности КЗ 0,8 – 0,9 с:

- с $0,08 U_{ном}$ до $0,25 U_{ном}$ (увеличение на 213 %) при трехфазном КЗ;
- с $0,4 U_{ном}$ до $0,6 U_{ном}$ (увеличение на 50 %) при двухфазном КЗ;
- с $0,68 U_{ном}$ до $0,76 U_{ном}$ (увеличение на 12 %) при однофазном КЗ

Многовариантные результаты расчетов показали, что наилучший результат получился в случае применения ТОР с $X_{ТОР} = 7,5 \text{ Ом}$.

Для каждого конкретного случая присоединения ВЭС к распределительной сети параметры ТОР необходимо определять индивидуально на основании результатов расчетов режимов.

Повышение $U_{ост}$ на выходе инверторных преобразователей ВЭУ (ТОР)

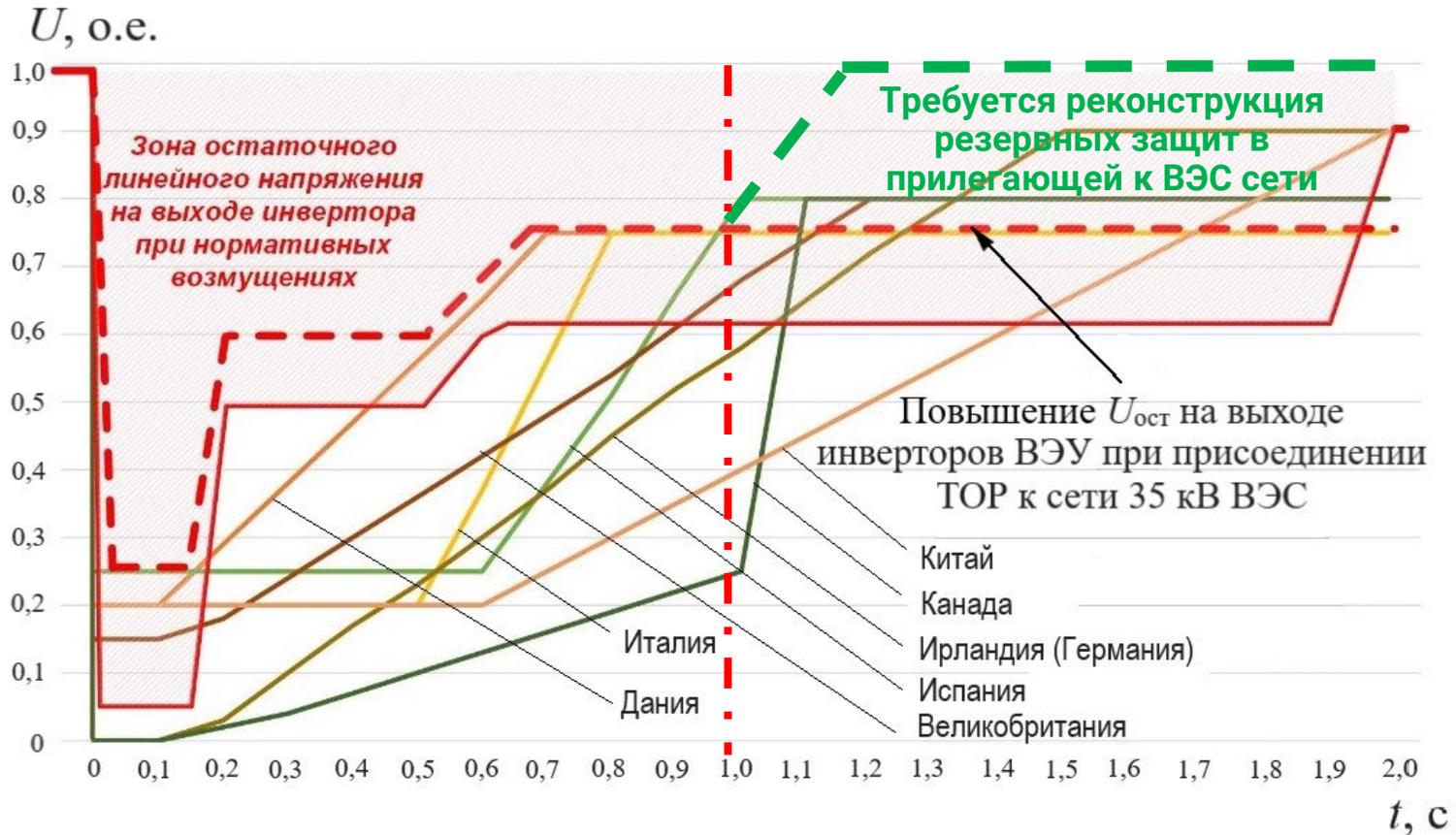


Рис. 8. График зависимости $U_{ост}$ на выходе инверторных преобразователей ВЭУ (красная пунктирная линия) при присоединении ТОР к сети напряжением 35 кВ ВЭС

Проект ВЭС мощностью 15 МВт с ВЭУ IV типа (6 ед. по 2,5 МВт) широко применяется в России, в т.ч. с масштабированием за счет разного количества параллельных групп ВЭУ.

Присоединение ТОР к сети 35 кВ ВЭС позволяет при трехфазном КЗ обеспечить устойчивую работу ВЭУ с функцией LVRT, настроенной в соответствии с требованиями сетевых кодексов Италии, Дании, Китая, Канады, Ирландии (Германии), Испании, Великобритании.

Изменение аппаратной части инверторных преобразователей ВЭУ

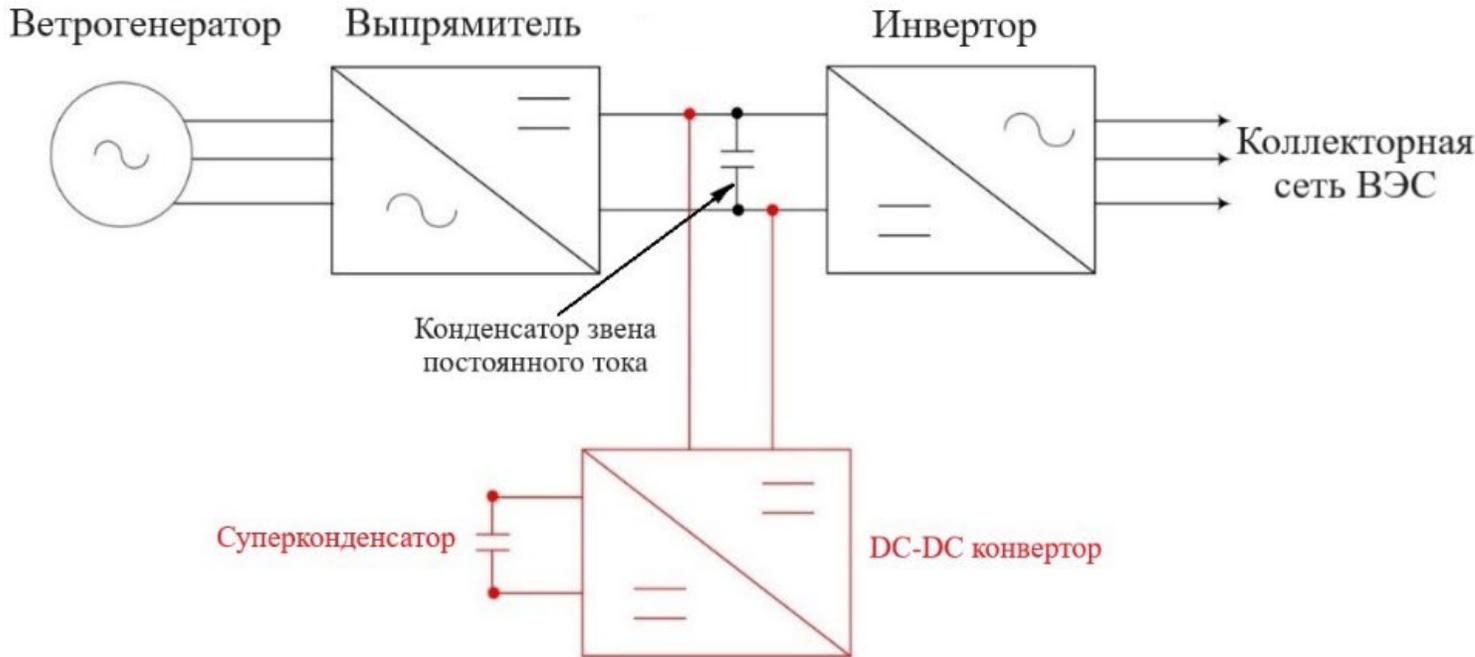


Рис. 9. Упрощенная схема подключения суперконденсатора с DC-DC конвертором к звену постоянного тока инвертора ВЭУ

Для поддержания напряжения в звене постоянного тока при КЗ в сети нужно установить дополнительную емкость 15 000 Ф в виде суперконденсатора (в 6 раз больше имеющейся).

Подключить суперконденсатор (2,7 В) к звену постоянного тока (800 В) возможно через DC-DC конвертор.

Стоимость 5 суперконденсаторов фирмы Maxwell 2.7V 3000 F составляет ≈ 125 тыс. руб., а DC-DC конвертора 2,7/800 В мощностью 10 кВт ≈ 100 тыс. руб., что на всю ВЭС составит 1350 тыс. руб. с учетом НДС (дешевле стоимости ТОР \approx в 20 раз).

Выводы

При нормативных возмущениях в прилегающей к ВЭС распределительной сети ВЭУ IV типа отключаются, что приводит к набросам нагрузки на генерирующие установки традиционных электростанций, ЛЭП и силовые трансформаторы, утяжеляя аварию.

Проведен анализ различных технических решения для повышения величины остаточного напряжения на выходах инверторных преобразователей ВЭУ при нормативных возмущениях в прилегающей сети для предотвращения их излишних отключений.

Предложены групповые и индивидуальные решения, предусматривающие присоединение к сети напряжением 35 кВ ВЭС СТАТКОМа и токоограничивающего реактора, имеющие различную эффективность и стоимостные показатели.

В качестве индивидуального решения предложено внесение изменений в аппаратную часть инверторных преобразователей ВЭУ, с установкой блока суперконденсаторов и DC-DC конвертора.

Эффективным с технико-экономической точки зрения является внесение изменений в аппаратную часть инверторных преобразователей ВЭУ для корректировки рабочего диапазона функции LVRT с целью предотвращения излишних отключений ВЭУ (не требуется проведение масштабной реконструкции устройств РЗ в прилегающей распределительной сети).

Спасибо за внимание!

