

# 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

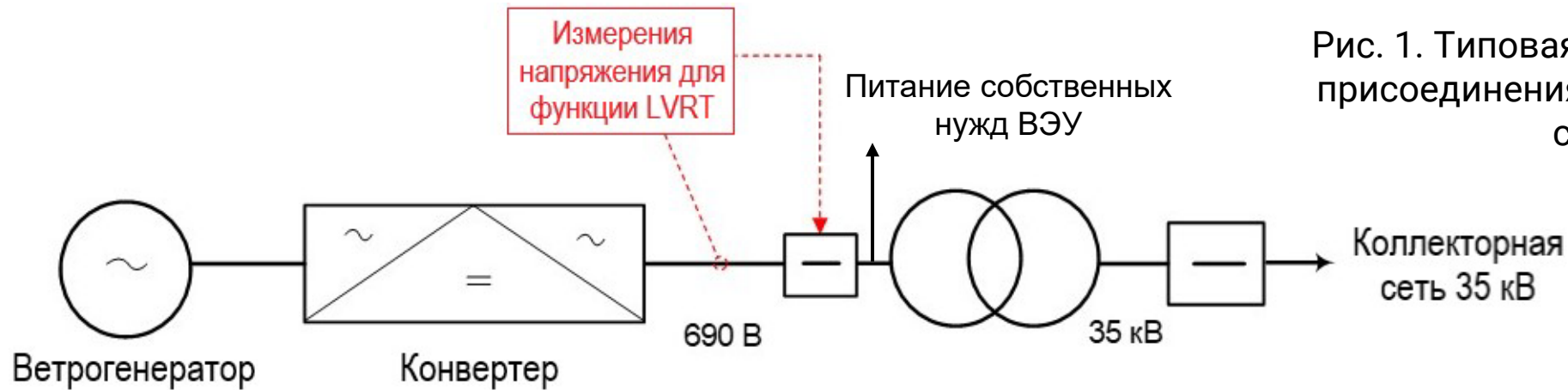


Рис. 1. Типовая однолинейная схема присоединения ВЭУ к коллекторной сети ВЭС

- 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

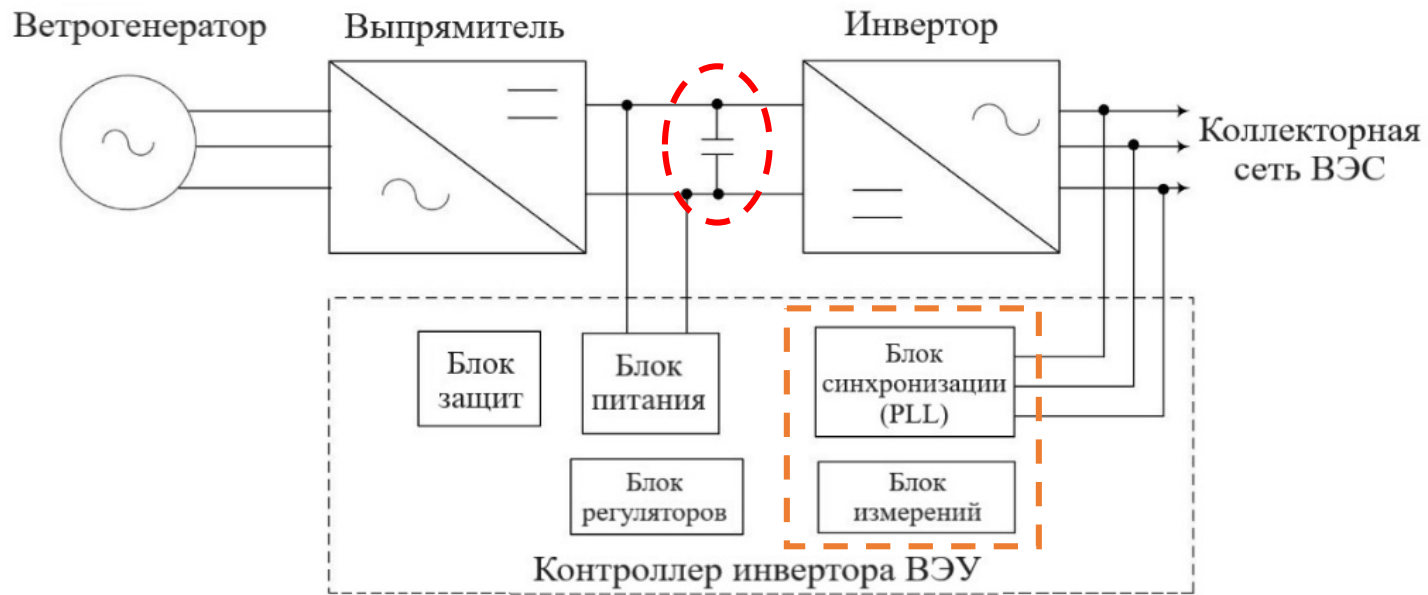


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема сетевого инверторного преобразователя ВЭУ IV типа

## 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

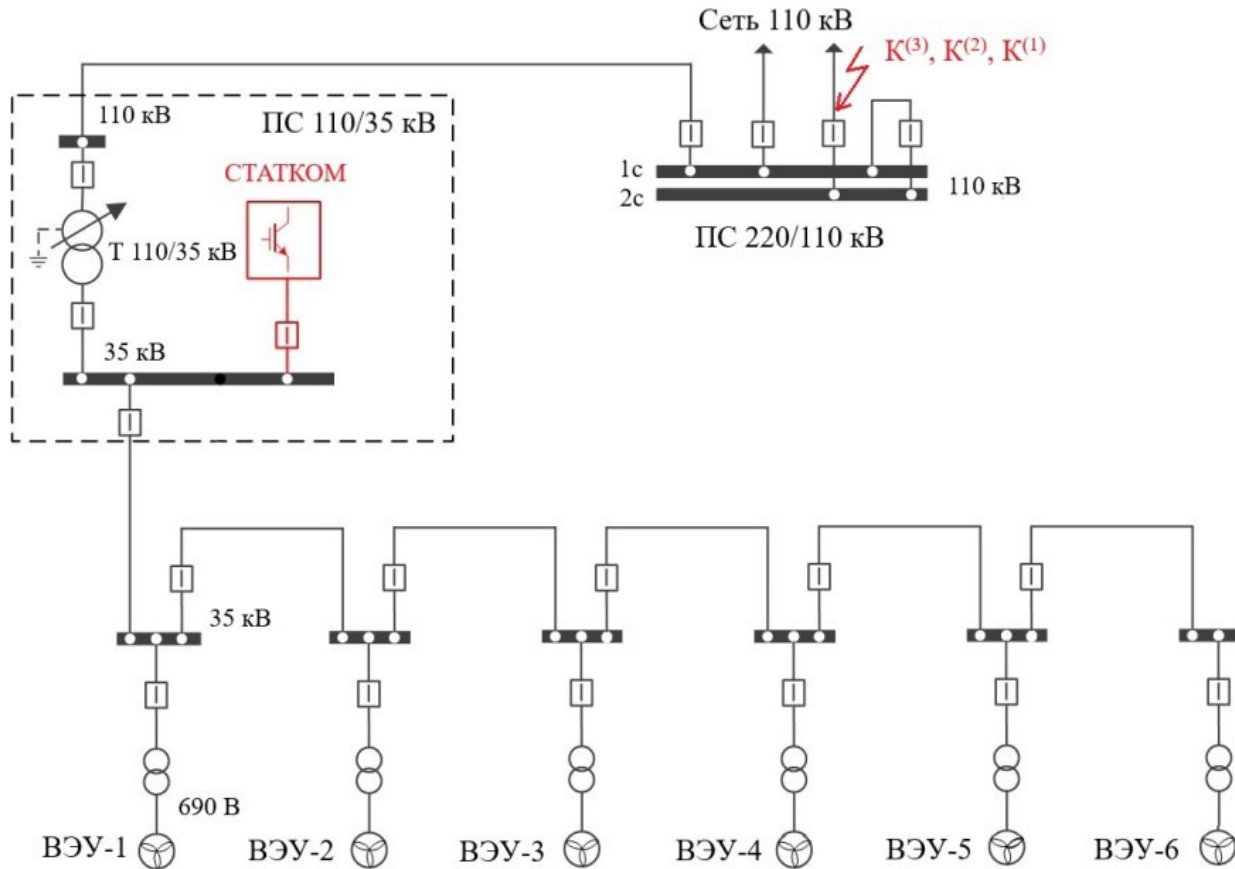


Рис. 3. Схема присоединения СТАТКОМа к сети 35 кВ ВЭС

## Технические характеристики СТАТКОМ:

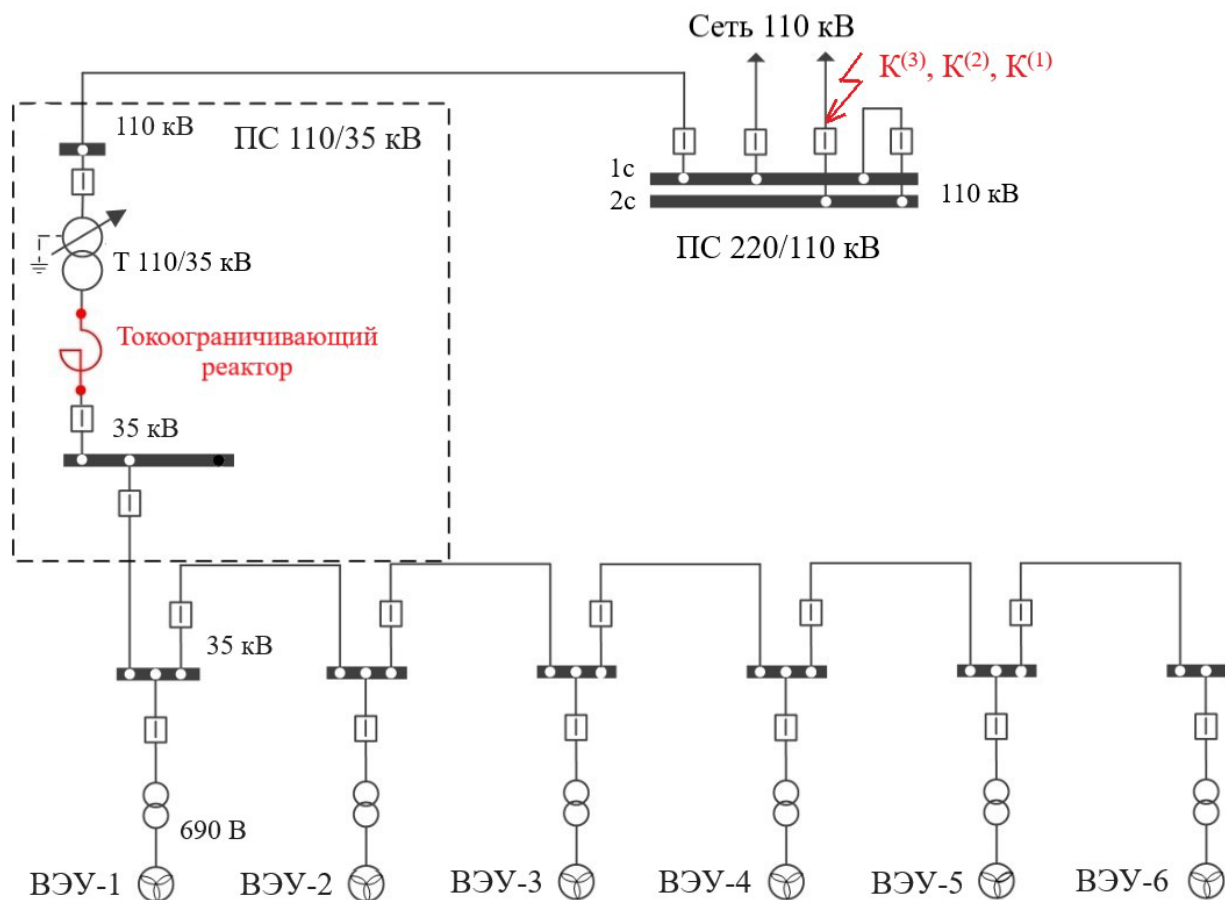
- $U_{ном} = 35 \text{ кВ}$
- $S_{ном} = 10 \text{ Мвар}$
- диапазон рабочих напряжений  $0,8 U_{ном} \leq U_{раб} \leq 1,2 U_{ном}$
- быстродействие 5-10 мс
- уставки защиты на отключение при  $U < 0,8 U_{ном}$ ,  $t_{откл} = 50 \text{ мс}$

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

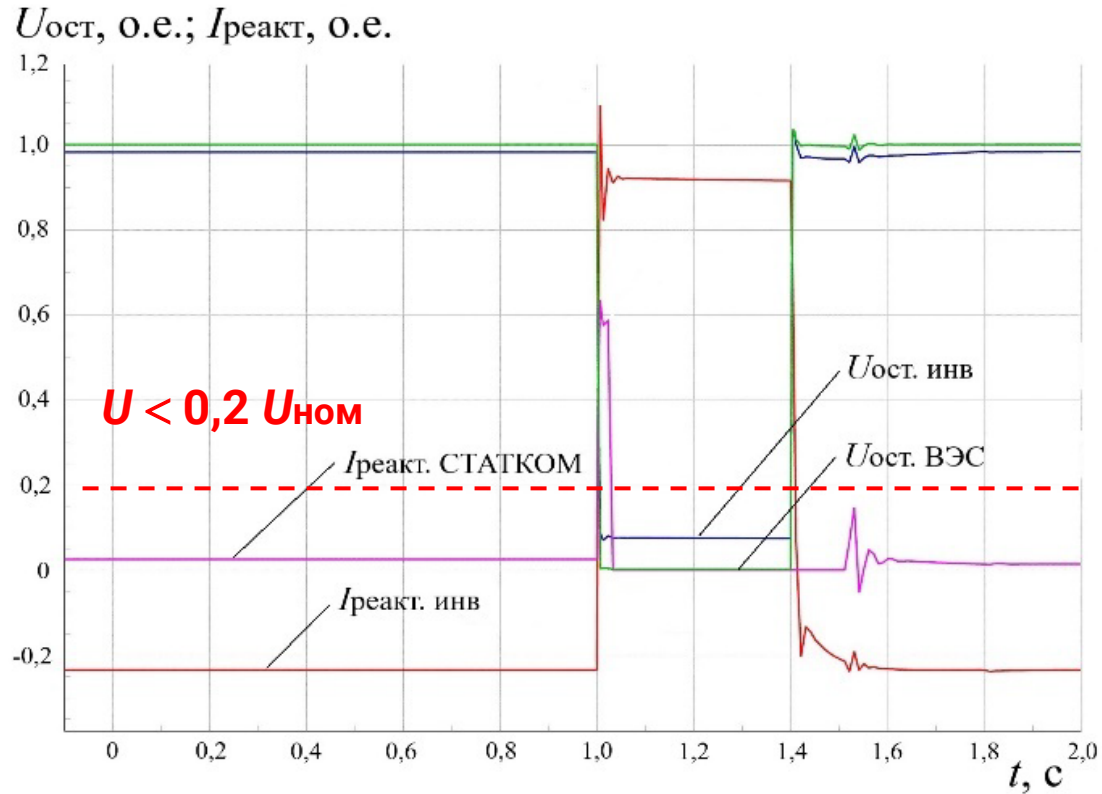


Рис. 5. Переходный процесс при 3-х фазном КЗ (СТАТКОМ)

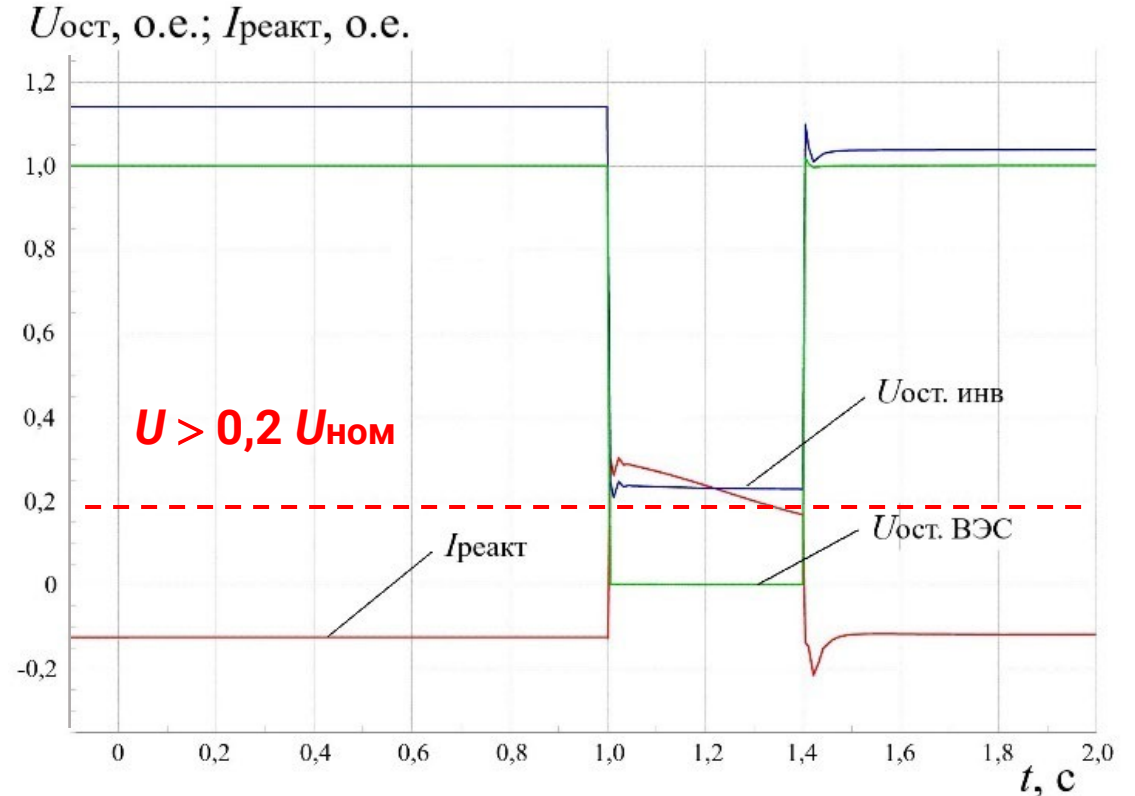


Рис. 6. Переходный процесс при 3-х фазном КЗ (ТОР)

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

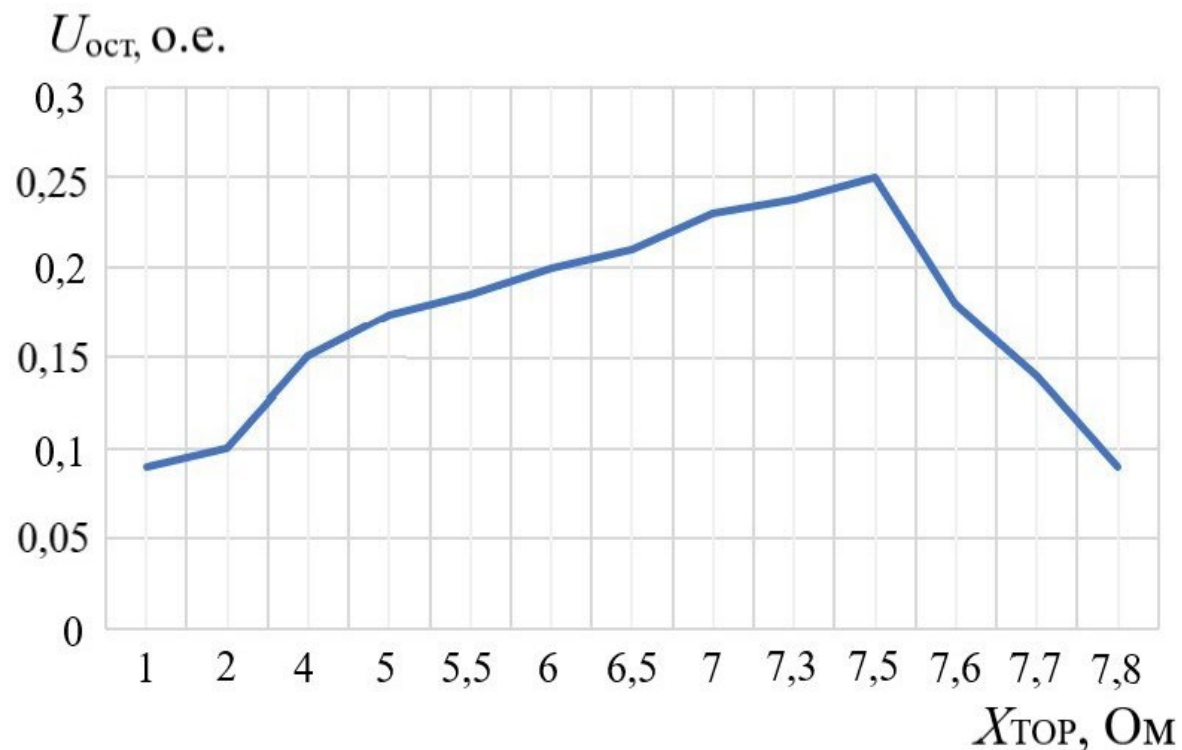


Рис. 7. График зависимости  $U_{ост}$  на выходе инверторных преобразователей ВЭУ от величины  $X_{ТОР}$

**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)

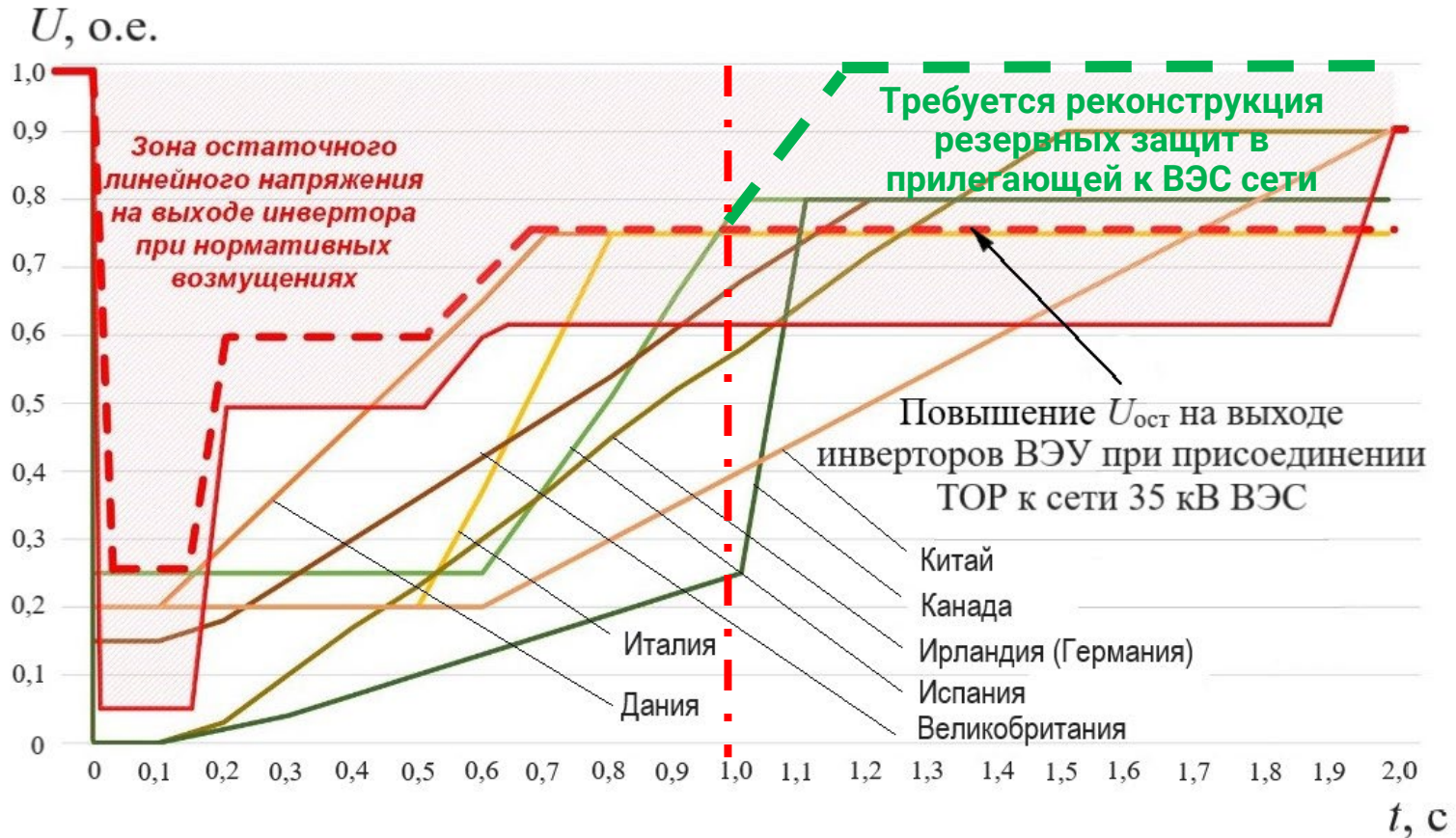


Рис. 8. График зависимости  $U_{ост}$  на выходе инверторных преобразователей ВЭУ (красная пунктирная линия) при присоединении ТОР к сети напряжением 35 кВ ВЭС

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

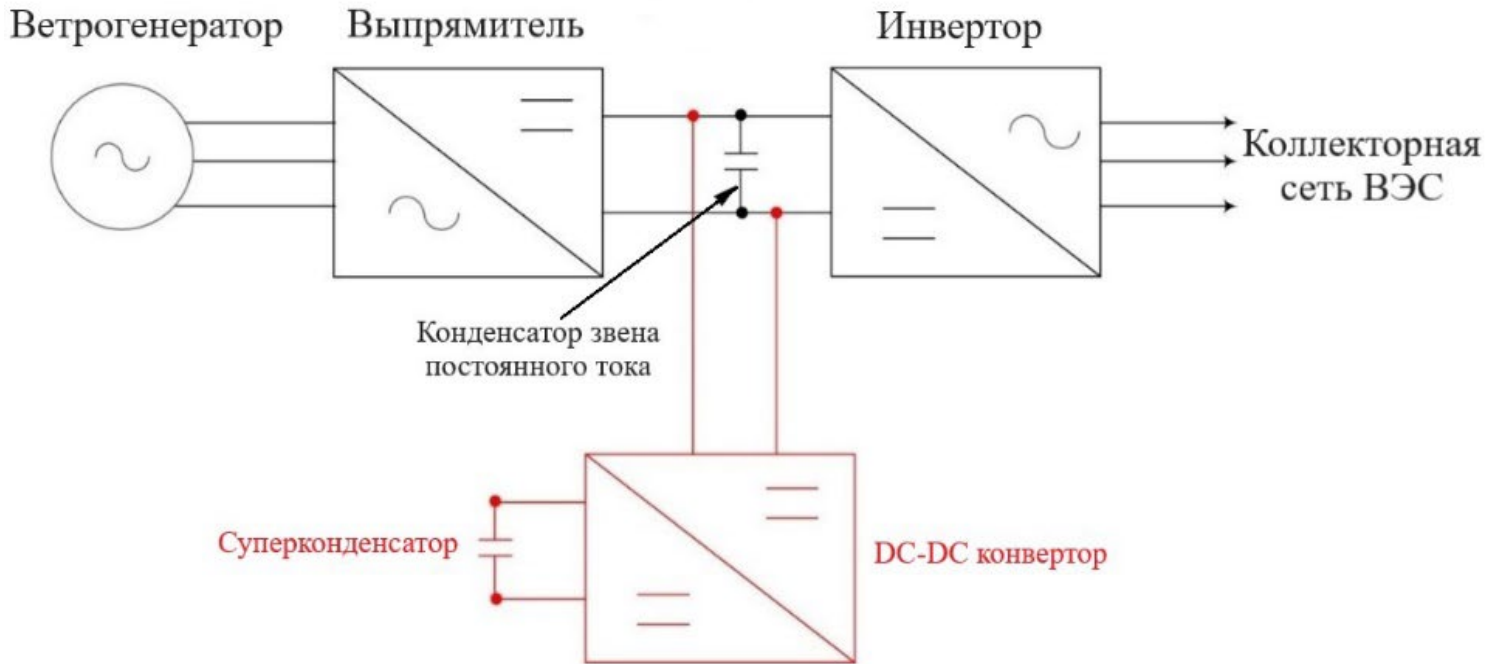


Рис. 9. Упрощенная схема подключения суперконденсатора с DC-DC конвертором к звену постоянного тока инвертора ВЭУ

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  $\approx 125$  тыс. руб., а DC-DC конвертора 2,7/800 В мощностью 10 кВт  $\approx 100$  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!**

