



IX Международная
научно-техническая конференция

«Развитие и повышение надежности
распределительных электрических сетей»

ОРГАНИЗАТОРЫ



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



2024 / 3–4 июля / Москва

О подходах к согласованию схем выдачи мощности ветровых электростанций на основе оценки их влияния на показатели качества электроэнергии в точке присоединения

Илюшин Павел Владимирович
Д.т.н., руководитель Центра
интеллектуальных
электроэнергетических систем и
распределенной энергетики
ИНЭИ РАН

Существующее положение и перспективные планы

За последние годы в России по программе ДПМ ВИЭ 1.0 были введены в эксплуатацию крупные ветровые электростанции (ВЭС) с суммарной установленной мощностью 2167,69 МВт.

Схемой и программой развития ЕЭС России на период 2023-2028 гг. запланирован ввод не менее 20 ВЭС мощностью от 15 до 304 МВт с суммарной установленной мощностью более 2,3 ГВт. Часть из них подключается к распределительным сетям среднего и высокого напряжения.

Параметры схемы выдачи мощности (СВМ) ВЭС, подлежащей обязательному согласованию с распределительной сетевой компанией, оказывают влияние на возможность возникновения резонансных явлений на высоких частотах в точке их присоединения.

При согласовании СВМ ВЭС следует контролировать наличие и содержание раздела, включающего результаты анализа влияния ВЭС на показатели качества электроэнергии – ПКЭЭ (несимметрия, несинусоидальность) в точке присоединения к распределительной сети.

Большинство программных комплексов расчетов электрических режимов, используемых в проектных организациях, не имеет возможностей для проведения такого вида анализа.

Причины возникновения резонанса напряжений

На современных ВЭС широко применяются ветроэнергетические установки (ВЭУ) IV типа, присоединяемые к коллекторной сети через инверторные преобразователи. В контроллерах ВЭУ имеются индивидуальные контуры управления, которые совокупно влияют на параметры электрического режима, в том числе гармонический состав вырабатываемого электрического тока.

Величина инъекции гармонических составляющих тока в распределительную сеть напрямую зависит от скорости изменения (частоты) параметров в контурах управления контроллеров ВЭУ.

Присоединение ВЭС к распределительным сетям может приводить к возникновению резонанса напряжений на высоких частотах, что может сопровождаться пробоем изоляции в электротехническом оборудовании и КЛ. Кроме того, это вызывает дополнительный нагрев и потери электроэнергии в ЛЭП и электротехническом оборудовании, создание электромагнитных помех в системах автоматического управления, устройствах релейной защиты и автоматики и др.

В мировой практике известны случаи возникновения резонансных явлений в элементах СВМ ВЭС, что обусловлено совпадением собственных резонансных частот длинных подводных КЛ, имеющих большие поперечные проводимости, с гармоническими составляющими токов ВЭУ.

В докладе рассмотрены возможности и условия возникновения резонансных явлений на высоких частотах в распределительных сетях 110 кВ и 35 кВ при присоединении к ним ВЭС на примере расчетной модели реальной энергосистемы в программном комплексе PowerFactory.

Скорость изменения (частота) параметров в контурах управления контроллеров ВЭУ

ВЭУ IV типа – это сложный комплекс взаимосвязанного оборудования (ветротурбина, ветрогенератор, выпрямитель, инверторный преобразователь и др.), управляемый несколькими контроллерами, взаимодействующими по определенным закономерностям.

Медленные изменения	Субсинхронные колебания		Средние изменения	Быстрые изменения
0,1-0,5 Гц	1-2 Гц	5-7 Гц	7,5-15 кГц	20 кГц
Управление поворотом лопастей для оптимального угла атаки и ограничения мощности при больших скоростях ветра	Эффект «затенения» башни	Порывы ветра, вызывающие субсинхронные колебания	Управление режимом работы звена постоянного тока ВЭУ	Широтно-импульсная модуляция в инверторном преобразователе; управление фазовой автоподстройкой частоты; управление синхронизацией

В контроллерах ВЭУ имеются индивидуальные контуры управления, влияющие на величину инжекции гармонических составляющих тока, которые напрямую зависят от скорости изменения (частоты) параметров в этих контурах.

Особенности ВЭУ IV типа инверторного включения

В стандарте IEEE 519-2014 для снижения влияния гармонических составляющих на прилегающую сеть приведены требования к заводам-изготовителям ВЭУ по установке RC и RLC фильтров на выходе ВЭУ

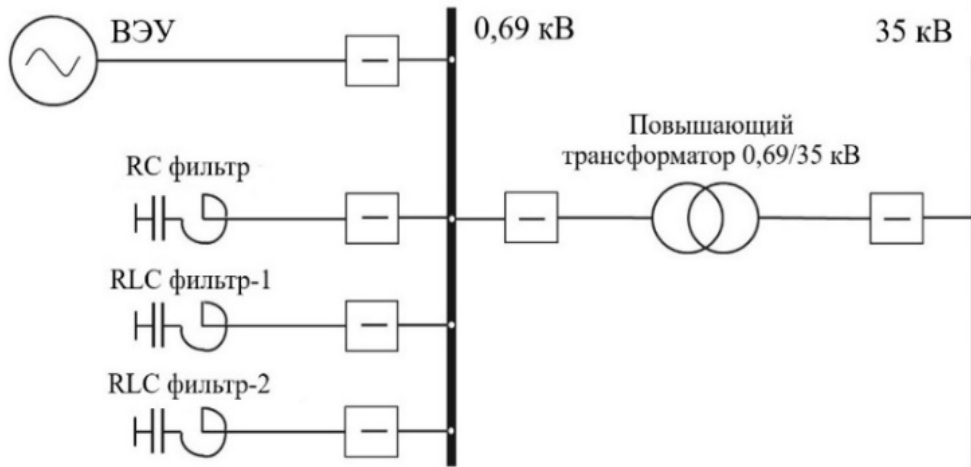


Рис. 1. Схема подключения ФКУ к ВЭУ

Величины гармонических составляющих в токе не превышают предельных значений для ВЭУ мощностью 3,47 МВт при отношениях $I_{к3}$ к $I_{ном}$ ВЭУ в диапазоне от 50 до 100 для напряжений 120 В – 69 кВ:

- 6,7 А с 3 по 9 гармоники;
- 3 А с 11 по 15 гармоники;
- 2,68 А с 17 по 21 гармоники;
- 1 А с 23 по 33 гармоники;
- 0,5 А с 35 по 40 гармоники



Рис. 2. Результаты измерений гармонических составляющих в токе ВЭУ на стороне 35 кВ повышающего трансформатора 0,69/35 кВ

Описание расчетных моделей сети 110 кВ и 35 кВ с ВЭС

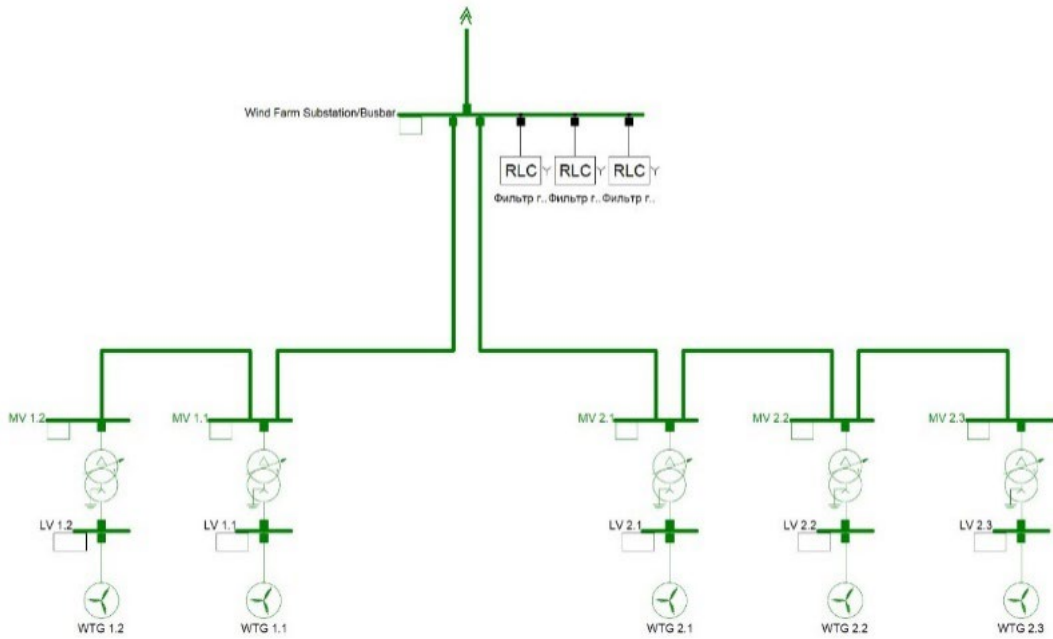


Рис. 3. Расчетная модель коллекторной сети ВЭС мощностью 17,35 МВт с выдачей мощности в сеть 35 кВ

Расчетная модель содержит:

920 узлов, 53 генератора, 225 ЛЭП напряжением 35 кВ и выше, 227 силовых трансформаторов и автотрансформаторов (длина ВЛ 110 кВ от ВЭС до ПС 220/110 кВ в диапазоне 10 – 120 км; длина ВЛ 35 кВ от ВЭС до ПС 35/10 кВ в диапазоне 1 – 30 км)



Рис. 4. Расчетная модель коллекторной сети ВЭС мощностью 90 МВт с интеграцией в сеть 110 кВ

Присоединение ВЭС мощностью 90 МВт к сети 110 кВ

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, % U_1

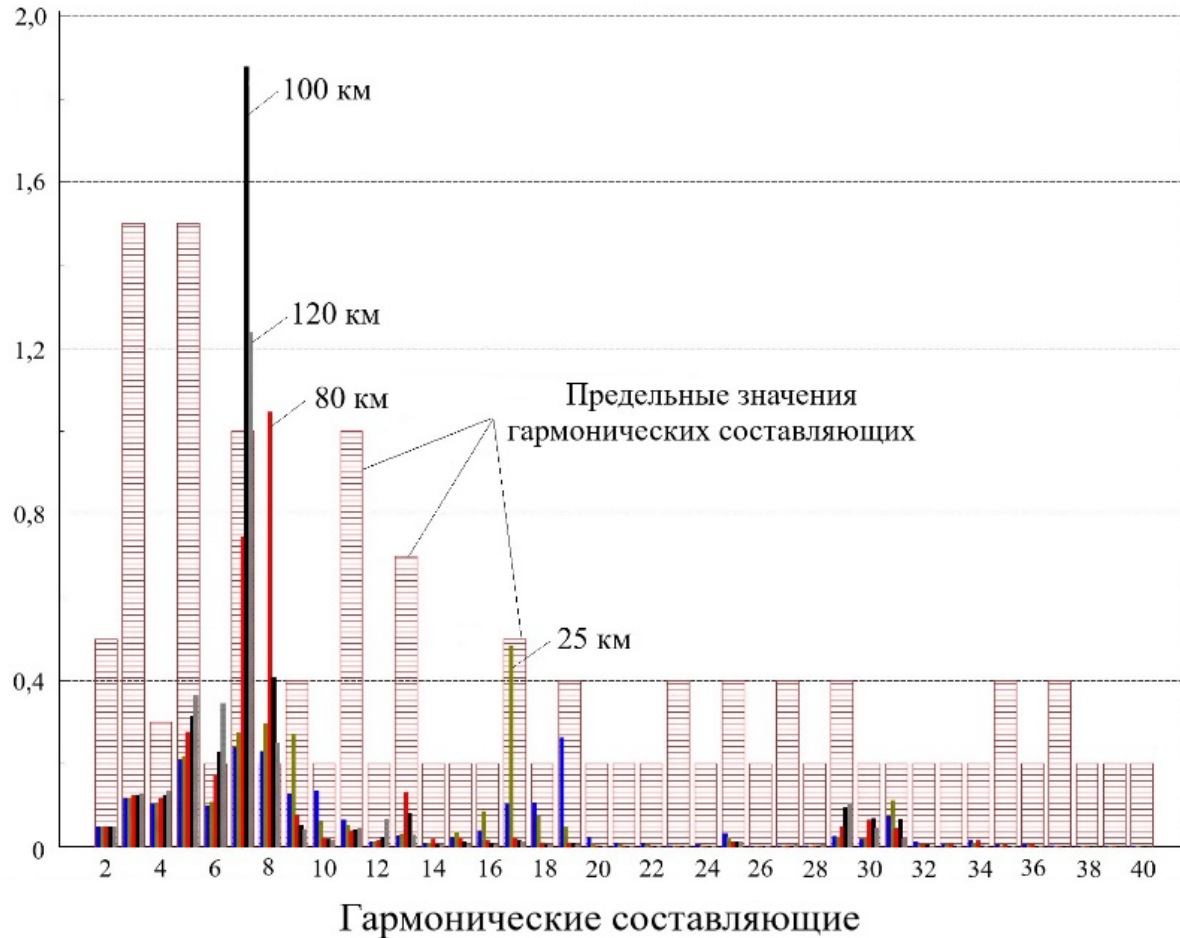


Рис. 5. Результаты расчетов ПКЭЭ на шинах 110 кВ ПС 220/110 кВ (в точке присоединения ВЭС к сети) при различной длине воздушной ЛЭП 110 кВ

При длине ВЛ 110 кВ около 80-100 км происходит совпадение собственной резонансной частоты элементов СВМ с 7-й и 8-й гармоническими составляющими токов ВЭУ, что провоцирует возникновение резонансных явлений, сопровождаемых превышением амплитуды напряжения выше допустимых в ГОСТ Р 32144-2013 значений.

Собственные резонансные частоты элементов СВМ ВЭС

Сопротивление, Ом

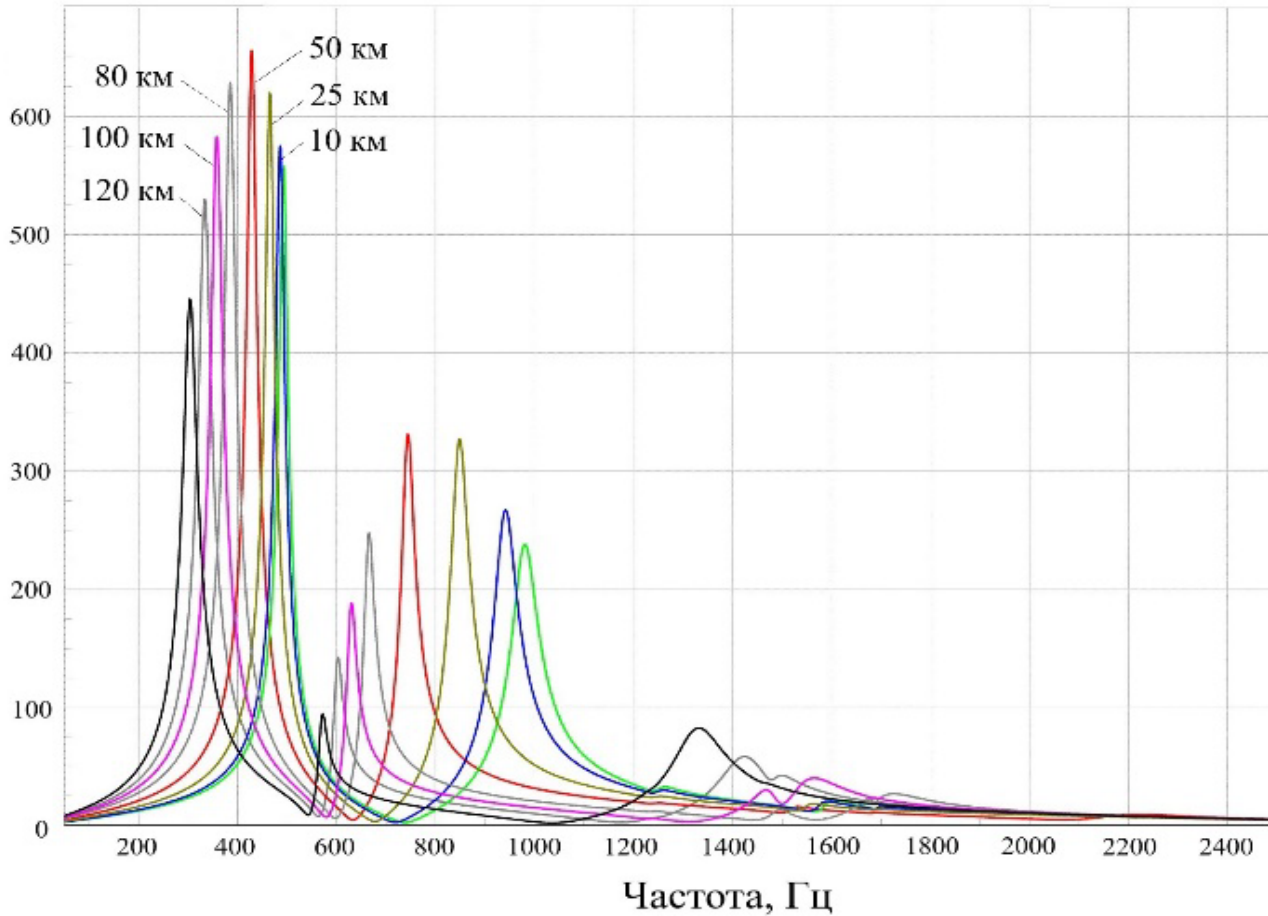


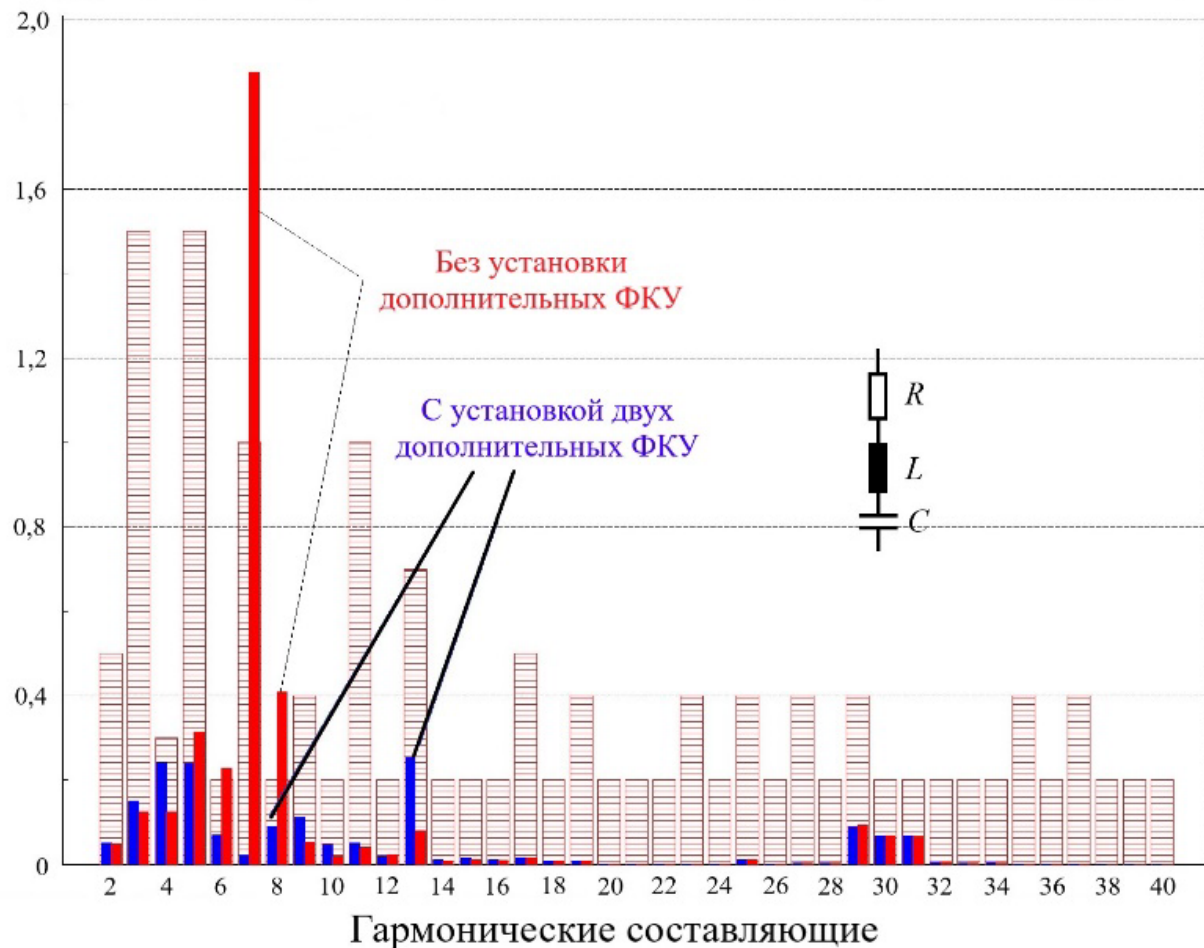
Рис. 6. Результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик (собственных резонансных частот) элементов СВМ ВЭС при различной длине ВЛ 110 кВ

В России требования к качеству электроэнергии, изложенные в ГОСТ 32144-2013, предъявляются только к напряжению, что позволяет присоединять к сети ВЭС с различным спектром гармонических составляющих в токе, если это не вызывает выхода величин гармонических составляющих напряжений и ПКЭЭ в точке присоединения за установленные пределы.

С увеличением длины ВЛ 110 кВ происходит смещение амплитудно-частотных характеристик (собственных резонансных частот) элементов СВМ ВЭС в сторону снижения частоты с 500 Гц при 10 км до 250 Гц при 100 км.

Эффективность установки 2-х ФКУ на ВЭС 90 МВт

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, % U_1



Для предотвращения резонансных явлений предложено установить два дополнительных ФКУ на шинах 35 кВ ВЭС со следующими техническими характеристиками:

ФКУ-1 на 350 Гц:

$S_{\text{ном}} = 2 \text{ МВар}$; $C = 5,08 \text{ мкФ}$;
 $L = 43,1 \text{ мГн}$; $R = 1,84 \text{ Ом}$.

ФКУ-2 на 250 Гц:

$S_{\text{ном}} = 0,5 \text{ МВар}$; $C = 1,24 \text{ мкФ}$;
 $L = 353,8 \text{ мГн}$; $R = 10,6 \text{ Ом}$.

Рис. 7. Результаты расчетов ПКЭЭ на шинах 110 кВ ПС 220/110 кВ при установке двух ФКУ на шинах 35 кВ ВЭС

Эффективность установки 3-х ФКУ на ВЭС 17,35 МВт

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, % U_1

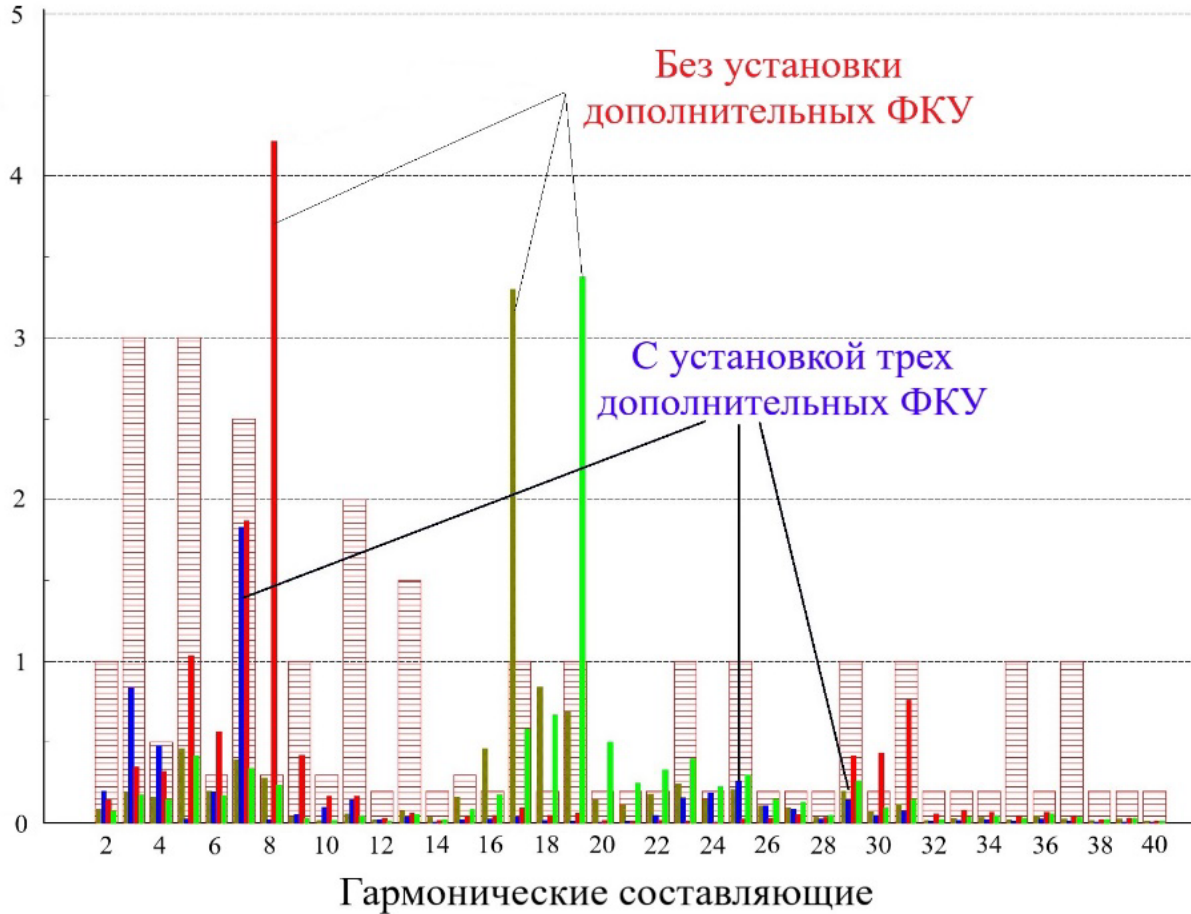


Рис. 8. Результаты расчетов ПКЭЭ на шинах 35 кВ ПС 35/110 кВ при установке трех ФКУ на шинах 35 кВ ВЭС

Для предотвращения резонансных явлений предложено установить три дополнительных ФКУ на шинах 35 кВ ВЭС со следующими техническими характеристиками:

ФКУ-1 на 400 Гц;
 $S_{\text{НОМ}} = 0,8 \text{ МВар}; C = 2,05 \text{ мкФ};$
 $L = 77,4 \text{ мГн}; R = 3,9 \text{ Ом}.$

ФКУ-2 на 250 Гц;
 $S_{\text{НОМ}} = 3,8 \text{ МВар}; C = 9,5 \text{ мкФ};$
 $L = 42,8 \text{ мГн}; R = 1,3 \text{ Ом}.$

ФКУ-3 (широкополосный) на 850 Гц:
 $S_{\text{НОМ}} = 1 \text{ МВар}; C = 2,5 \text{ мкФ};$
 $L = 13,5 \text{ мГн}; R_s = 5,1 \text{ Ом}; R_p = 20 \text{ Ом}.$

Примеры реализации эффективных технических решений

В докладе приведены результаты расчетов ПКЭЭ в точке присоединения 2-х ВЭС к реальным распределительным сетям напряжением 110 кВ и 35 кВ, который показал:

- ❑ установка ФКУ производителями ВЭУ, в соответствии с требованиями стандарта IEEE 519-2014, не исключает риска возникновения резонансных явлений на высоких частотах как коллекторной сети ВЭС, так и в прилегающей распределительной сети;
- ❑ при длине ВЛ в схеме выдачи мощности ВЭС более 60 км для сетей 110 кВ и более 12 км для сетей 35 кВ существуют риски возникновения резонансных явлений на 7, 8 гармониках, что приведет к превышению уровня гармонических составляющих напряжения в точке присоединения ВЭС над нормируемым в ГОСТ 32144-2013;
- ❑ уровень гармонических составляющих напряжения в точке присоединении ВЭС к сети 35 кВ имеет большие величины, чем в сети 110 кВ, что обусловлено наличием в СВМ повышающего силового трансформатора 35/110 кВ, выполняющего роль фильтра высоких гармоник;
- ❑ наиболее эффективным техническим решением для снижения уровня гармонических составляющих напряжения в коллекторной сети ВЭС и прилегающей сети при длине ВЛ 110 кВ более 60 км и ВЛ 35 кВ более 12 км является установка дополнительных ФКУ на шинах 35 кВ ВЭС.

Основные выводы

При согласовании СВМ ВЭС со стороны электросетевой компанией требуется проводить детальный анализ раздела проекта, содержащего результаты анализа влияния ВЭС на ПКЭЭ в точке присоединения к сети, а также каким образом данный анализ был выполнен.

В проектах СВМ должны быть представлены результаты расчетов ПКЭЭ до 40-й гармоники и доказано, что в точке присоединения ВЭС к сети не возникает резонансных явлений, либо приняты проектные решения, позволяющие предотвратить возникновение резонанса напряжений.

При недостаточной эффективности ФКУ, установленных на ВЭУ заводом-изготовителем, для предотвращения резонансных явлений необходимо предусматривать установку дополнительных ФКУ на шинах ВЭС и расчетами ПКЭЭ обосновать эффективность выбора их технических характеристик.

Реализация предложенного подхода позволит предотвратить возникновение аварий с повреждением электротехнического оборудования и кабельных линий электропередачи в распределительных сетях, в том числе с длительными сроками эксплуатации.

Спасибо за внимание!