ЗАВИСИМОСТЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ВИДА ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ И СВОЙСТВ ПРИМЫКАЮЩЕЙ СЕТИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

АВТОРЫ:

Н.Г. ЛОЗИНОВА,
К.Т.Н.,
ОАО «НИИ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ»

Е.Ю. ЗМАЗНОВ,
ОАО «НИИ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ»

Н.С. ЯРОХ,
ОАО «НИИ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ»

Вставка постоянного тока «Выборгская» введена в эксплуатацию в 1984 г. Она обеспечивает коммерческую передачу электроэнергии из СССР в Финляндию. Контракт требует очень жесткого нормирования высших гармоник в сети. Обусловлено это требование крайне отрицательными последствиями от таких гармоник, а также тем, что линии электропередачи, отходящие от вставки, примыкают к району с обширной сетью воздушных линий связи.

Ключевые слова: качество электроэнергии (КЭ); передача постоянного тока; нормирование гармоник; ток короны; фильтрация; резонансные усиления гармоник в сети.

Диспетчерский пульт Выборгской подстанции

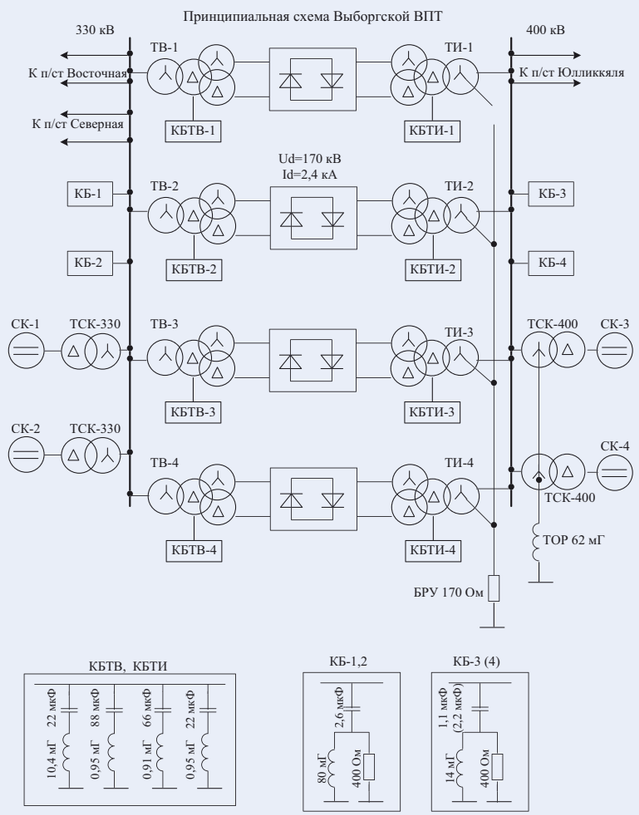
Предварительные результаты данного исследования были опубликованы в «Руководящих материалах по проектированию и эксплуатации электрических сетей (РУМ)» № 6 за 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема снабжения потребителей электроэнергией, соответствующей национальному стандарту (ГОСТ Р 32144-2013), — важнейшая задача развития отрасли. Во многом это связано с внедрением в сети высокотехнологичного оборудования, предъявляющего повышенные требования к напряжению сети.

Однако, как показывают многочисленные исследования, проблема качества электроэнергии (КЭ) является многогранной, не имеющей однозначных решений и рекомендаций. Следует отметить, что упомянутый стандарт охватывает диапазон напряжений до 220 кВ (исключая 220 кВ). Таким образом, в стандарте не учитываются мощные источники искажения, а именно: ППТ и ВПТ мощностью в сотни мегаватт, подключаемые к сетям 220 кВ и выше. Подобного рода объекты, являясь единичными, требуют индивидуального подхода к нормированию КЭ.

СХЕМА ПС «ВЫБОРГСКАЯ» В 1989 Г.



БРУ — бетэловое резисторное устройство, СК — синхронный компенсатор, ТСК — трансформатор синхронного компенсатора, ТОР — токоограничивающий реактор, КБ — конденсаторная батарея, ТВ — трансформатор выпрямителя, ТИ — трансформатор инвертора, КБТВ — конденсаторная батарея трансформатора выпрямителя, КБТИ — конденсаторная батарея трансформатора инвертора

Рис. 1

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫБОРГСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА В ЧАСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАРМОНИК

Рассмотрим проблемы КЭ на основе опыта эксплуатации выпрямительно-инверторной подстанции (ПС) «Выборгская». Представленные ниже вопросы были решены в течение 15–20 лет после ввода ПС в эксплуатацию, и представленные материалы являются своего рода подведением итогов.

ВПТ «Выборгская» мощностью 900 МВт была сооружена в 1981–1984 гг. Она предназначена для коммерческой передачи электроэнергии из СССР (сейчас России) в Финляндию (рис. 1). В 2000 г. мощность ВПТ «Выборгская» была доведена до 1400 МВт. По контракту в приемной сети Финляндии высшие гармоники нормировались очень строго. Это мотивировалось общими отрицательными последствиями от гармоник, а также тем, что линии электропередачи (ЛЭП), отходящие от ВПТ, примыкают к району с развитой сетью воздушных линий связи. Учитывалось и то обстоятельство, что грунт в данном районе имеет высокое удельное сопротивление, увеличивающее отрицательное влияние гармоник на линии связи.

Для ПС «Выборгская» были установлены следующие нормы:

а) на обеих сторонах (отправной и приемной) нормировался коэффициент несинусоидальности кривой напряжения $k_{нс} \leqslant$ 2 %;

б) на приемной стороне нормировались показатели гармонического состава в отходящих линиях 400 кВ; действующее значение гармоник тока должно быть:

– в диапазоне 100–200 Гц $I_{эф} \leqslant$ 20 А;
– в диапазоне частот ⩾ 250 Гц $I_{эф} \leqslant$ 20 А;

в) псофометрическое значение тока (псофометрическое напряжение шума чистого тона с частотой 800 Гц) первоначально ограничивалось величиной $I_{пс} \leqslant$ 2,5 А (в настоящее время в связи с увеличением передаваемой мощности принято ограничение $I_{пс} \leqslant$ 5 А).

ЗАВИСИМОСТЬ ПСОФОМЕТРИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА НА ЛИНИИ ВЫБОРГ — ЮЛЛИККЯЛЯ ОТ НАГРУЗОК ПС «ВЫБОРГСКАЯ» (СПЛОШНАЯ ЛИНИЯ) И RAUMA (ПУНКТИР)

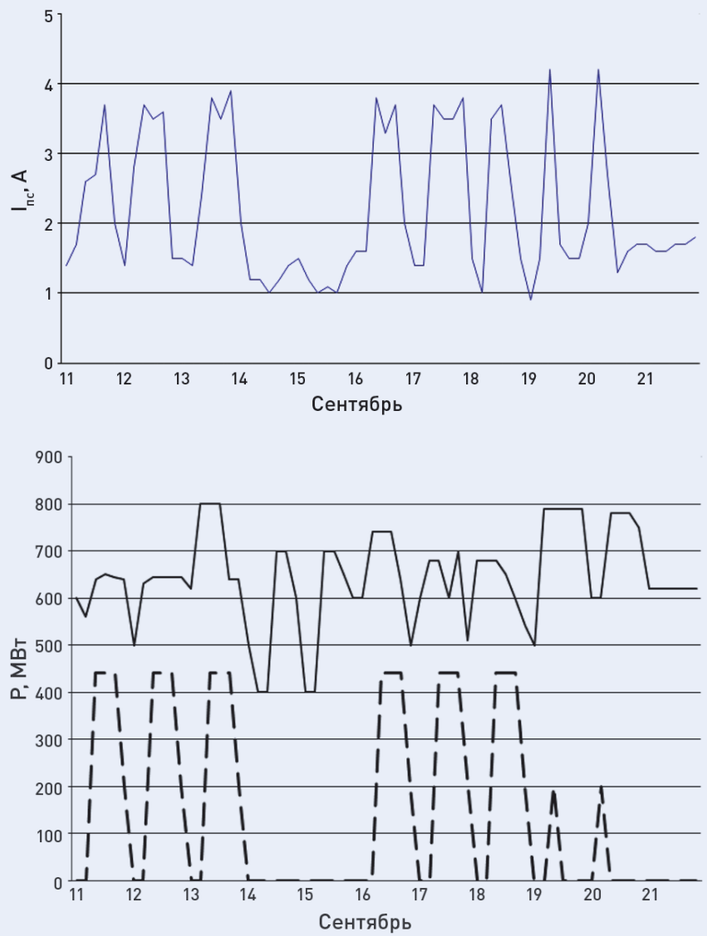


Рис. 2

Показатель $I_{пс}$ характеризует влияние ЛЭП на линии связи через гармоники тока

$$I_{пс} = \frac{1}{16}\sqrt{\sum_{\nu>1}(\nu \cdot p_\nu \cdot I_\nu)^2}\ ,$$

где $I_{пс}$ — среднеквадратические суммы гармоник тока с весовым коэффициентом p_ν, зависящим от порядковых номеров гармоник. Весовые коэффициенты рекомендованы телефонной системой Белла совместно с электротехническим институтом Эдисона.

Следует заметить, что в соответствии с принятыми в России правилам защиты линий связи при мощности ВПТ 900 МВт допустимое значение $I_{пс}$ составило бы 19 А, что в 7,5 раза больше, чем по финским требованиям.

Для обеспечения норм по гармоническому составу преобразовательные трансформаторы на ПС «Выборгская» были выполнены четырехобмоточными, фильтры высших гармоник были установлены на шинах третичных обмоток и шинах высокого напряжения. Таким образом, между фильтрами высших гармоник и сетью высокого напряжения присутствует сетевая обмотка, что позволило осуществить двухступенчатую фильтрацию гармоник тока.

В конце 1980-х гг. нормы по $I_{пс}$ стали систематически превышаться, о чем сообщили финские

специалисты, поэтому возникла необходимость доказать, что это не было связано с режимами ПС «Выборгская».

Теоретические исследования, проведенные в НИИПТ, показали, что повышение $I_{пс}$ могло быть следствием ввода в эксплуатацию линии ППТ Fenno-Skan (ПС Rauma), которая находится от ПС «Выборгская» на расстоянии более 500 км. Исследования проводились частотным методом, были выявлены резонансные усиления гармоник от преобразовательной ПС на линии ППТ Fenno-Skan из-за параметров финской сети. И так как на шинах 400 кВ ПС «Выборгская» установлены конденсаторные батареи (КБ), настроенные на фильтрацию высших гармоник, то усиленные гармоники тока от линии ППТ Fenno-Skan «затекали» в КБ 400 кВ.

Кроме того, был проведен мониторинг псофометрического значения тока в отходящих от ПС «Выборгская» линий мощностью 400 кВ [1], запрошены данные по графику работы линии ППТ Fenno-Skan и параметры финской сети. В итоге выяснилось, что, как правило, линия ППТ отключалась в ночное время и выходные дни, а ПС «Выборгская» таких отключений не имела. Корреляционный анализ показал, что значения гармоник тока имеют сильную связь с графиком работы линии ППТ Fenno-Skan.

На рис. 2 режимы работы ВПТ и линии ППТ совмещены с кривой, показывающей изменение $I_{пс}$ на линии мощностью 400 кВ Выборг — Юлликкяля. На верхней диаграмме представлен график значений псофометрического значения тока, на нижней диаграмме сплошной линией показана мощность ВПТ «Выборгская», а пунктирной — мощность линии ППТ Fenno-Skan. Из рисунка видно, что повышения $I_{пс}$ совпадают с графиком передачи энергии по линии ППТ.

В марте 1991 г. произошло событие, окончательно подтвердившее влияние линии ППТ Fenno-Skan на $I_{пс}$ на линии Выборг — Юлликкяля: длительное аварийное отключение линии ППТ Fenno-Skan из-за повреждения подводного кабеля.

ГРАФИК ПСОФОМЕТРИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ КАБЕЛЯ ППТ FENNO-SKAN: А) АВАРИЙНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ ЛИНИИ ППТ FENNO-SKAN 13 МАРТА 1991 Г.; Б) ВВОД ЛИНИИ ППТ FENNO-SKAN 5 МАЯ 1991 Г. В РАБОТУ

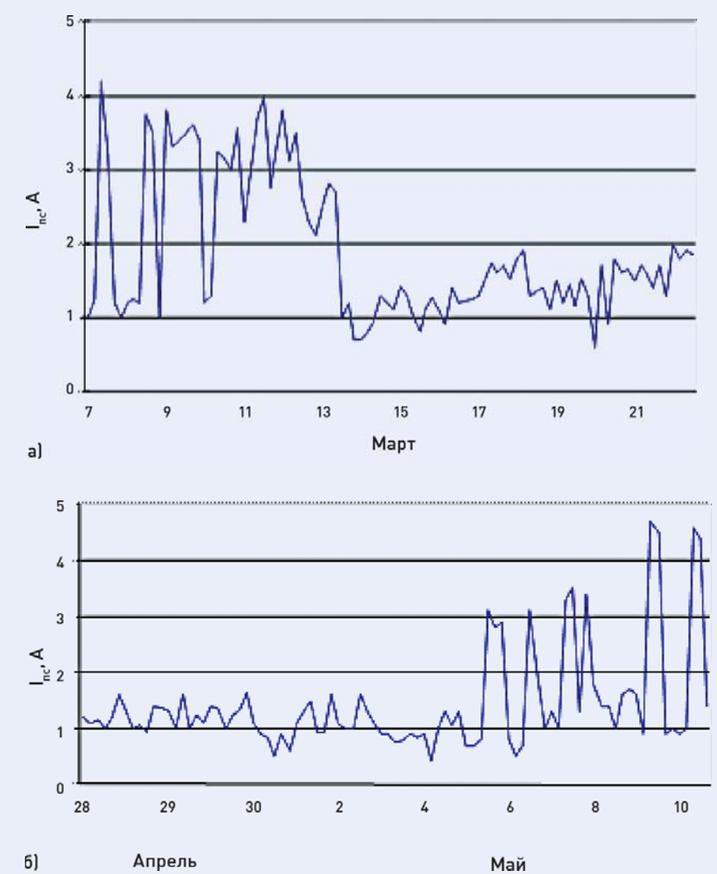


Рис. 3

Значение $I_{пс}$ на линии Выборг — Юлликкяля за этот период времени приведено на рис. 3 на с. 37. Режим ВПТ «Выборгская» в это время не изменялся и составлял 500–650 МВт. Очевидно, что при неизменном режиме работы ВПТ $I_{пс}$ снизился с 4–4,5 А до 2 А и не превышал установленную норму с 13 марта до 6 мая, т.е. до момента завершения ремонта линии ППТ.

По окончании ремонта кабеля и ввода ППТ Fenno-Skan в эксплуатацию график изменения $I_{пс}$ приобрел доаварийный характер с четко выраженным максимумом в дневное время и снижением в ночное до величины, определяемой ВПТ «Выборгская». Финские коллеги согласились с результатами исследований и на протяжении последних 25 лет претензий к гармоническому составу тока в линиях мощностью 400 кВ от них не поступало.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАРМОНИК ТОКА В СЕТИ

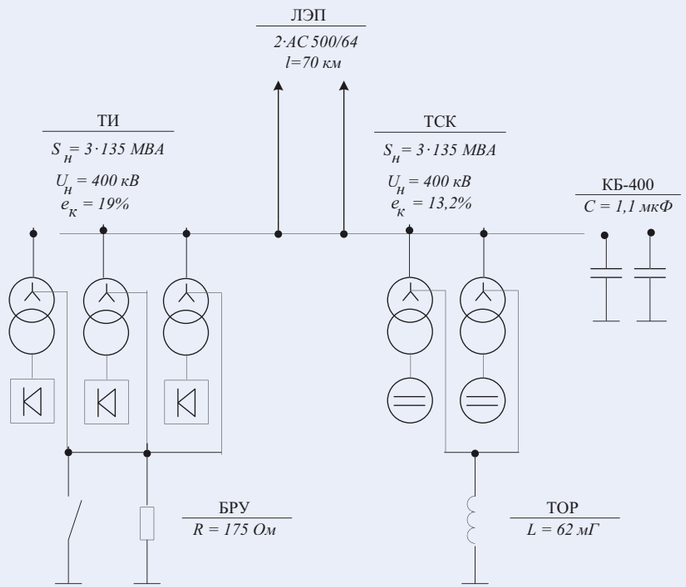
В основе методики распределения гармоник тока в сети заложены частотные характеристики электросети (ЧХЭС) [2], где под частотными характеристиками понимают реакцию этой сети на синусоидальные возмущения со стороны внешних узлов. Формально ЧХЭС определяется как зависимость параметров сети от частоты. К числу таких параметров относятся:

– входные сопротивления сети и проводимости со стороны заданного узла k:

$$Z_k(\omega)=\frac{\dot U_k(\omega)}{\dot I_k(\omega)}\ ;$$

$$Y_k(\omega)=\frac{\dot I_k(\omega)}{\dot U_k(\omega)} \qquad (1)$$

СХЕМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ ОБОРУДОВАНИЯ НА СТОРОНЕ 400 КВ



БРУ — бетэловое резисторное устройство, ТСК — трансформатор синхронного компенсатора, ТОР — токоограничивающий реактор, КБ — конденсаторная батарея, ТИ — трансформатор инвертора, ЛЭП — линия электропередачи

Рис. 4

ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ТОКА В БРУ

Рис. 5

– взаимные сопротивления сети и проводимости между узлами k и m:

$$Z_{km}(\omega)=\frac{\dot U_m(\omega)}{\dot I_k(\omega)}\ ;$$

$$Y_k(\omega)=\frac{\dot I_m(\omega)}{\dot U_k(\omega)} \qquad (2)$$

– передаточные функции по напряжению и току:

$$\dot K_{U,km}(\omega)=\frac{\dot U_m(\omega)}{\dot U_k(\omega)}\ ;$$

$$\dot K_{I,km}(\omega)=\frac{\dot I_m(\omega)}{\dot I_k(\omega)} \qquad (3)$$

Узлы с индексом k и относящиеся к ним величины являются входными, а с индексом m — выходными.

Использование в том или ином виде ЧХЭС позволяет решать задачи исследования распространения высших гармоник напряжения и тока в электрических сетях высокого напряжения. В данной ситуации методика дала возможность проанализировать систему фильтрации линии ППТ Fenno-Skan и выявить резонансное усиление неотфильтрованных гармоник на шинах ПС «Выборгская».

ВЛИЯНИЕ ГАРМОНИКИ ТОКА КОРОНЫ ЧАСТОТЫ 150 ГЦ НА ОБОРУДОВАНИЕ ПОДСТАНЦИЙ

При эксплуатации была определена еще одна проблема, связанная с гармониками. Особенностью сетей мощностью 400 кВ в Финляндии является заземление нейтрали через реакторы или резисторы большой величины. Это связано с необходимостью ограничения токов короткого замыкания (КЗ) по условиям электробезопасности, так как большая часть линий в районе ВПТ проходит по местности со скальным грунтом, т.е. большим удельным сопротивлением.

На рис. 4 представлена схема заземления нейтрали подстанционного оборудования на стороне 400 кВ. Нейтрали инверторных трансформаторов объединены и заземлены через бетэловое резисторное устройство (БРУ) сопротивлением 175 Ом. Нейтрали трансформаторов синхронных компенсаторов (ТСК) объединены и заземлены через токоограничивающий реактор (ТОР) индуктивностью 62 мГн. Конденсаторные батареи имеют глухое заземление нейтрали.

В процессе эксплуатации были замечены перегрузки БРУ в нейтрали инверторных трансформаторов [3]. Перегрузки начинались при стационарных режимах и проявлялись в том, что токи в БРУ в течение нескольких часов нарастали от обычных значений 2–5 А до 10–25 А, а иногда до 35–40 А. Затем токи некоторое время «колебались около максимального значения» и медленно возвращались к исходным значениям (рис. 5). Как при нормальных нагрузках, так и в режиме перегрузок токи БРУ имели практически синусоидальную форму частотой 150 Гц. Такие перегрузки привели к повреждению БРУ.

Нарастание и снижение тока заземления нейтрали инверторных трансформаторов происходило без какой-либо связи с уровнями напряжения на шинах 400 кВ. Известно также, что преобразователи тока не являются источниками третьей гармоники тока. Это подтвердилось и попытками повлиять на токи нейтрали изменениями режима ПС «Выборгская».

Исследования показали, что токи, вызывающие перегрузки БРУ, на-

реклама
cigré
Российский Национальный Комитет
ЦИФРОВАЯ ЭКСПОЗИЦИЯ
47-я Сессия СИГРЭ
Приглашаем российские компании принять участие в Цифровой экспозиции в рамках Технической выставки 47-й Сессии СИГРЭ в Париже (26–31 августа 2018 года)
Коллективный стенд РНК СИГРЭ
В рамках коллективного стенда на русском и английском языках будет представлена информация по перспективным отечественным разработкам в области электроэнергетики с выделением наиболее актуальных направлений:
– цифровые технологии и решения;
– кибербезопасность;
– энергоэффективные технологии и решения;
– сверхпроводимость.
Собранная информация будет доступна к перекрестному поиску по следующим параметрам:
– по направлению исследований СИГРЭ (A1, A2 ...);
– по алфавиту;
– по типу оборудования;
– по странам присутствия;
– образовательные организации.
Информация, собранная в рамках создания «Цифровой экспозиции РНК СИГРЭ» ляжет в основу более широкой информационной системы, направленной на поддержку экспортоориентированных отечественных производителей.
Сбор информации
Информация собирается через онлайн-форму на сайте www.cigre.ru в разделе «Опросы СИГРЭ и РНК СИГРЭ» в срок до 01.05.2018. Участие для членов сообщества РНК СИГРЭ бесплатное.
8-800-200-18-81 (95-95)
cigre@cigre.ru www.cigre.ru

ходятся вне ВПТ. Такое заключение подтверждается тем, что один из случаев увеличения токов и напряжений нулевой последовательности в ЛЭП мощностью 400 кВ был зарегистрирован при плановом отключении всех преобразовательных блоков, когда шины 400 кВ и один из ненагруженных трансформаторов находились под напряжением.

Начиная с 1988 г., были организованы непрерывные наблюдения за токами в цепи заземления нейтрали инверторных трансформаторов. На рис. 6 показан характер изменения тока заземления нейтрали инверторных трансформаторов в течение года наблюдений (с 01.04.88 г. по 01.04.89 г.) с усреднением за 8 ч. На рисунке хорошо видна резкая сезонная зависимость тока. В течение пяти месяцев (с мая по сентябрь) он держался на низшем уровне (не превосходил 5 А). В марте, апреле и октябре были единичные случаи превышения этого тока, достигавшие 15–20 А. Общая их продолжительность в эти месяцы составила примерно 2 % календарного времени. В остальные 4 месяца (с ноября по февраль) ток заземления нейтрали имел повышенные значения почти половину календарного времени. Максимальные значения этого тока наблюдались в середине декабря и составляли около 35 А.

Наблюдения за перегрузками позволили предположить, что их причиной является корона в сети 400 кВ. Исследования показали, что третья гармоника тока короны составляет около 23 % от первой гармоники.

В связи с гармониками тока, вызванными короной, потребовалось заменить БРУ на резистивное металлическое устройство.

Еще одной особенностью передачи электрической энергии в Финляндию было то, что согласно контракту на шинах 400 кВ требовалось поддерживать близким к нулевому значению величину перетока реактивной мощности по отходящим линиям. С этой целью были установлены два синхронных компенсатора по 160 МВ·Ар. Одновременно они выполняли функцию повышения мощности КЗ в сети инвертора.

ТОКИ НЕЙТРАЛИ (БРУ) ИНВЕРТОРНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ (УСРЕДНЕННЫЕ ЗА 8 Ч)

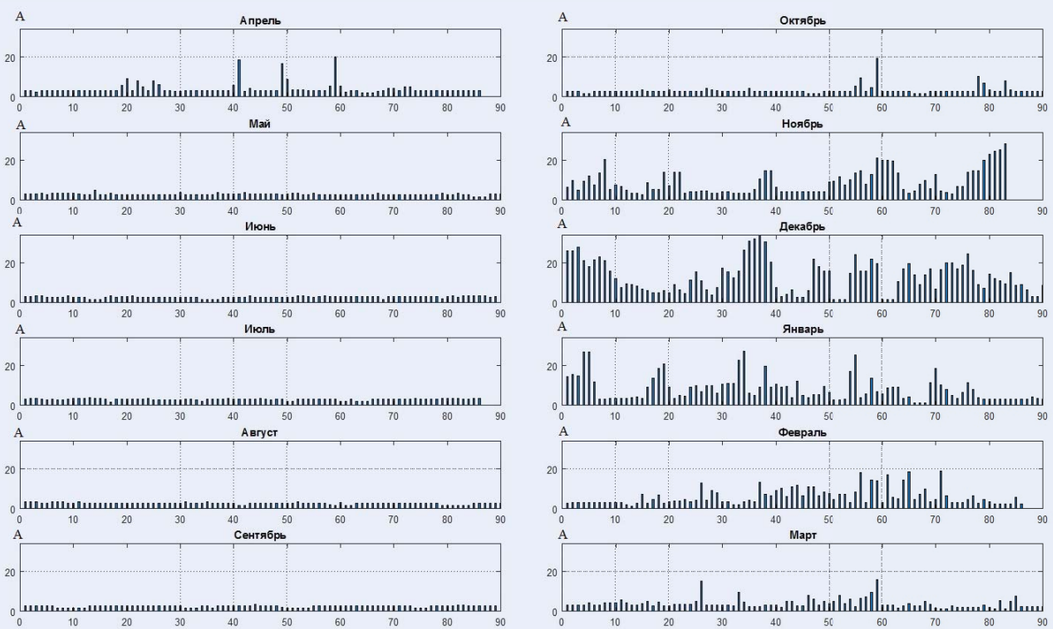


Рис. 6

Опыт эксплуатации показал правильность такого решения. Неустойчивость работы инвертора наблюдалась только при специальных испытаниях и несанкционированных режимах ВПТ «Выборгская». На качество электрической энергии в установившихся режимах (высшие гармоники, напряжение обратной последовательности) они практически не оказывают влияния. Следует заметить, что при использовании только конденсаторных батарей на шинах 400 кВ (при отключенных синхронных компенсаторах) усиление гармоник от линии ППТ Fenno-Skan было выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты исследований показывают, что превышения нормируемых значений гармонического состава тока и напряжения в узлах примыкания мощных преобразователей могут быть не связаны непосредственно с режимами этих преобразователей. Доказано, что возникшие проблемы высших гармоник на ВПТ «Выборгская» связаны исключительно с внешними факторами. Наличие в сети 400 кВ только двух (на время проведения исследований) мощных источников гармоник тока позволило выявить «виновника» искажений.

Установка на ПС «Выборгская» фильтров высших гармоник на шинах 400 кВ улучшает качество напряжения, однако приводит к тому, что в них «затекают» гармоники тока из внешней сети, создавая видимость наличия источника искажений в узле их установки.

Применение двухступенчатой системы фильтрации позволило выполнить жесткие требования по нормированию гармоник тока в отходящих от подстанции линиях. Многолетняя эксплуатация ВПТ «Выборгская» подтвердила правильность технических решений, выбранных на этапе проектирования преобразовательной подстанции.

Гармоники тока в высокодобротных сетях могут распространяться на большие расстояния, порядка нескольких сотен километров, и это необходимо учитывать при реализации объектов постоянного тока. Данное утверждение справедливо и для сетей 6–10 кВ.

Корона на проводах высоковольтных воздушных линий может явиться источником третьей гармоники и перегружать цепи заземления нейтрали трансформаторов. По данным зарубежных источников, причиной возникновения третьей гармоники могут стать и геомагнитные явления (подмагничивание трансформаторов постоянным током). Однако корреляции по времени магнитных бурь с повышением третьей гармоники тока на ВПТ «Выборгская» зафиксировано не было.

ЛИТЕРАТУРА

1. Змазнов Е.Ю., Крайчик Ю.С., Лозинова Н.Г. Статистический анализ показателей качества энергии по материалам их регистрации в АСУ ТП // Отчет НИИПТ. 1991. № 5788.
2. Змазнов Е.Ю. Расчет распространения гармоник тока и напряжения по сложным электрическим сетям на персональном компьютере // Тезисы докладов на Всесоюзном научно-техническом совещании «Снижение потерь и повышение качества электроэнергии в электрических сетях энергосистем». Фрунзе, 1991.
3. Змазнов Е.Ю., Крайчик Ю.С., Минин Е.Ю., Фаянс В.Г. Натурные исследования токов заземления нейтралей трансформаторов посредством АСУ // Автоматизированные системы управления технологическими процессами крупных подстанций, электропередач и вставок постоянного тока. Сб. трудов НИИПТ. Л.: Энергоатомиздат, 1991.

реклама