ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59032.1— 2020

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока

Часть 1

Общий обзор

(IEC/TR 62001-1:2016, NEQ)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2020

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения» (ОАО «НИИПТ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 ноября 2020 г. № 1155-ст

4 Настоящий стандарт разработан с учетом основных положений международного документа IEC/TR 62001-1:2016 «Системы постоянного тока высокого напряжения (ПТВН). Руководство к техническим условиям и оценке расчетов фильтров переменного тока. Часть 1. Общий обзор» (IEC/TR 62001-1:2016 «High-voltage direct current (HVDC) systems — Guidance to the specification and design evaluation of AC filters — Part 1: Overview», NEQ)

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2020

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Общее описание технических требований на фильтры гармоник на стороне переменного тока для систем постоянного тока высокого напряжения 3
4.1 Назначение фильтров гармоник на стороне переменного тока систем постоянного тока высокого напряжения 3
4.2 Общее содержание технических требований к фильтрам гармоник на стороне переменного тока систем постоянного тока высокого напряжения 3
4.3 Распределение ответственности между заказчиком и изготовителем 8
5 Определение требований к гармоническим искажениям 9
5.1 Пределы искажения напряжения 9
5.2 Помехи телефонной связи 10
6 Расчет гармоник тока преобразователя 12
6.1 Общие сведения 12
6.2 Гармоники тока, генерируемые преобразователем 12
6.3 Методика расчета 15
7 Определение эффективности фильтрации 18
7.1 Общие сведения 18
7.2 Методика расчета 19
7.3 Выбор типа фильтра и расчет импеданса фильтра 19
7.4 Определение эффективности фильтрации 19
7.5 Расстройка и погрешности 20
7.6 Методы моделирования импеданса сети при оценке эффективности фильтрации 22
7.7 Аварийное отключение батарей фильтров и секций батарей фильтров 23
8 Требования к компенсации реактивной мощности и определение мощности конденсаторных батарей 24
8.1 Требования к компенсации реактивной мощности 24
8.2 Выбор мощности батарей/кассет батарей фильтров 24
8.3 Последовательность коммутации фильтров и эффективность фильтрации 27
Приложение А (справочное) Определение параметров помех телефонной связи 29
Приложение Б (справочное) Формулы для расчета канонических гармоник для мостового преобразователя 32
Приложение В (справочное) Типовые схемы фильтров гармоник на стороне переменного тока 33
Приложение Г (справочное) Эквивалентное отклонение частоты 42
Приложение Д (справочное) Диаграммы диапазона импеданса 43
Приложение Е (справочное) Регулирование реактивной мощности 47
Библиография 52

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока

Часть 1

Общий обзор

High-voltage direct current power transmission.
Guidance to the specification and design of AC filters. Part 1. Overview

Дата введения — 2021—01—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает общие рекомендации по разработке технических требований на фильтры гармоник на стороне переменного тока.

1.2 Настоящий стандарт распространяется на электрические фильтры гармоник на стороне переменного тока для систем постоянного тока высокого напряжения (далее — ПТВН) с преобразователями с линейной коммутацией.

1.3 Настоящий стандарт предназначен для использования энергетическими компаниями, консультантами, изготовителями, на которых возложена ответственность за разработку технических требований для новых проектов ПТВН, а также оценку предложенных изготовителями вариантов схем фильтрации.

Применение настоящего стандарта ограничено фильтрами гармоник на стороне переменного тока в интересующем диапазоне частот с точки зрения гармонических искажений и помех в диапазоне акустических частот. Настоящий стандарт не распространяется на фильтры, разработанные для эффективного подавления помех в системах высокочастотной связи по проводам линий электропередачи и помех в спектре радиочастот.

Настоящий стандарт следует использовать исключительно в качестве руководящих указаний при разработке технических требований на фильтры на стороне переменного тока систем ПТВН. К использованию рекомендаций, изложенных в настоящем стандарте, следует подходить с учетом индивидуальных особенностей проекта ПТВН.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ 12.1.036 Система стандартов безопасности труда. Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях

ГОСТ 15150 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды

ГОСТ 18311 Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий

ГОСТ 32144 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения

ГОСТ Р 56735 (IEC/TS 60815-1:2008) Изоляторы высокого напряжения для работы в загрязненных условиях. Выбор и определение размеров. Часть 1. Определения, информация и общие принципы

Издание официальное

ГОСТ Р 56736 (IEC/TS 60815-2:2008) Изоляторы высокого напряжения для работы в загрязненных условиях. Выбор и определение размеров. Часть 2. Керамические и стеклянные изоляторы для систем переменного тока

ГОСТ Р 59032.3 Передача электроэнергии постоянным током высокого напряжения. Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока. Часть 3. Моделирование

ГОСТ Р 59032.4 Передача электроэнергии постоянным током высокого напряжения. Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока. Часть 4. Оборудование

СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных документов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **технические требования** (specification): Документ, в котором определены общие требования к фильтрам переменного тока и примыкающей системы переменного тока, в которой работают эти фильтры.

Примечания

1 Такой документ, как правило, выпускает энергетическая компания для использования потенциальными изготовителями оборудования ПТВН.

2 В настоящем стандарте не определены требования к содержанию детальной технической спецификации на отдельные компоненты оборудования, которая создается изготовителем системы ПТВН в процессе проектирования фильтров.

3 Технические требования определяют техническую основу для контракта между двумя сторонами (см. 3.2 и 3.3).

3.2 **организация заказчика** (customer): Организация, которая приобретает преобразовательную подстанцию постоянного тока высокого напряжения, в том числе фильтры переменного тока.

Примечание — Термин «заказчик» используется в качестве собирательного для подобных терминов, которые применены в технических требованиях, как например, владелец, клиент, покупатель, энергетическая компания, пользователь, работодатель, приобретатель, а также консультант, представляющий заказчика.

3.3 **организация-изготовитель** (contractor): Организация, которая несет общую ответственность за поставку преобразовательной подстанции постоянного тока высокого напряжения, в том числе фильтров переменного тока, в качестве комплектной системы.

Примечания

1 Изготовитель может, в свою очередь, подписать контракт с одним или несколькими субпоставщиками отдельных компонентов оборудования.

2 Термин «изготовитель» используется в качестве собирательного для подобных терминов, которые могут применяться в технических требованиях, как например, подрядчик или поставщик.

3 В тех случаях, когда согласно контексту, речь идет о предшествующем заключению контракта этапе проекта, то вместо термина «организация-изготовитель» рекомендуется использовать термин «участник тендера» для указания на возможного подрядчика или соискателя контракта.

3.4 **звено фильтра** (branch arm): Группа конденсаторов, реакторов, резисторов, измерительных и защитных устройств, соединенных между собой без коммутационных аппаратов для реализации фильтрации гармоники и регулирования реактивной мощности, имеющая в своем составе один коммутационный аппарат для подключения к внешним цепям.

Примечание — В составе батареи/секции батареи звено фильтра образует наименьший настраиваемый элемент фильтра.

3.5 **секция батареи** (sub-bank): Несколько звеньев, имеющих общую точку подключения, подключаемую к внешней сети входящим в состав секции коммутационным аппаратом, или одно звено, подключаемое напрямую к общей точке подключения нескольких секций, которые могут коммутироваться (подключаться или отключаться) к сети для регулирования реактивной мощности.

Примечание — Коммутационный аппарат может не иметь функции отключения короткого замыкания.

3.6 **батарея** (bank): Одна или несколько секций батареи, имеющих общую точку подключения, которая подключается к внешней электрической сети общим коммутационным аппаратом, входящим в состав батареи.

3.7 **канонические гармоники** (characteristic harmonics): Гармоники, которые генерируются преобразователем при идеальных условиях. не учитывается асимметрия импедансов преобразовательного трансформатора или углов включения между вентилями, постоянный ток сглажен, а синусоидальное напряжение переменного тока симметрично.

3.8 **неканонические гармоники** (non-characteristic harmonics): Гармоники, которые генерируются преобразователем вследствие неидеального режима эксплуатации, разброса характеристик оборудования.

4 Общее описание технических требований на фильтры гармоник на стороне переменного тока для систем постоянного тока высокого напряжения

4.1 Назначение фильтров гармоник на стороне переменного тока систем постоянного тока высокого напряжения

Фильтры гармоник на стороне переменного тока систем ПТВН предназначены для:

- обеспечения качества напряжения на шинах переменного тока преобразовательных подстанций в соответствии с требованиями применимых стандартов либо другой нормативной документации или специальными требованиями;
- обеспечения качества токов в отходящих от шин подстанций линий электропередачи в соответствии с требованиями применимых стандартов либо другой нормативной документации или специальными требованиями;
- компенсации реактивной мощности, потребляемой преобразователями в установившихся режимах работы;
- обеспечения заданного перетока реактивной мощности по линиям электропередачи примыкающих энергосистем;
- обеспечения устойчивой работы преобразователей в установившихся и переходных режимах во всем диапазоне нагрузки.

4.2 Общее содержание технических требований к фильтрам гармоник на стороне переменного тока систем постоянного тока высокого напряжения

Ниже приведен перечень данных, которые рекомендуется определить при подготовке технических требований к фильтрам гармоник на стороне переменного тока систем ПТВН.

Примечание — Исходные данные целесообразно иметь для всех примыкающих к системе ПТВН систем переменного тока для всех этапов развития системы ПТВН и перспективных схем примыкающих систем переменного тока.

4.2.1 Сведения о примыкающих системах переменного тока

4.2.1.1 Напряжение

Следует указать следующие значения напряжения:

- номинальное напряжение;

- диапазоны нормально допустимого и предельно допустимого значения установившегося отклонения напряжения на шинах системы ПТВН.

Следует определить любые особые максимально допустимые напряжения за пределами установившегося режима, так как такие напряжения могут оказывать влияние на конструкцию фильтров, например, на номинальные параметры или временные перенапряжения.

4.2.1.2 Несимметрия напряжения

Следует указать, где было измерено существующее напряжение обратной последовательности и по нулевой последовательности.

Необходимо указать на схеме точку определения напряжения обратной последовательности: на шине преобразователя или за сопротивлением сети. Необходимо указать, если наблюдается повышение напряжения обратной последовательности фаз из-за увеличения нагрузки в нетранспонированных линиях передачи при работающем преобразователе.

Примечания

1 Так как составляющая обратной последовательности изменяется с течением времени и условий в системе, то указывают максимальную величину, которая будет использоваться для расчета неканонических гармоник.

2 Если задано большое значение напряжения обратной последовательности, которое будет использовано при расчете эффективности фильтрации, это может привести к необходимости включить в состав фильтра звено для подавления третьей гармоники.

4.2.1.3 Частота

Следует указать следующие параметры частоты:

- номинальную частоту системы переменного тока;
- нормально допустимое и предельно допустимое значения отклонения частоты;
- отклонения частоты в аварийных ситуациях и их расчетную длительность.

Примечание — При отклонениях частоты в аварийных ситуациях фильтры гармоник переменного тока остаются в работе без возникновения повреждений, однако при этом не соблюдаются предусмотренные эксплуатационные показатели.

4.2.1.4 Уровень (мощность) короткого замыкания

Следует указать максимальный уровень (мощность) короткого замыкания и минимальный уровень мощности короткого замыкания на шинах переменного тока, к которым должны быть подключены фильтры переменного тока. Эти уровни должны быть указаны в единицах измерения полной мощности (МВА) или в единицах измерения тока (кА) с указанием напряжения переменного тока.

Также должно быть задано отношение X/R для основной частоты в случае специальных требований к выключателям.

4.2.1.5 Коммутация фильтров

Следует задать максимально допустимое изменение напряжения на шинах преобразователя в процентах от номинального напряжения при коммутации фильтра и минимальный уровень мощности короткого замыкания. Может быть задана максимальная величина мощности коммутируемой батареи или секции батареи фильтра (в МВАр).

Следует задать требования к гистерезису коммутации фильтра.

Примечание — При коммутации фильтра создаются импульсные помехи, которые следует контролировать. Для подавления импульсных помех применяют предвключенные резисторы и/или размыкающие резисторы или метод синхронизированной коммутации.

4.2.1.6 Обмен реактивной мощностью

Следует указать допустимые пределы перетока реактивной мощности между системой переменного тока и преобразовательной подстанцией для всех нормальных режимов системы передачи электроэнергии ПТВН и допустимый диапазон напряжения на шинах.

4.2.1.7 Импеданс для гармоник в системе

Следует указать импеданс системы переменного тока на частоте гармоник, который будет использоваться при расчете эффективности фильтрации и номинальных параметров фильтров гармоник на стороне переменного тока.

Рекомендуется привести информацию о допустимых упрощениях моделирования сопротивлений. Если указывается несколько областей сопротивления (например, для нормальных и номинальных режимов), технические требования должны содержать указания о конкретных расчетах, в которых будет использоваться соответствующее сопротивление. В случае различий между сопротивлениями прямой и обратной последовательности фаз сети переменного тока таковые различия должны быть указаны.

Примечание — Под термином «нормальный режим» в соответствии с ГОСТ 18311 понимают режим работы фильтра на стороне переменного тока, характеризующийся рабочими значениями его параметров, при этом энергосистема находится в нормальном режиме работы. Нормальными состояниями считают все колебания генерации, колебания нагрузки и режимы компенсации реактивной мощности, плановые отключения и схемы во время технического обслуживания и строительных работ, неидеальные рабочие условия и вероятные нештатные состояния, на которые рассчитаны рассматриваемая сеть и установка, создающая возмущение (например, преобразователь тока). К числу нормальных режимов сети не относятся те режимы, которые возникают в результате неисправности или совокупности неисправностей, аварий. К ним относятся аварийные режимы работы энергосистемы, случаи, когда другие пользователи сети значительно превышают свои допустимые пределы искажений или не соблюдают требований к подключению, а также временные схемы генерации или поставки электроэнергии, реализуемые для обеспечения электроснабжения потребителей во время ремонтных или строительных работ, без которых поставка электроэнергии была бы приостановлена. Такие сценарии формируют основу номинальных режимов, помимо тех, которые описаны выше применительно к нормальным режимам. Эффективность фильтрации может не обеспечиваться в номинальном режиме, но фильтр рассчитан на такие перегрузки.

4.2.1.8 Параметры нулевой последовательности

Следует задать импеданс нулевой последовательности для анализа возможных телефонных помех вдоль соединительных воздушных линий электропередачи переменного тока.

4.2.1.9 Заземление системы

Следует указать коэффициент замыкания на землю или отношение реактивных сопротивлений X_0/X_1 в точке подключения. Также следует указать тип системы заземления, например эффективно заземленная система или заземленная через реактор.

4.2.1.10 Уровень прочности изоляции

Следует указать уровень электрической прочности для грозового импульса и уровень электрической прочности для коммутационного импульса для соединительных линий высокого напряжения и нейтрали, а также соответствующие коэффициенты запаса. Также следует задать коэффициенты запаса для компонентов оборудования фильтров, принимая во внимание, что коэффициенты запаса могут отличаться для оборудования различного типа.

4.2.1.11 Длина пути утечки

Следует указать длину пути утечки исходя из величины удельной утечки, выраженной в единицах мм/кВ согласно ГОСТ Р 56736. Повышенные требования предусмотрены для проходных втулок или изоляторов, установленных в горизонтальном положении.

Необходимо координировать длину пути утечки с заданными параметрами для уровней изоляции и загрязнения.

4.2.1.12 Гармоники в системе переменного тока до подключения системы ПТВН

Следует указать ранее существовавшие гармоники в системе переменного тока, так как они должны быть учтены при определении номинальных параметров фильтра переменного тока и эффективности фильтрации. Следует указать также место их определения: на шине преобразователя или за сопротивлением сети. Следует использовать значения гармонических составляющих, измеренные с вероятностью 95 % (согласно ГОСТ 32144), при нормальной и всех характерных ремонтных схемах сети. Следует идентифицировать источники внешних гармоник в пределах и за пределами подстанции.

Примечание — В пределах подстанции может располагаться оборудование для управляемой компенсации реактивной мощности, например, статический тиристорный компенсатор (СТК), который является источником гармоник. За пределами подстанции могут находиться другие источники гармонических искажений, например, другие преобразователи ПТВН, системы СТК, нагрузки выпрямителей, регулируемые приводы переменного тока, дуговые печи, силовые трансформаторы, коронные разряды на линиях электропередачи переменного тока, а также оборудование заказчика, которые могут генерировать значительные гармонические возмущения.

Рекомендуется задать импеданс источника для ранее существовавших гармоник. Эта величина соответствует импедансу для гармоник в системе, однако в тех случаях, когда имеются другие расположенные поблизости от преобразовательной подстанции источники искажений напряжений, целесообразно указать фактический импеданс между этим источником и шиной фильтра.

Если эффективность фильтрации оценивается с учетом гармоник преобразователя и существующих гармоник, то следует указать метод сложения гармоник этих двух источников. Возможно использование линейного метода или метода извлечения квадратного корня из суммы квадратов.

Примечание — Некоторые источники гармонических искажений, например системы железнодорожного транспорта, могут генерировать гармоники, частоты которых не кратны основной частоте.

В случае отсутствия сведений о ранее существовавших уровнях гармонических искажений рекомендуется предусмотреть определенный запас посредством задания процентного увеличения от уровня генерируемых преобразователем гармоник, который следует учитывать.

4.2.2 Требования к гармоническим искажениям

Пределы гармонических искажений напряжения на шинах подстанции ПТВН в примыкающей системе переменного тока и токов в отходящих от шин подстанций линий электропередачи должны быть определены согласно нормам или стандартам.

4.2.3 Гармоники тока, генерируемые преобразователями системы ПТВН

Следует определить и указать гармоники тока, генерируемые преобразователями системы ПТВН во всех режимах работы с учетом реальных условий эксплуатации.

4.2.4 Требования к резервированию

Следует указать требования к резервированию, если имеются.

Примечание — Например, указывают среднее время безотказной работы для системы постоянного тока в целом или отдельно для фильтров.

4.2.5 Условия окружающей среды

4.2.5.1 Температура

Следует указать верхние и нижние рабочее и предельное рабочее значения температуры воздуха при эксплуатации согласно ГОСТ 15150. Следует использовать температуру воздуха на монтажной площадке по сухому термометру.

4.2.5.2 Загрязнение

Следует указать степень загрязнения на месте эксплуатации. Степень загрязнения может быть определена согласно практике, принятой на соседних подстанциях с таким же номинальным напряжением и характеристиками загрязнения окружающей среды, или же следует руководствоваться стандартами ГОСТ Р 56735, ГОСТ Р 56736 (см. также [1] и [2]).

4.2.5.3 Ветровые условия

Следует указать нормативное ветровое давление и скорость ветра, которые необходимы для расчета механической прочности оборудования и опорных конструкций для оборудования согласно СП 20.13330.2016.

4.2.5.4 Ледовая нагрузка (если применимо)

Следует указать нормативную толщину стенки гололеда, нормативную ветровую нагрузку при гололеде согласно СП 20.13330.2016.

4.2.5.5 Солнечное излучение

Может быть указан максимальный уровень падающего солнечного излучения согласно ГОСТ 15150. Это необходимо для определения номинальных параметров реакторов, резисторов и конденсаторных батарей в случае, если батареи оснащены системой защиты от несимметрии.

4.2.5.6 Количество грозовых дней в году

Следует определить плотность грозовых разрядов на подстанции. Как правило, этот параметр используется для проектирования общей системы защиты подстанции от грозовых разрядов.

4.2.5.7 Сейсмические требования

При проектировании оборудования фильтров необходимо учитывать сейсмичность района строительства преобразовательной подстанции согласно СП 14.13330.2018.

4.2.5.8 Акустический шум

Уровень шума от фильтров на стороне переменного тока должен согласовываться с общим шумом от преобразовательной подстанции.

Интенсивность акустического шума, создаваемого оборудованием подстанции, не должна превышать предельно допустимых значений, установленных в ГОСТ 12.1.036 (см. также [3]).

4.2.6 Конфигурация и структура примыкающей сети

Следует указать наличие другой расположенной рядом преобразовательной подстанции ПТВН, если применимо. Следует задать величину импеданса источника, параметры конфигурации фильтра и данные генерации гармоник.

Следует идентифицировать расположенные рядом трансформаторы, шунтирующие конденсаторы или реакторы, если применимо. Следует указать величины полной и реактивной мощности, а также импеданс короткого замыкания для трансформатора. Причина задания этих параметров заключается в возможном требовании ограничения пусковых токов («расположенные рядом» в этом контексте означает, что на площадке, где расположена преобразовательная подстанция, также находится еще одна подстанция).

Следует указать исходные данные для расположенных рядом разрядников для защиты от перенапряжений, если применимо, вследствие возможного влияния при анализе координации изоляции.

Протекающие в линиях переменного тока геомагнитные токи могут оказывать влияние на номинальные параметры различных компонентов фильтров, эксплуатационные характеристики системы защиты фильтров и на насыщение трансформаторов, с воздействием на фильтры, подключенные к третичной обмотке трансформатора. В зонах с высоким предполагаемым уровнем геомагнитных токов следует указать такие параметры, как амплитуда, частота возникновения и их длительность.

Должна быть приведена информация о линиях переменного тока, находящихся с проектируемой линией постоянного тока в одном коридоре, или близко расположенные.

Необходимо указать следующие факторы:

- длина участков линий, находящихся в одном коридоре или в непосредственной близости;
- геометрическое исполнение линий переменного и постоянного тока, включая заземляющие провода;
- расстояние между линиями: между центрами или между ближайшими проводами;
- удельное сопротивление грунта;
- режим работы передачи постоянного тока (биполярный, монополярный с возвратом через землю или обратный провод);
- максимальные уровни тока в линии переменного тока, включая проценты составляющих обратной и (что очень важно) нулевой последовательности;
- транспозиции линии переменного тока и, возможно, линии постоянного тока.

4.2.7 Требования к компоновке фильтров и компонентов

4.2.7.1 Компоновочные схемы фильтров

Следует указать какие-либо ограничения или предпочтения касательно компоновки фильтров, если имеются.

Следует указать на запрет сезонной подстройки, если предусмотрено.

Следует указать любые ограничения на количество разрядов фильтров в течение часа, если таковые имеются.

Следует указать тип системы заземления фильтров.

Следует указать исходные данные для каждого из способствующих расстройке фильтров факторов.

4.2.7.2 Конденсаторы фильтров

Рекомендуется указать предпочтения касательно типов предохранителей, которые будут использоваться с конденсаторами, например, внутренние или наружные предохранители, или конденсаторы без предохранителей для специальных условий применения.

Рекомендуется указать максимальное время разряда конденсатора, а также минимально допустимое время разряда конденсаторов конденсаторной батареи.

Следует указать допустимые уровни отказов для конденсаторных агрегатов или элементов, которые соответствуют уровням подачи аварийного сигнала, отложенного отключения (с указанием требуемой задержки) или отключения.

4.2.7.3 Требования к испытаниям

Следует привести требования к испытаниям компонентов фильтров, то есть конденсаторам, реакторам, резисторам, разрядникам и прочим компонентам, посредством ссылок на применимые стандарты.

Если требования к испытаниям не заданы, то изготовитель должен указать перечень испытаний, которые подлежат проведению.

4.2.8 Защита фильтров

Следует указать требования к защите фильтра и его компонентов.

4.2.9 Оценка потерь

Следует указать коэффициент капитализированных потерь для оптимизации конструкции фильтра. Следует определить условия, при которых должен рассчитываться коэффициент потерь фильтра.

Потери на фильтрах переменного тока рассматриваются в ГОСТ Р 59032.4, раздел 5. Следует предусмотреть порядок расчета потерь мощности во всех компонентах фильтра переменного тока и определить базовые критерии для оценки потерь в фильтре переменного тока. В ходе проектирования фильтра следует учитывать капитализацию потерь при выборе количества и типов требуемых фильтров.

4.2.10 Измерения и проверки на месте эксплуатации

Испытания на месте эксплуатации можно разделить на испытания подсистем и испытания систем. Можно указать на необходимость проведения таких испытаний для проверки работоспособности компонентов и эксплуатационных показателей фильтра. Как правило, испытания подсистем проводятся изготовителем, в то время как системные испытания могут проводиться совместно заказчиком и изготовителем.

4.2.11 Общие требования

Следует указать следующие общие требования в применимых случаях:

- меры безопасности, как, например, устройство ограждения вокруг площадки с установленными фильтрами или установка компонентов фильтров на металлоконструкциях установленной высоты;
- меры по защите от коррозии, как, например, окраска или гальванизация;
- интервалы технического обслуживания;
- доступность для проведения технического обслуживания, особенно если для демонтажа конденсаторов требуется применение гидравлической платформы, и т. д.;
- обязательная к исполнению программа обеспечения качества;
- различные аспекты проведения монтажных работ/физические ограничения;
- ограничения на доступной площадке объекта;
- любые специфические риски вследствие наличия птиц, змей или вредителей.

В технических требованиях необходимо определить критерий, согласно которому эксплуатационные характеристики фильтров следует считать удовлетворительными:

- соответствие эксплуатационных характеристик, полученных расчетным методом, заданным данным, или
- измерение на месте эксплуатации после ввода оборудования в эксплуатацию, или
- комбинации перечисленных выше критериев.

Для подтверждения соответствия эффективности фильтров используется комбинация расчетных методов с последующими измерениями на месте эксплуатации.

В технических требованиях также необходимо определить ответственность изготовителя за оценку взаимного влияния фильтров переменного тока и устройств управления преобразователей ПТВН и за возникновение возможного резонанса фильтров с системой переменного тока.

4.3 Распределение ответственности между заказчиком и изготовителем

Перед разработкой требований к конструкции фильтров переменного тока следует определить границы ответственности между заказчиком и изготовителем.

При этом могут быть применены следующие схемы распределения ответственности.

а) Заказчик определяет расчетным способом импеданс системы переменного тока, предельные искажения и прочие подлежащие рассмотрению эксплуатационные показатели, методы проведения расчетов и параметры, которые должны быть учтены. Изготовитель проводит анализ и проектирование фильтров на основе этих данных и несет ответственность перед заказчиком за то, что предложенная конструкция фильтров соответствует всем техническим требованиям. Риск того, что фильтры переменного тока не будут работать надлежащим образом в условиях эксплуатации, возлагается на заказчика.

б) Другая схема заключается в том, что заказчик определяет только максимальные допустимые искажения и возмущения. Заказчик может потребовать проведения эксплуатационных испытаний для подтверждения того, что определенные пределы не превышены. Изготовитель несет полную ответственность за определение импеданса системы переменного тока и всех параметров и характеристик, и проектирование фильтров переменного тока таким образом, чтобы они удовлетворяли пределам, заданным заказчиком (или предложенным, если целесообразно, подрядчиком), и обладали способностью к работе во всех реальных условиях эксплуатации. Большинство рисков в этом случае возлагается на изготовителя.

При разработке технических требований допускается применять комбинацию описанных выше схем. Например, заказчик предоставляет информацию о конфигурации системы переменного тока, максимальной и минимальной мощности короткого замыкания и планируемого расширения в будущем, но не исчерпывающие данные об импедансе системы для гармоник системы переменного тока.

Решение о разделении сферы ответственности зависит от стратегии каждого заказчика, данных и ресурсов, которыми располагает заказчик. В настоящем стандарте приведена подробная информация, необходимая для выработки решения о распределении ответственности между заказчиком и подрядчиком.

5 Определение требований к гармоническим искажениям

5.1 Пределы искажения напряжения

5.1.1 Показатели качества электроэнергии, относящиеся к гармоническим составляющим напряжения

Коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$, %, определяют по формуле

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\ \%, \tag{1}$$

где U_1 — фазное напряжение основной частоты (действующее значение);

U_n — гармоническая составляющая фазного напряжения n-го порядка.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U вычисляют по формуле

$$K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{N} U_n^2}, \tag{2}$$

где N — максимальный порядок учитываемой гармоники.

Суммарный арифметический коэффициент гармонических искажений K определяют по формуле

$$K = \sum_{n=2}^{N} U_n. \tag{3}$$

Примечания

1 Максимальный порядок учитываемых гармоник N принимают равным 49, так как амплитуда генерируемых в системах ПТВН токов уменьшается с частотой, а гармоники напряжения, трансформируемые в сеть, значительно уменьшаются с увеличением частоты вследствие характеристик силовых трансформаторов и нагрузок на этих частотах.

2 В формуле (1) в качестве напряжения U_1 помимо номинального напряжения допускается использовать значение для наихудшего случая (минимальное значение напряжения).

5.1.2 Определение пределов гармонических искажений напряжения

В технических требованиях должны быть определены допустимые уровни гармонических искажений напряжения на шинах подстанции, подлежащие соблюдению изготовителем фильтров переменного тока.

Если необходимо минимизировать сроки разработки и проектирования или отсутствуют необходимые расчетные инструменты или данные о системе переменного тока, то пределы искажений могут быть определены оценочным способом на основе диапазонов величин $K_{U(n)}$, K_U или K, полученных исходя из опыта эксплуатации существующих систем постоянного тока.

При этом следует учитывать:

- существующие стандарты, нормативные требования и правила, установленные для предельных гармонических искажений напряжения;
- уровни напряжения (для более высоких уровней напряжения рекомендуются более строгие пределы);
- близость областей нагрузки;
- близость генераторов;
- расположенные поблизости от преобразовательной подстанции источники гармонических искажений;
- ранее существовавший уровень гармонических искажений;
- конфигурация сети (длинные линии и конденсаторные батареи могут усиливать гармонические напряжения в удаленных местоположениях, большие узловые сети могут передавать гармонические искажения низкого уровня к зонам нагрузки и т. д.).

Примечание — Принятые пределы отражают традиционный подход для исключения последствий чрезмерных искажений. При этом существует риск, что такой подход может привести к созданию конструкции, которая будет иметь необоснованно высокую стоимость.

При наличии необходимых расчетных инструментов, возможности получить необходимую информацию о системе переменного тока пределы искажений могут быть определены следующим проведением детальных исследований:

- определение расчетным способом отношения гармоник напряжения в точке подключения ПТВН к гармоникам напряжения на главных подстанциях высокого, среднего или низкого напряжения в примыкающей системе переменного тока. Это должно быть выполнено для всего рассматриваемого частотного диапазона и всех предполагаемых нормальных конфигураций сети и уровней нагрузки;
- измерение фактических, ранее существовавших уровней гармоник напряжения в точке подключения и на главных подстанциях высокого, среднего или низкого напряжения в рассматриваемой области.

При этом следует учитывать:

- существующие стандарты, нормативные требования и правила, установленные для предельных гармонических искажений;
- уровни напряжения;
- близость областей нагрузки;
- близость генераторов;
- влияние расположенных поблизости от преобразовательной подстанции источников гармонических искажений;
- возможность резонансного усиления гармоник;
- ранее существовавший уровень гармонических искажений;
- конфигурация и параметры сети.

Примечание — Определение пределов искажения посредством проведения детальных исследований требует больших затрат труда на этапе разработки технических требований, однако при этом повышается вероятность разработки более дешевого варианта конструкции фильтра переменного тока, оптимизированного к параметрам гармонических искажений в системе переменного тока и позволяющего исключить создание необоснованно сложной схемы фильтрации, которая может накладывать большие, чем необходимо, ограничения на конструкцию и работу системы ПТВН.

5.2 Помехи телефонной связи

5.2.1 Общие сведения

Критерии оценки помех телефонной связи устанавливают с учетом соответствующих стандартов и нормативных документов. Критерии оценки помех телефонной связи приведены в приложении А.

Низкий уровень гармоник тока с одной стороны линии не означает, что и с другой стороны линии будет также низкий уровень гармоник тока. Распределение гармоник в линиях передачи электроэнергии представляет собой сложную функцию импеданса для гармоник для компонентов сети и конфигурации сети. Гармоники тока в сети могут усиливаться.

Генерированные системой ПТВН гармонические токи преимущественно сбалансированы. Влияние линий передачи электроэнергии на помехи телефонной связи возникает, в основном, из-за токов нулевой последовательности, которая возникает из-за несимметрии параметров линий электропередачи, которая особенно сильно проявляется на высоких частотах.

Циркулирующие в линиях передачи электроэнергии гармонические токи нулевой последовательности находятся в зависимости от импеданса нулевой последовательности сети.

Выбор предельных значений для каких-либо используемых в конкретном проекте системы ПТВН критериев оценки помех телефонной связи зависит от плотности и длины телефонных линий в зоне воздействия помех от линий передачи электроэнергии, разделения силовых и коммуникационных линий, типа коммуникационных линий и помехоустойчивости телефонной системы.

5.2.2 Определение пределов помех телефонной связи

В технических требованиях должны быть определены допустимые уровни помех телефонной связи в примыкающих линиях, подлежащие соблюдению изготовителем фильтров переменного тока.

Пределы искажений могут быть определены оценочным способом на основе диапазонов величин псофометрического тока, TIF или THFF, полученных исходя из опыта эксплуатации существующих систем постоянного тока.

При этом необходимо учитывать:

- действующие стандарты и нормативные документы, устанавливающие предельные гармонические искажения;
- плотность телефонных линий поблизости от линий передачи электроэнергии переменного тока;

- сопротивление земли вдоль линий передачи электроэнергии переменного тока;
- длину телефонных линий и среднее удаление от линий передачи электроэнергии переменного тока;
- конфигурация сети переменного тока;
- тип и характеристики коммуникационных линий (кабели и/или воздушные линии).

Примечания

1 Структура телефонной системы и локальные условия являются основными параметрами, которые оказывают влияние на пределы помех телефонной связи.

2 Соответствующие требования к помехам телефонной связи значительно изменяются для различных проектов по сравнению с требованиями, относящимися к искажению напряжения. Определение пределов помех телефонной связи для конкретной системы ПТВН на базе полученного при эксплуатации существующих систем опыта выполняют с учетом сравнимых требований и условий.

Пределы искажений могут быть определены с проведением детальных исследований, которые могут включать расчет диапазона эквивалентного тока помехи, который соответствует различным уровням телефонных помех. Оценка такого диапазона позволяет определить соответствующие пределы для эквивалентного уровня помех, для которых приращение стоимости вследствие повышения эффективности фильтров эквивалентно уменьшению расходов на подавление, которые необходимо выполнить для телефонных линий. При этом требуется проведение предварительной оценки стоимости мероприятий по подавлению и стоимости мероприятий по улучшению качества работы фильтров, для чего потребуется сбор данных от телефонных компаний и изготовителей систем ПТВН, соответственно. При невозможности получения таких данных могут быть установлены опциональные проектные пределы, устанавливающие применимый с точки зрения оценки затрат диапазон.

Предел эквивалентного тока помехи может быть выражен в виде набора величин I_{eq}, специфических для каждой линии передачи электроэнергии высокого и сверхвысокого напряжения, расположенных поблизости от системы ПТВН. Для длинных линий передачи электроэнергии, когда плотность телефонных линий изменяется вдоль линии, может быть целесообразным выразить уровень помех телефонной связи в качестве профиля I_{eq} вдоль линии электропередачи. Протяженность линий передачи электроэнергии, которая должна быть учтена при проведении анализа, зависит от степени проникновения гармонических токов в сети, что, в свою очередь, является функцией конфигурации в конкретной сети. Для определения степени проникновения гармонических токов рекомендуется проведение соответствующего анализа.

Следует выполнить измерения существующих гармоник тока в примыкающих электрических сетях. В ходе измерений должны быть получены величины уровней гармоник, фазовых углов и импеданса источника, что позволит характеризовать надлежащим образом источники гармоник.

Согласно этому подходу, заказчик предоставляет данные, необходимые для оптимизации конструкции фильтра: конфигурации системы переменного тока, характеристики линий и удаленных установленных фильтров, сопротивление относительно земли, частотно-зависящие эквивалентные модели для конечных узлов (сбалансированные и нулевые последовательности, если необходимо), тип подключения силовых трансформаторов и т. д.

Примечания

1 Для узловых систем с большим количеством линий такой подход может оказаться практически невозможным, однако, если станция ПТВН получает питание от одного или, может быть, двух фидеров переменного тока, то использование показателя эквивалентного тока помехи может представляться наиболее точной оценкой для телефонных помех.

2 Определение пределов телефонных помех посредством проведения детальных исследований повлечет за собой привлечение больших материальных и временных затрат на этапе разработки технических требований, однако проведение такого анализа приведет к оптимизации конструкции фильтров с точки зрения телефонных помех, уменьшит полную стоимость системы и позволит исключить непреднамеренные ситуации, связанные с жалобами от телефонных компаний.

5.2.3 Пределы для кратковременных помех телефонной связи

Если телефонная компания допускает повышенный уровень шума на короткий период времени, то в технических требованиях следует предусмотреть менее строгие пределы помех телефонной связи при кратковременных режимах:

- кратковременные перегрузки;
- выход напряжения переменного тока за пределы нормально длительного диапазона;

- работа на предельных отклонениях частоты или асимметрии напряжения;
- редко возникающие конфигурации сети переменного тока;
- отключение звеньев фильтра;
- ненормальные условия на стороне постоянного тока, например, высокие углы управления для временного регулирования реактивной мощности или работа при уменьшенном напряжении.

Кратковременные помехи могут превышать в 2—3 раза нормальный допустимый уровень телефонных помех.

Кратковременные пределы телефонных помех должны быть согласованы с телефонными компаниями.

5.2.4 Специальные критерии

Приведенные ниже условия, как правило, не оказывают непосредственного влияния на предельные значения параметров, определенные в технических требованиях или на компоновку фильтров переменного тока, однако они должны быть учтены при разработке технических требований. Заказчик должен быть осведомлен о возможных проблемах и изучить возможность следующих действий в применимых случаях:

- безопасность персонала при воздействии наведенного в телекоммуникационных линиях напряжения;
- неправильная работа телекоммуникационного оборудования (например, прохождение вызывных звонков);
- влияние на передачу данных и сигнальное оборудование железной дороги;
- влияние на измерительное и управляющее оборудование системы релейной защиты переменного тока.

6 Расчет гармоник тока преобразователя

6.1 Общие сведения

При проектировании фильтров переменного тока необходимо рассчитать амплитуду и фазу гармонических токов, генерируемых преобразователями. Расчет гармонических токов должен производиться изготовителем на основе данных об оборудовании преобразователя и его взаимодействии с примыкающими системами переменного и постоянного тока.

6.2 Гармоники тока, генерируемые преобразователем

6.2.1 Идеальные условия

При идеальных условиях не учитывается асимметрия импедансов трансформатора или углов включения между вентилями, постоянный ток идеально сглажен, а синусоидальное напряжение переменного тока сбалансировано.

Идеальная форма фазного тока на стороне переменного тока преобразовательных трансформаторов в составе 12-импульсного моста с линейной коммутацией приведена на рисунке 1. Отдельными линиями показана кривая тока вентильной обмотки, подключенной по схеме звезда-звезда трансформатора, кривая тока вентильной обмотки, подключенной по схеме звезда-треугольник, и сумма двух токов.

Формулы для расчета гармоник преобразователя приведены в [4]. Одна из формул приведена в приложении Б.

Анализ Фурье идеальных форм токов при подключениях по схеме звезда-звезда и звезда-треугольник с учетом всех трех фаз показывает, что:

- представлены только гармоники 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... $6k \pm 1$ порядка (k — положительное целое число). Эти гармоники определены как «6-импульсные» гармоники или гармоники с «6-импульсной характеристикой»;
- гармоники 5, 11, 17, 23, ... $6k - 1$ — обратная последовательность чередования фаз;
- гармоники 7, 13, 19, 25, ... $6k + 1$ — прямая последовательность чередования фаз;
- амплитуда каждой гармонической составляющей одинакова для обеих форм тока при подключениях по схеме звезда-звезда и звезда-треугольник;
- угол каждой гармонической составляющей одинаков для обеих форм тока при подключениях по схеме звезда-звезда и звезда-треугольник для гармоник 11, 13, 23, 25, ... $12k \pm 1$;

- угол каждой гармонической составляющей смещен по фазе на 180° для обеих форм тока при подключениях по схеме звезда-звезда и звезда-треугольник для гармоник 5, 7, 17, 19, ... ($12k - 6$) ± 1.

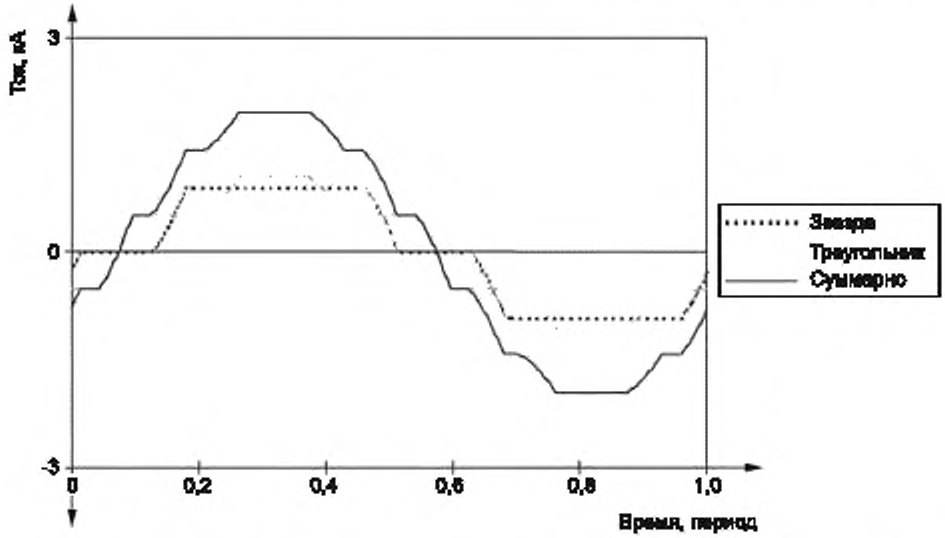


Рисунок 1 — Идеальная форма фазного тока на стороне переменного тока трансформатора преобразователя

Параметры:
- F = 50 Гц — частота в сети переменного тока;
- U_{ac} = 230 кВ — напряжение в сети переменного тока;
- U_d = 500 кВ — напряжение в сети постоянного тока;
- I_d = 1000 А — постоянный ток;
- X_l = 14 % — реактивное сопротивление коммутации;
- α = 15° — угол включения.

Так как гармонические токи не изменяются и в идеальных условиях не подвергаются воздействию со стороны подключенного импеданса на стороне переменного тока, то преобразователь при проведении гармонического анализа следует рассматривать в качестве источника гармонического тока.

6.2.2 Реальные условия

Амплитуда гармоник идеальной формы кривой тока зависит только от амплитуды переменного тока, значения постоянного тока, реактивного сопротивления в цепи вентиля и угла включения. В реальных условиях (разброс углов включения, несимметрия оборудования, взаимодействие гармоник сторон постоянного и переменного тока через преобразователь) в токе сетевой обмотки преобразовательного трансформатора возникает спектр неканонических гармоник.

Для корректного определения амплитуд и фазных углов гармоник следует учитывать следующие факторы:

- наличие пульсаций и гармоник тока в выпрямленном токе;
- существующие гармоники в сети переменного тока (в том числе внешних по отношению к преобразователю источников гармоник, таких как другие подстанции постоянного тока, статические тиристорные компенсаторы);
- асимметрия, то есть наличие обратной последовательности на основной частоте напряжения переменного тока, образующаяся в результате небаланса нагрузок вблизи преобразователя постоянного тока, сильно нагруженных нетранспонированных линий электропередачи, питающих преобразователь, несимметричных коротких замыканий и/или двухфазного режима во время однофазного повторного включения;
- асимметрия между углами включения для подключенных по схеме звезда-звезда и звезда-треугольник групп вентилей;
- разница в подаче отдельных отпирающих импульсов на каждый тиристорный вентиль;

- асимметрия между приложенными напряжениями переменного тока для подключенных по схеме звезда-звезда и звезда-треугольник групп вентилей вследствие различия между соотношениями обмоток трансформаторов или отпайками обмоток;
- небаланс реактивного сопротивления в цепи вентиля между фазами трансформатора преобразователя;
- небаланс реактивного сопротивления в цепи вентиля между трансформаторами преобразователей, образующими 12-импульсные группы;
- взаимодействие гармоник через преобразователь;
- явление насыщения преобразовательного трансформатора.

Некоторые из перечисленных выше характеристик, например величина постоянного тока, средний угол включения и среднее реактивное сопротивление в цепи вентиля, рассчитываются с использованием параметров схемы преобразователя и установившихся режимов системы постоянного тока. Другие характеристики, как, например, отклонения углов включения для каждого тиристорного вентиля и гармонические искажения на шинах переменного тока, не могут быть определены заранее, они принимают случайные значения.

Осциллограмма фазного тока сетевой обмотки преобразовательного трансформатора, полученная с учетом реальных условий эксплуатации, приведена на рисунке 2.

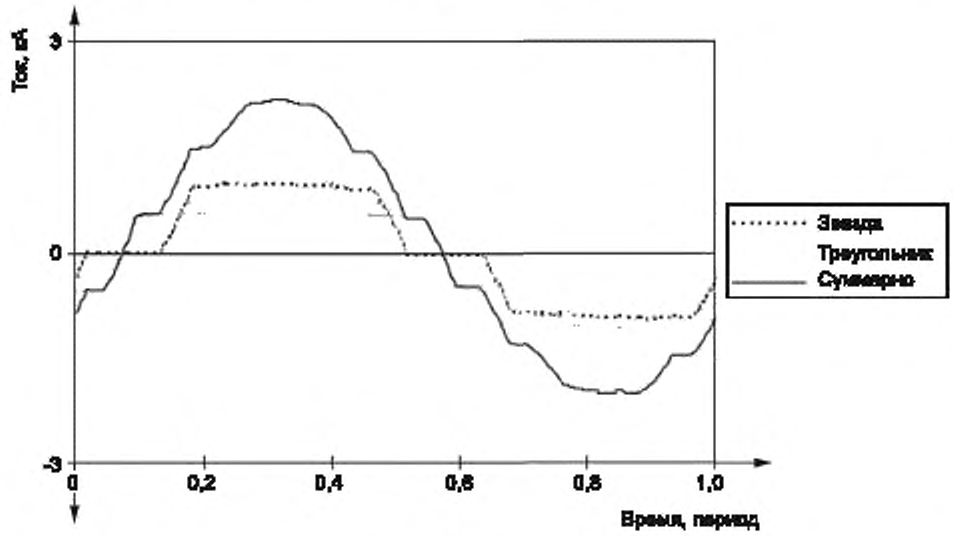
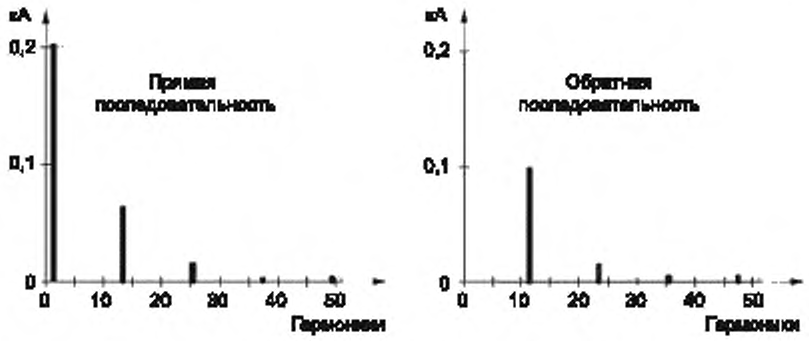


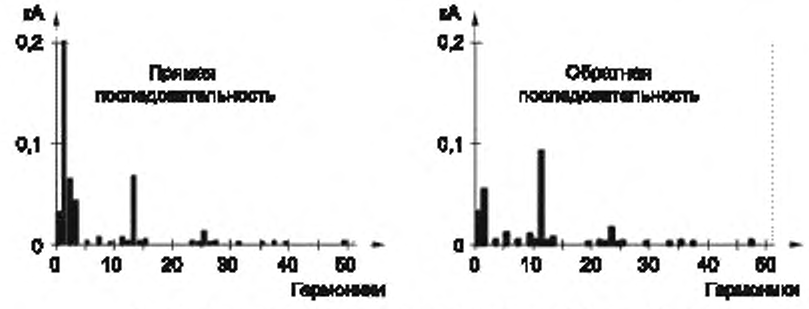
Рисунок 2 — Осциллограмма фазного тока сетевой обмотки преобразовательного трансформатора с учетом реальных условий эксплуатации

Те же параметры, что и на рисунке 1, с учетом следующих факторов:
- 1 % — напряжение первой гармоники обратной последовательности,
- 1 % — напряжение второй гармоники прямой последовательности;
- 5 % (от X_l) — небаланс реактивного сопротивления между фазами;
- ±0,5° — небаланс углов включения между группами, подключенными по схеме звезды и схеме треугольника;
- наличие гармоник с частотой 50 Гц и 100 Гц на стороне постоянного тока.

На рисунке 3 приведены спектры гармоник фазного тока преобразовательного трансформатора в идеальных и реальных условиях.



а) Гармоническая составляющая тока на рисунке 1 (идеальные условия)



б) Гармоническая составляющая тока на рисунке 2 (реальные условия)

Рисунок 3 — Сравнение спектра гармоник тока сетевой обмотки преобразовательного трансформатора в идеальных и реальных условиях

6.3 Методика расчета

6.3.1 Общая информация

Если не оговорено иное, то для расчета гармонических токов можно использовать типовой метод, который заключается в математическом воссоздании формы кривой тока, возникающей при одной определенной комбинации всех учитываемых параметров оборудования, режимов и факторов, с последующим применением тригонометрического анализа Фурье для этой формы кривой с целью выделения гармонических составляющих. После этого изменяется один или несколько параметров режимов и факторов в заданном диапазоне и производится следующий анализ Фурье. Этот процесс повторяется для большого числа комбинаций всех переменных. Если параметр, например реактивное сопротивление в цепи вентиля, может принимать случайное значение в пределах диапазона, то случайный выбор такого значения может быть сделан с помощью метода Монте-Карло. Производится сравнение гармонических токов, полученных в каждом случае с помощью анализа Фурье, после чего используются наибольшие значения, полученные из всех случаев.

Изготовитель может использовать различные методы расчета гармонических искажений. В технических требованиях может быть определен метод расчета гармонических токов по требованию заказчика.

В технических требованиях следует указать возможность использования статистических методов для определения величины гармонической составляющей вследствие случайных различий между такими параметрами фаз, как, например, углами включения и реактивными сопротивлениями в цепи вентиля, и указать уровень достоверности, который должен быть гарантирован. Если не указано иное, то принимается условие, согласно которому амплитуда любой используемой в расчетах неканонической гармоники не более, чем в 1 % от всех возможных случаев, или не должна быть меньше 90 % от предельного значения, рассчитанного для комбинации параметров в наихудшем случае.

6.3.2 Факторы, подлежащие учету при расчете гармоник, генерируемых преобразователем

Ниже приведены факторы, подлежащие учету при расчете канонических и неканонических гармоник, генерируемых преобразователем.

а) Величина постоянного тока, углы включения, погасания и коммутации. Если для балансировки реактивной мощности допускаются режимы работы с увеличенными углами управления, то эти значения углов управления должны быть учтены при расчете гармонических токов.

б) Уровень передаваемой мощности постоянного тока, в том числе в режиме работы с перегрузкой.

Примечание — По мере повышения перетоков мощности в системе постоянного тока осуществляют подключение дополнительных фильтров переменного тока для подавления повышенной генерации гармонических искажений и компенсации реактивной мощности. Для создания экономичной конструкции системы фильтрации выполняют отдельный расчет гармонических токов для каждого диапазона мощности, в котором может быть подключен отдельный набор фильтров переменного тока. Изготовитель выполняет расчет генерируемых гармоник во всем полном диапазоне мощности в системе постоянного тока через определенные интервалы приращения мощности (как правило, в диапазоне от 5 % до 10 % от номинальной мощности системы постоянного тока). После того, как будут определены точки коммутации фильтров, необходимо рассчитать генерацию гармонических искажений для этих точек, и, в некоторых случаях, с меньшими интервалами между расчетными точками.

в) Диапазон изменения напряжения примыкающей системы переменного тока.

г) Погрешности параметров преобразовательного оборудования: отклонение реактивного сопротивления в цепи вентиля, разброс сопротивлений обмоток преобразовательных трансформаторов, разброс углов управления.

д) Ступени отпаек обмоток преобразовательных трансформаторов.

Примечание — Различия характеристик отпаек могут учитываться при расчете уровней генерации гармонических искажений преобразователем только для разных трансформаторов двух полюсов в составе биполярной системы ПТВН.

е) Напряжения обратной и нулевой последовательности на шинах переменного тока.

Примечания

1 Напряжение обратной последовательности на шинах преобразователя переменного тока приводит к появлению гармоник порядка $6k - 3$, где k — любое положительное целое число (то есть гармоники имеют следующий порядок — 3, 9, 15 и т. д.), обратно на те же шины переменного тока, и, посредством системы постоянного тока, на удаленные шины переменного тока. Наиболее значительной является третья гармоника. Величина составляющей обратной последовательности, которая задана для шин переменного тока преобразователя, является важным фактором. При напряжении обратной последовательности больше, чем на 1 %, возможно, что создаваемый преобразователем гармонический ток третьей гармоники будет настолько большим, что потребуется применение дорогостоящего фильтра для подавления третьей гармоники. В некоторых случаях более целесообразно с экономической точки зрения улучшить качество напряжения в системе переменного тока, например, посредством применения транспозиции в линиях.

2 Так как напряжение обратной последовательности, как правило, меняется в течение времени и редко достигает своих экстремальных значений, то допустимо использовать меньшее значение напряжения обратной последовательности при расчете эксплуатационных показателей (например, 1 %), чем при расчете номинальных параметров (например, 2 %). Этот вопрос подлежит тщательной проработке при подготовке технических требований, так как влияние на стоимость фильтра третьей гармоники может быть значительной.

3 Если преобразовательная подстанция находится близко к генерирующей станции, то напряжение обратной последовательности на ее шинах может быть значительно ниже, чем во всей остальной части системы, что может устранить необходимость применения фильтра для подавления третьей гармоники.

4 Так как напряжение нулевой последовательности не передается через трансформатор преобразователя (вследствие подключения обмоток трансформатора на стороне тиристорного вентиля по схеме звезда или треугольник без заземления), то напряжения нулевой последовательности на шинах преобразователя переменного тока не оказывают непосредственного влияния на генерацию неканонических гармоник.

ж) Насыщение преобразовательного трансформатора.

При передаче электроэнергии посредством длинных линий постоянного тока имеет место наведение в системе постоянного тока гармоник токов основной частоты от близко проложенных линий электропередачи переменного тока. Такие гармоники трансформируются на сторону переменного тока в виде постоянной составляющей тока и второй гармоники прямой последовательности. Это приводит к протеканию постоянного тока в обмотках преобразовательного трансформатора на стороне вентиля. Возникающее в результате этого насыщение на стороне постоянного тока приводит к генерации гармоник широкого спектра в намагничивающем токе на стороне переменного тока трансформатора преоб-

разователя. Кроме этого, постоянный ток или ток низкой частоты, возникающий вследствие паразитного постоянного тока от расположенных поблизости электродов или, возможно, индуцированного геомагнитным способом тока, протекает через нейтраль трансформаторов, что приводит к подобному сдвигу в характеристиках намагничивания и увеличению генерации гармонических колебаний.

и) Взаимодействие гармоник сторон постоянного и переменного тока через преобразователь.

Возникающие вследствие взаимодействия гармоник через преобразователь гармонические напряжения прямой или обратной последовательности на шинах переменного тока приводят к появлению неканонических гармоник токов в системе переменного тока с порядками, расположенными на два порядка вверх и два порядка вниз. Например, гармоническое напряжение прямой последовательности 4-го порядка на шинах переменного тока преобразователя приводит к появлению гармонических токов обратной последовательности 2-го порядка. Аналогичным образом гармоническое напряжение обратной последовательности 4-го порядка на преобразователе приводит к появлению гармонических токов прямой последовательности 6-го порядка. Также генерируются токи дополнительных гармоник, однако их амплитуда меньше, чем амплитуда этих преобладающих гармоник. Появление одной гармоники на стороне переменного тока приводит к появлению гармоники на стороне постоянного тока, что, в свою очередь, приводит к появлению следующей гармоники на стороне переменного тока и т. д.

Гармонические токи на стороне постоянного тока передаются на сторону переменного тока в виде двух гармоник:

- гармоника прямой последовательности, одна гармоника вверх от гармоники на стороне постоянного тока;

- гармоника обратной последовательности, одна гармоника вниз от гармоники на стороне постоянного тока.

Пульсации постоянного тока, как правило, состоят из гармоник с порядком $2k$, где k = 1, 2 плюс, возможно, 2-я гармоника.

Примечание — Учет взаимного влияния гармоник более подробно рассмотрен в ГОСТ Р 59032.3.

к) Проникновение гармоник из одной сети переменного тока в другую через вставку постоянного тока (ВПТ).

Примечание — В ВПТ с низкой величиной реактивного сопротивления сглаживающего реактора на стороне постоянного тока или без сглаживающего реактора возможно проникновение гармоник с частотой одной системы переменного тока в другую. Если основные частоты двух систем переменного тока одинаковы, то возникающие в удаленной системе гармоники могут суммироваться или вычитаться из гармоник, возникающих в примыкающей системе, в зависимости от разницы в углах сдвига фаз двух напряжений преобразователей на шинах переменного тока. При создании одного набора гармоник, который учитывает оба эффекта, зачастую предполагается, что сдвиг фаз гармонических колебаний носит случайный характер, и величина, равная квадратному корню из суммы квадратов, может считаться приемлемой для таких расчетов, связанных с определением эксплуатационных показателей. При определении номинальных параметров часто делается консервативное предположение, что обе частоты являются идентичными, что приводит к возникновению синфазных гармоник. В этом случае, амплитуда гармоник для получения эквивалентного тока будет определяться путем арифметического сложения.

Если основные частоты двух систем переменного тока не одинаковы, то токи могут генерироваться на частотах, которые не являются кратными частоте прилегающей системы. Хотя эти частоты не являются гармоническими, они должны учитываться при проектировании фильтров.

Если линии переменного тока подключены к двум сторонам ВПТ с использованием общих опор и маршрута значительной длины, то это приведет к образованию индуктивной связи и возникновению несинхронных гармоник в обеих системах переменного тока.

л) Генерация интергармоник. В случае подключения передачи ПТВН или ВПТ к двум системам переменного тока с различной основной частотой, оба преобразователя могут генерировать токи на соответствующих сторонах переменного тока с частотами, которые отличаются от гармоник основной частоты. Системы переменного тока могут иметь разные номинальные частоты, например 50 Гц и 60 Гц, или же частоты могут быть одинаковой величины, но колебаться в пределах от 1 до 2 Гц около номинального значения. Искажения, возникающие на частотах, которые являются гармониками основной частоты удаленной системы переменного тока, называются интергармониками и передаются через контур постоянного тока.

Примечание — Из-за интергармоник могут возникать следующие проблемы:

а) помехи для систем управления;

б) мерцание освещения вследствие амплитудной модуляции на низкой частоте, вызванной биением гармонической частоты, вследствие воздействия прилегающих интергармоник;

в) работа при пониженном напряжении постоянного тока.

6.3.3 Теоретически взаимно компенсированные гармоники

В некоторых случаях различаются «теоретически взаимно компенсированные» и прочие неканонические гармоники. К теоретически взаимно компенсированным гармоникам относятся гармоники порядка 5, 7, 17, 19, ... ($12k - 6$) ±1, то есть те гармоники, которые являются каноническими для каждой 6-импульсной группы вентилей, однако которые взаимно компенсируются в идеальном 12-импульсном преобразователе. Фактически неполное компенсирование возникает вследствие небольших различий между двумя 6-импульсными группами вентилей. Если расчет гармоник 12-импульсного режима производится для 12-импульсной мостовой преобразовательный схемы, то автоматически рассчитываются величины теоретически взаимно компенсированных гармоник для наихудшего случая.

Если расчет производится для отдельных 6-импульсных групп мостовой преобразовательной схемы, то в технических требованиях следует указать, что величины реактивного сопротивления в цепи вентиля и разброс углов управления, которые использовались для двух групп, должны находиться в противоположных крайних точках практически возможных диапазонов, за исключением тех случаев, когда подрядчик может гарантировать, что различие между средними величинами этих параметров для двух групп не будет превышать некоторую определенную величину. Это позволит определить наихудшее значение величины теоретически взаимно компенсированных гармоник.

6.3.4 Комбинирование гармоник от различных преобразовательных мостов

Наиболее распространенной проблемой с несколькими источниками гармоник является комбинирование гармоник от подключенного по схеме звезда-звезда преобразователя с гармониками от преобразователя, подключенного по схеме звезда-треугольник. Наилучший подход заключается в рассмотрении 12-импульсного преобразователя в качестве единого целого и расчете гармоник непосредственно для 12-импульсного преобразователя.

Так как количество переменных, используемых для расчета гармоник для 12-импульсного преобразователя, приблизительно в два раза больше переменных, используемых для одного 6-импульсного преобразователя, то количество операционных режимов увеличивается практически в квадрате. Если по этой причине прямой расчет 12-импульсных гармоник с использованием метода расчета изготовителя не представляется возможным, то гармоники для индивидуальных преобразователей могут быть определены раздельно, после чего объединены математически для получения полного набора.

Для преобразователей в одном полюсе 12-импульсные канонические гармоники и неканонические гармоники (за исключением теоретически взаимно компенсируемых гармоник) могут быть определены как сумма наибольших амплитуд гармоник для отдельных преобразователей. Теоретически взаимно компенсируемые гармоники рассчитываются как наибольшие разницы в амплитудах гармоник для отдельных преобразователей. При расчете таких гармоник необходимо учитывать отклонение реактивного сопротивления, а также расчетное отклонение отношения напряжений обмоток трансформаторов, подключенных по схеме звезда и треугольник. Также следует учитывать среднюю погрешность угла включения между двумя группами.

Если преобразователи подключены к разным полюсам, то рекомендуется учитывать отличающиеся условия эксплуатации для двух полюсов, возникающие вследствие разбалансировки постоянного тока между полюсами, в особенности, если разрешается длительная работа с постоянным током в нейтрали. Это приведет к разнице в амплитуде и фазовых углах между гармониками, генерируемыми в двух полюсах.

7 Определение эффективности фильтрации

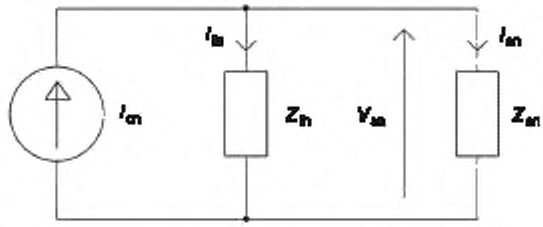
7.1 Общие сведения

Для всех рассматриваемых вариантов схем фильтров переменного тока следует провести оценку эффективности фильтрации с учетом условий, заданных в технических требованиях.

Для проведения требуемых вычислений рекомендуется использовать специализированное программное обеспечение, которое необходимо указать в технических требованиях.

7.2 Методика расчета

Если не оговорено иное, то для расчета характеристик фильтров следует использовать модель (см. рисунок 4), содержащую источник гармонического тока, представляющий преобразователь ПТВН, включенный параллельно с импедансом фильтров и импедансом для гармоник в системе переменного тока.



I_{cn} — инжекция гармонических токов от преобразователя, Z_{fn} — импеданс для гармоник фильтра, I_{fn} — гармонический ток фильтра; Z_{sn} — импеданс для гармоник в системе переменного тока; I_{sn} — гармонический ток в системе переменного тока; V_{sn} — гармоническое напряжение в системе переменного тока

Рисунок 4 — Модель цепи для расчета фильтра

Ток фильтра может быть определен по формуле

$$I_{fn} = \frac{Z_{sn}}{Z_{sn} + Z_{fn}}, \tag{4}$$

а гармонические искажения напряжения — по формуле

$$V_{sn} = \frac{Z_{sn} \cdot Z_{fn}}{Z_{sn} + Z_{fn}} \cdot I_{cn} = \frac{I_{cn}}{Y_{sn} + Y_{fn}}, \tag{5}$$

где Y_{sn} — проводимость для гармонических искажений в системе переменного тока;

Y_{fn} — проводимость фильтра для гармонических искажений.

В этих уравнениях генерируемый на преобразовательной подстанции выпрямителем или инвертором гармонический ток I_{cn} должен рассчитываться изготовителем для всех гармоник. Импеданс для гармоник в сети системы Z_{sn} определяется в технических требованиях.

7.3 Выбор типа фильтра и расчет импеданса фильтра

В ходе проектирования фильтров переменного тока для использования в составе проекта ПТВН необходимо провести анализ различных схем фильтрации, приведенных в приложении В, и выполнить расчеты эффективности подавления гармонических искажений.

После выбора основных параметров конструкции фильтров требуется выполнить окончательную настройку параметров компонент фильтров с целью оптимизации их эксплуатационных характеристик, номинальных параметров и потерь.

К параметрам фильтровых звеньев относятся:

- частота настройки звена v;
- количество конденсаторов в фазе $n \cdot m$;
- установленная мощность конденсаторов (на три фазы), МВАр;
- выдаваемая реактивная мощность (на три фазы), МВАр;
- электрические параметры звеньев: C, мкФ, L, мГн.

7.4 Определение эффективности фильтрации

С использованием модели (см. рисунок 4) и определенных наборов гармонических токов преобразователя, должен быть произведен расчет индивидуальных гармонических напряжений, возникающих на Z_{fn}, с учетом импеданса сети.

После этого должна быть проведена оценка выполнения требований по допустимым уровням гармонических искажений напряжения на шинах подстанции и допустимым уровням помех телефонной связи в примыкающих линиях.

Если не оговорено иное, то для расчета K_U, TIF (или THFF), псофометрического тока I_p рекомендуется один из следующих методов.

а) Расчет K_U TIF (или THFF) должен производиться при импедансе сети переменного тока, подключенном к двум источникам гармоник (см. рисунок 4), что приводит к максимальному увеличению значения этого параметра, а для всех прочих гармоник импеданс системы переменного тока должен считаться, как для разомкнутого контура.

б) Если необходимо выполнить расчет K_U и TIF (или THFF) посредством учета всех гармоник в наихудших условиях сети переменного тока, то заданные пределы для таких параметров должны быть соответственно выше.

в) Значение псофометрического тока I_p можно определить посредством моделирования фазного эквивалентного импеданса с помощью параллельного подключения активного и реактивного сопротивлений. Величина реактивного сопротивления может быть определена исходя из уровня короткого замыкания, возникающего в линиях, моделированных с применением этого эквивалентного импеданса, а величина параллельно подключенного активного сопротивления может быть определена с использованием волнового импеданса прямой последовательности для таких линий. Такая модель не демонстрирует каких-либо резонансов, которые могут возникать в реальной системе; однако, она является хорошим компромиссным решением, позволяющим получить усредненные значения для рассматриваемого диапазона частоты.

Если уровень ранее существовавших гармонических искажений известен, то при расчете эффективности фильтрации необходимо учитывать сумму искажений преобразователя и ранее существовавших искажений. При определении суммарного искажения для каждой гармоники рекомендуется суммировать гармоники преобразователя и ранее существовавшие гармоники посредством вычисления квадратного корня из суммы квадратов, если не указаны данные об относительных фазных углах.

Перед разработкой технических требований следует провести тщательные исследования или измерения ранее существовавших гармоник в примыкающих системах переменного тока. Рекомендуется выполнить моделирование по методу эквивалентной схемы Тевенина, подключенной к шинам преобразователя, которая моделирует ранее существовавшие гармоники посредством источников напряжения, расположенных за эквивалентными импедансами для гармоник. Частота гармонической составляющей источника напряжения должна изменяться в определенном диапазоне для выявления условий резонанса для наихудшего случая, возникших посредством включения импеданса для гармоник фильтра.

7.5 Расстройка и погрешности

7.5.1 Общие сведения

В идеальных условиях фильтр должен быть точно настроен на подавление определенных частот. В реальности фильтры переменного тока работают в условиях расстройки в большей или меньшей степени. В технических требованиях следует указать способствующие расстройке факторы, которые следует принять во внимание при расчете эффективности фильтрации:

- изменения основной частоты в системе;
- изменения емкости фильтра вследствие температурных вариаций;
- изменения емкости фильтра вследствие отказа конденсаторных компонентов и старения;
- первоначальная расстройка фильтра вследствие погрешностей при изготовлении и/или дискретных отпаек на реакторах.

Примечание — Точно настроенные фильтры с высоким коэффициентом добротности Q в значительной степени зависят от изменения упомянутых выше факторов. Широкополосные фильтры с низким значением Q имеют меньшую зависимость от этих факторов.

7.5.2 Факторы расстройки

Ниже рассмотрены исходные данные для каждого из способствующих расстройке факторов.

а) Изменения основной частоты

В технических условиях следует указать диапазон частот, в котором должна соблюдаться эффективность фильтрации. Этот диапазон должен совпадать с максимальными изменениями частоты в системе в установившемся состоянии или может быть ниже для исключения нечастых или кратковременных предельных величин.

б) Изменения емкости

Емкость конденсаторов фильтра зависит от температуры. В технических требованиях следует указать пределы окружающей температуры, для которых должна соблюдаться эффективность фильтрации. Могут быть предусмотрены различные диапазоны температуры для расчета эксплуатационных характеристик и номинальных параметров, если экстремальные величины температур наблюдаются очень редко или носят кратковременный характер. Зависимость величины емкости от температуры предоставляется изготовителем конденсатора. Следует также принять во внимание изменения емкости вследствие нагрева от электрической нагрузки или солнечной радиации.

Допускается работа фильтра с несколькими неработающими конденсаторными элементами до определенного аварийного/предупредительного уровня. При расчете эксплуатационных характеристик следует учитывать изменение емкости, соответствующее этому максимально допустимому количеству отказавших элементов.

Примечание — Подход, при котором конденсаторная батарея каждого фильтра может эксплуатироваться с максимальным числом отказавших элементов, одновременно с тем, что температура и основная частота находятся за пределами заданного диапазона, означает, что получены консервативные эксплуатационные характеристики. Вероятность, что все параметры расстройки будут одновременно иметь максимальное значение, высокая, и это следует учитывать.

Изменение суммарной емкости вследствие температурных вариаций, вышедших из строя элементов и старения должно учитываться изготовителем фильтра.

в) Погрешности изготовителя и первоначальная расстройка

Каждый компонент в составе фильтра изготавливается согласно требованиям к погрешности. Такие погрешности должны быть включены в коэффициент расстройки при расчетах эффективности фильтрации. Для уменьшения коэффициента расстройки, а также для смягчения требований к точности изготовления, фильтры должны быть оснащены устройствами для настройки, наиболее распространенными из которых являются отпайки обмоток реакторов.

Если используются реакторы с отпайками обмоток, то требования к погрешностям могут быть снижены. Изготовителю фильтров рекомендуется оценить стоимость оснащения реакторов отпайками для обеспечения собственной точности изготовления реактора, плюс диапазон погрешностей, вносимых конденсатором, и выбрать такие варианты для погрешностей и отпаек, которые дают наименьшую общую стоимость.

Максимально возможная первоначальная расстройка будет соответствовать половине интервала для одной отпайки реактора, плюс запас на точность при настройке и точность измерительного оборудования. Если необходимы длительные интервалы между повторными настройками, то настройка фильтров может быть смещена для учета изменений емкости вследствие отказов и старения во время сервисного интервала.

г) Сезонная настройка

Если разница температур между летним и зимним периодами достаточно большая, следует рассмотреть возможность проведения сезонной подстройки для точно настроенных звеньев фильтров.

Примечание — К преимуществам метода сезонной настройки относят снижение стоимости фильтров и потерь в них. К недостаткам этого метода относят необходимость выполнения подстройки два раза в год и стоимость настройки (стоимость возможных отключений и стоимость рабочей силы).

7.5.3 Изменения сопротивления резисторов

Изготовитель должен оценить возможные изменения электрического сопротивления резисторов в зависимости от температуры. Элементы резисторов должны иметь низкий температурный коэффициент сопротивления.

Необходимо учитывать погрешность коэффициентов Q реакторов, особенно для точно настроенных фильтров. Величина коэффициента Q и погрешности зависит от заданных характеристик и специфической конструкции рассматриваемого реактора.

7.5.4 Моделирование

Для обеспечения точного моделирования влияющих на расстройку факторов необходимо, чтобы эти факторы были индивидуально представлены в модели в соответствии с тем, как они возникают в реальности. Гармонические частоты, для которых выполняется построение модели, должны соответствовать экстремальным точкам диапазона основной частоты, при этом должны применяться максимальные отклонения величин для каждого компонента, комбинированные таким образом, чтобы получить максимальную суммарную расстройку фильтра.

Следует применять такие методы расчета, которые отдельно моделируют отклонения частоты и индивидуальные расстройки компонентов. Для оценочных расчетов может быть применен метод эквивалентного отклонения частоты (см. приложение Г).

7.6 Методы моделирования импеданса сети при оценке эффективности фильтрации

7.6.1 Общие сведения

При проектировании фильтров переменного тока необходимо учитывать импеданс сети в целях предотвращения возникновения резонанса между фильтром и сетью. Используемое в процессе проектирования представление должно быть применимо ко всему диапазону возможных величин импеданса с учетом изменения импеданса сети с течением времени вследствие различных возникающих в процессе эксплуатации конфигураций, подключения нагрузок и генераторов, а также аварийного отключения основных компонентов. Это рекомендуется реализовывать посредством определения области величин импеданса некоторой формы, которая включает в себя все возможные значения. Для оценочных расчетов рекомендуется использовать метод моделирования сети с помощью диаграмм импедансов.

Примечание — Для определения импеданса сети используют различные методы. Вычисление импеданса можно производить с помощью компьютерных программ, которые способны моделировать элементы электроэнергетической системы в зависимости от частоты; точность подобных расчетов зачастую ограничена вследствие невысокой точности исходных параметров. Это зачастую приводит к пессимистической оценке импеданса сети и низкому демпфированию гармоник в сравнении с реальным импедансом в сети. Правильное моделирование изменений сопротивления компонента/ветви в зависимости от частоты, в частности, для трансформаторов и нагрузок, является важным фактором для точного определения демпфирования в сети. Рекомендуется учитывать разницу между импедансом для гармоник в сети для различных фаз, особенно, если импеданс сети в целом определяется длинными линиями переменного тока, учитывая то, что эффективность транспозиции может уменьшаться на частотах гармоник.

7.6.2 Моделирование сети переменного тока с использованием диаграммы импеданса

Если не оговорено иное, то для оценочных расчетов импеданс сети переменного тока может быть представлен в виде круговой или секторной диаграмм, в которых область *X*/*R* комплексной диаграммы импеданса определена для некоторого диапазона частот. Годограф импеданса сети переменного тока для различных условий системы и различных частот гармоник определен таким образом, чтобы находиться в пределах диапазона (границ) для этих областей.

При отсутствии других данных в отношении сети переменного тока границы представляют минимальный и максимальный импеданс короткого замыкания в системе. Ниже представлен упрощенный подход, который часто используется для определения минимального и максимального импеданса:

$$Z_{max} = Z_{max\ s.c.} \cdot n, \tag{6}$$

$$Z_{max} = Z_{max\ s.c.} \cdot \sqrt{n}, \tag{7}$$

для фазного угла.

- от 0° до 80° при $n < 5$;
- ±75° при $5 \le n < 11$;
- ±70° при $11 \le n \le 49$,

где $Z_{max\ s.c.}$ — максимальный импеданс короткого замыкания в сети переменного тока на основной частоте;

$Z_{min\ s.c.}$ — минимальный импеданс короткого замыкания в сети переменного тока на основной частоте.

Следует принять меры для обеспечения точности определения значения минимального импеданса, так как проблемы с гармониками будут более значимыми для конфигурации системы, соответствующей этому значению импеданса. Величина сопротивления сети, то есть демпфирования, также очень важна.

Необходимо учитывать следующие преимущества и недостатки диаграмм диапазона импеданса:

а) преимущества диаграмм диапазона импеданса:

1) относительная простота подготовки заказчиком и легкость осуществления систематического поиска наихудшего случая в соответствии с применяемым подрядчиком методом поиска;

2) возможно дополнение к диапазонам в качестве мер для компенсации будущих изменений в системе, можно также задать другие диапазоны для эксплуатационных характеристик и номинальных параметров;

б) недостаток диаграмм диапазона импеданса — включение нерасчетных диапазонов частот в область поиска импеданса.

В приложении Д приведены примеры диаграмм диапазона импеданса с оценкой их преимуществ и недостатков.

7.6.3 Детальное моделирование сети переменного тока при расчете эффективности фильтрации

Детальное моделирование сети переменного тока рекомендуется выполнять в следующих случаях:

а) при изучении гармоник низшего порядка, для которых анализ с использованием диапазона импеданса может ошибочно указать на необходимость применения фильтров низшего порядка;

б) когда станция ПТВН присоединена к единственной длинной линии электропередачи переменного тока. В этом случае импеданс на стороне переменного тока определяется в основном линией переменного тока, и изменения в сети на удаленном конце линии оказывают относительно небольшое влияние;

в) если асимметрия линии передачи электроэнергии и взаимная связь между фазами вдоль линии передачи электроэнергии оказывает воздействие на асимметрию между фазами, что оказывает влияние на область гармоник. Такое влияние может быть представлено надлежащим образом только с использованием детальной трехмерной модели. В случае необходимости применения детальной модели следует использовать трехфазное представление вместе с точным воспроизведением характеристик линий передачи электроэнергии, трансформаторов, генераторов и нагрузок на частотах гармонических колебаний. Сеть должна быть представлена на достаточном электрическом расстоянии от преобразователя, поэтому добавление дополнительных линий или нагрузок не приводит к значительному изменению результатов. Следует провести точный анализ влияния предполагаемых нагрузочных моделей и демпфирования. Для высоких частот (выше приблизительно двадцатой гармоники) маловероятно обеспечить достаточную точность детальной модели, так что для этих частот следует использовать диаграммы импеданса.

7.7 Аварийное отключение батарей фильтров и секций батарей фильтров

Общая система фильтрации может быть разделена на несколько батарей фильтра и секций батарей в составе фильтра в зависимости от требований к компенсации реактивной мощности, определяющих размеры батарей фильтра, и максимального скачка напряжения, допускаемого при коммутации фильтра согласно техническим требованиям. В технических требованиях следует указать требования касательно резервирования фильтров. Требования к резервированию оказывают влияние на выбор количества батарей фильтра и емкость каждой батареи, а также типы используемых батарей фильтра.

Должны быть выполнены требования к резервированию, это значит, что требуемая эффективность фильтрации должна быть соблюдена даже в случае выхода одного фильтра из строя, что означает создание более гибкой и надежной системы для условий эксплуатации. Полное резервирование связано со значительными издержками и, кроме этого, дополнительными требованиями к пространству. Резервирование фильтров может быть реализовано по схеме 2 × 100 %, или 3 × 50 %, 4 × 33,3 % и т. д. Требования к резервированию оказывают влияние на выбор количества батарей и емкость каждой батареи, а также типы используемых батарей фильтра.

В технических требованиях следует указать требования касательно резервирования фильтров. Кроме этого, значительное влияние оказывают общие требования к надежности. Для соблюдения требований к готовности и ремонтопригодности изготовитель во многих случаях должен изучить вопрос обеспечения резервирования фильтра. Следует отметить, что альтернативным/дополнительным подходом к соблюдению требований готовности и ремонтопригодности может быть применение всех компонентов с более высокими номинальными параметрами, рассчитанными на бóльшие нагрузки, чем это предусмотрено согласно расчетам, то есть завышение номинальных параметров компонентов. Также наличие запасных частей и время, необходимое для ремонта или замены частей, также являются факторами, которые следует учитывать в общей оценке готовности и ремонтопригодности.

Для ограничения стоимости и сложности фильтров переменного тока необходимо изучить возможность применения следующих допущений при выполнении требований к эффективности фильтрации:

- все фильтры должны находиться в режиме эксплуатации (то есть применяются требования к запрету на отключение фильтров) при расчете эффективности фильтрации для уровней постоянного тока (или мощности) выше 100 % от номинальной нагрузки;

- следует предусмотреть запрет на отключение фильтров для редко возникающего режима эксплуатации при пониженном напряжении или, если необходимо, следует снизить пределы эффективности фильтрации для этого режима эксплуатации;

- во время аварийного и/или кратковременного отключения батарей/секций батарей фильтров не допускается снижения эффективности фильтрации, особенно для гармоник высшего порядка;

- должно быть предусмотрено резервирование фильтра неканонических гармоник тока при его отключении, поскольку в этом случае возможно протекание критических значений неканонических гармоник тока низшего порядка, что может привести к повреждению оборудования преобразовательной подстанции в примыкающей системе переменного тока.

8 Требования к компенсации реактивной мощности и определение мощности конденсаторных батарей

8.1 Требования к компенсации реактивной мощности

При выборе параметров фильтровых звеньев электрических фильтров на стороне переменного тока необходимо учитывать требования к компенсации реактивной мощности.

Требования к компенсации реактивной мощности состоят из требований к потреблению реактивной мощности преобразователем, а также заданных заказчиком требований к перетокам реактивной мощности для преобразовательной подстанции в качестве функции от передачи активной мощности.

Для определения требований к компенсации реактивной мощности необходимо определить диапазон изменения потребности в реактивной мощности преобразователя и учесть ограничения на перетоки реактивной мощности для отходящих от преобразовательной подстанции линий.

При определении диапазона изменения потребностей в реактивной мощности преобразователя необходимо учитывать:

а) заданный диапазон передаваемой мощности;

б) диапазоны изменения углов управления преобразователя;

в) возможные режимы работы системы постоянного тока (биполярный, монополярный, режим холостого хода преобразователей).

Ограничения на перетоки реактивной мощности определяются исходя из анализа потокораспределения в установившемся режиме при различных условиях сети. При проведении таких исследований необходимо учитывать:

а) вероятные условия работы сети переменного тока;

б) способность генераторов к выдаче или потреблению реактивной мощности;

в) собственные способности преобразователей ПТВН к потреблению реактивной мощности для соответствия предусмотренным требованиям к перетоку.

Способность преобразователя к компенсации реактивной мощности в установившемся и в переходном режимах рассмотрена в Е.1, приложение Е.

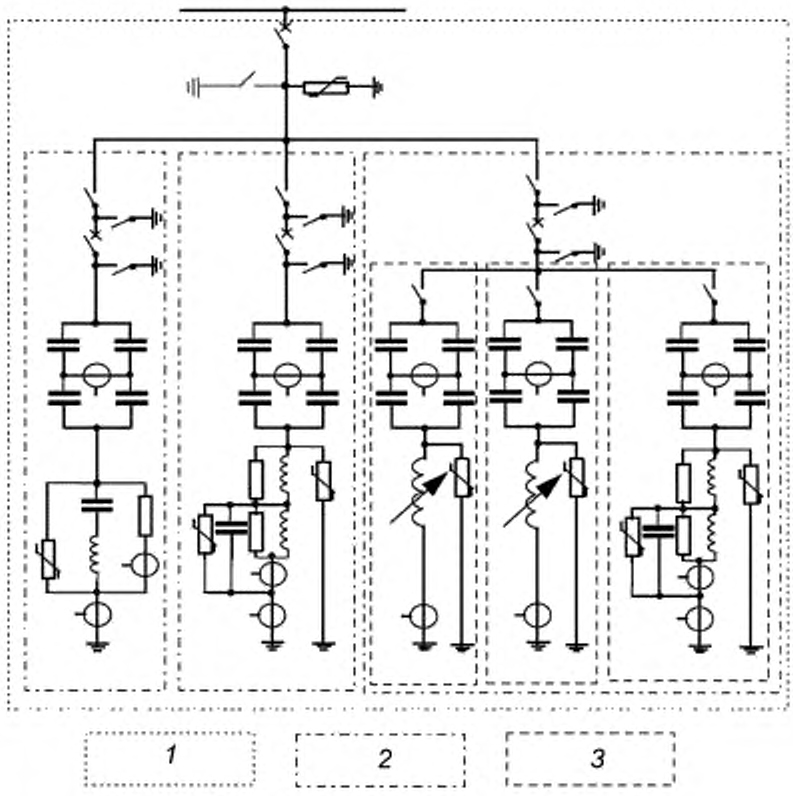
8.2 Выбор мощности батарей/кассет батарей фильтров

8.2.1 Общие сведения

Для целей фильтрации и регулирования реактивной мощности предусматриваются фильтры шунтирующего типа, состоящие из конденсаторов, реакторов и резисторов, соединенных соответствующим образом. Такие фильтры группируются для соответствия требованиям эффективности фильтрации, перетоку реактивной мощности и скачкообразному изменению напряжения на шинах преобразователя в момент коммутации. Такие группы называются батареями, секциями батарей и звеньев в зависимости от их электрической компоновки.

В технических требованиях должны быть указаны определения этих терминов, особенно применительно к требованиям к эффективности фильтрации в условиях отключения и максимально разрешенным отключениям фильтров, при которых можно продолжать работу.

Типовая компоновка, иллюстрирующая эти определения, приведена на рисунке 5.



1 — батарея; *2* — секция батареи, *3* — звено

Примечание — Секции фильтра обозначены пунктирными линиями.

Рисунок 5 — Определение ветви, секции батареи и батареи

8.2.2 Мощность звена, секции батареи или батареи

Мощность звена, секции батареи или батареи выражается в единицах чистой реактивной мощности, подаваемой в точку подключения (для ветви) или на общие шины (для секции батареи или батареи) при номинальной основной частоте системы переменного тока, напряжении на шинах и номинальных величинах компонентов.

Эффективность фильтрации традиционного пассивного фильтра при подавлении определенной гармоники или набора гармоник прямо пропорциональна его мощности. Большие разрешенные пределы на переток реактивной мощности и скачкообразное изменение напряжения уменьшают потребность в секциях батарей/батарей и упрощают широкополосные фильтры. Максимальные размеры секций батарей/батарей также зависят от отключающей способности выключателя.

Выбор мощности зависит от следующих факторов:

- заданная величина перетока реактивной мощности;
- требования к эффективности фильтрации;
- скачкообразное изменение напряжения при коммутации;
- напряжение на шинах;
- требования к резервированию.

Величина допустимого изменения напряжения в установившемся режиме, вызванного коммутацией фильтров, должна определяться действующими нормами заказчика. Если такие нормы не предусмотрены, то следует руководствоваться консервативным подходом, согласно которому предельная величина изменения должна находиться в диапазоне от 1 % до 2 %. Необходимо учитывать влияние за-

данного скачка напряжения на конструкцию и стоимость фильтра переменного тока и изучить возможность изменения заданного предела, если такое изменение оказывает критическое воздействие. При подключении к слабой системе переменного тока, если известно, что мощность системы переменного тока будет повышена вскоре после установки системы постоянного тока, или если шины переменного тока преобразователя электрически удалены от существующей системы переменного тока и к ним не присоединена локальная нагрузка, могут допускаться большие изменения напряжения, например от 3 % до 5 %.

Применительно к переходным скачкообразным изменениям напряжения допускаются переходные изменения напряжения 2 % и 3 % соответственно для частых (приблизительно 5 и больше раз в день) или менее частых (1 раз в день) коммутирующих операций. Для очень редких коммутирующих операций (от пяти до 10 операций в месяц) могут быть приемлемыми большие изменения (до 5 %), однако это должно быть сравнимо с изменениями напряжения, которые ожидаются для других коммутирующих операций такой же периодичности, например, включение линии. Такие изменения могут быть оправданы, принимая во внимание преобладающее использование современных устройств управления системами ПТВН и технологий тиристорных вентилей, которые способны исключить нарушения коммутации и прочие переходные возмущения.

В тех условиях, когда не представляется возможным сбалансировать требования к перетокам реактивной мощности и/или требования к шагу коммутации, совмещенные с экономически целесообразной мощностью фильтров, то можно подключить фильтры к третичной обмотке (низкого напряжения) трансформатора преобразователя.

Требования к обеспечению резервирования оказывают влияние на суммарную установленную мощность фильтра в зависимости от того, применяются ли они на уровне компонента, ветви, секции батареи или батареи. Требования к резервированию на уровне батареи значительно удорожают конструкцию фильтра, и поэтому их применять не рекомендуется, если только это не оказывает критическое влияние с точки зрения операционной или подстанционной надежности.

8.2.3 Гистерезис точек коммутации фильтровых звеньев

Точки коммутации секций батарей/батарей фильтров при повышении уровня мощности преобразователя следует определять с учетом следующих факторов:

- минимальная фильтрация;
- требования к потреблению реактивной мощности преобразователя;
- допустимое потребление реактивной мощности от примыкающей сети переменного тока.

Рекомендуется исключить частое переключение, которое может возникать вследствие колебания мощности преобразователя. Для исключения износа выключателей секций батарей/батарей и неблагоприятного воздействия при работе сети (например, пульсации напряжения), отключение секций батарей/батарей рекомендуется производить при меньшем уровне мощности преобразователя, чем включение. Точки включения и выключения рекомендуется отделять друг от друга определенным интервалом мощности преобразователя, составляющим приблизительно 5 % от номинальной мощности.

Интервал между точками включения и отключения секций батарей/батарей применительно к активной мощности именуется «гистерезисом» или «зоной нечувствительности».

Максимально допустимая величина гистерезиса между точками включения и отключения зависит от следующих факторов:

- наибольшей мощности секции батареи/батареи;
- изменения в генерации реактивной мощности вследствие включения наибольшей секции батареи/батареи или ранее включенных секций батареи/батарей;
- изменения в потреблении реактивной мощности инвертора вследствие коммутации наибольшей секции батареи/батареи (это применимо только для расчета максимальной разницы между точками включения и отключения и только для выпрямителя).

При коммутации секций батарей/батарей фильтров не должно возникать длительно незатухающих колебаний напряжения на шинах подстанции.

Существует оперативная потребность в определенной минимальной временной задержке для разряда перед тем, как выполнить повторное включение ветви/секции батареи/батареи. Длительность такой временной задержки зависит от разрядных резисторов, используемых в конденсаторах. Если по оперативным причинам возникнет необходимость в повторном включении ветви/секции батареи/батареи на короткий период времени, то допускается использовать трансформаторы напряжения разряда. Эти трансформаторы также могут быть использованы в системах защиты.

Допускается использовать преобразователь ПТВН для контроля напряжения на шинах переменного тока в точках переключения фильтра (или поблизости от этих точек). Эта функция позволяет использовать способность преобразователя к временному потреблению реактивной мощности и рассматривается в Е.2, приложение Е.

8.2.4 Операции при увеличенных углах управления преобразователя

Режимы преобразователя при увеличенных углах α/δ могут иметь место при следующих условиях:

- работе линии передачи электроэнергии при пониженном уровне напряжения постоянного тока, например, по условиям работы изоляции линии при повышенном загрязнении;
- принятых низких пределах обмена реактивной мощности преобразователя с сетью;
- при низких уровнях мощности преобразователя.

В условиях чрезмерно жестких пределов обмена реактивной мощностью, в дополнение к работе при повышенных углах α/δ, рекомендуется предусмотреть использование шунтирующих реакторов и их одновременную коммутацию вместе с секциями батарей фильтров.

Работа при увеличенных углах включения рассматривается в Е.1, приложение Е.

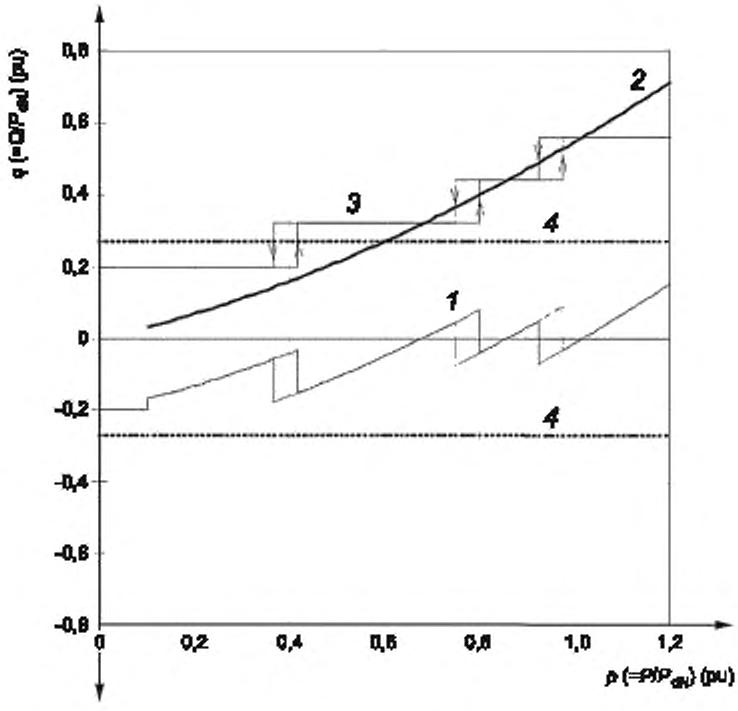
8.3 Последовательность коммутации фильтров и эффективность фильтрации

Точки включения фильтров определяются требованиями к фильтрации и реактивной мощности. Тип фильтров определяется с учетом оговоренных требований к фильтрации и импедансом для гармоник в сети переменного тока. Базовые фильтры должны иметь ветви, настроенные на доминантные гармоники, и включаться первыми таким образом, как это необходимо для соблюдения эксплуатационных показателей и исключения перегрузки широкополосных фильтров. К ним относятся ветви верхних частот для двадцать четвертой гармоники, которые, как правило, включаются при высоких уровнях мощности постоянного тока.

Последовательность отключения рекомендуется выполнять обратно последовательности включения.

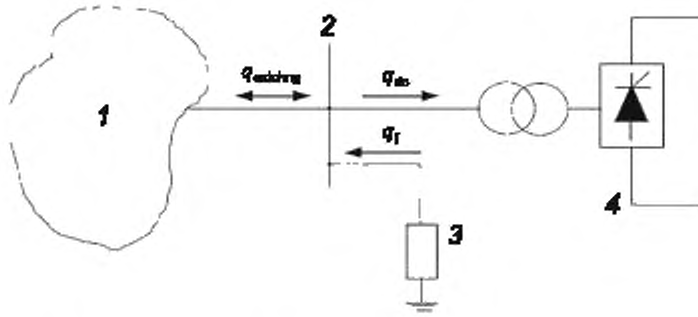
Как правило, за исключением возможных низких уровней мощности постоянного тока, точки включения, которые заданы исходя из необходимости соблюдения эксплуатационных показателей (так называемые «минимальные требования фильтра»), соответствуют более высоким уровням мощности постоянного тока в сравнении с фактическими точками включения, которые выбираются исходя из требований как к фильтрации, так и к реактивной мощности. Количество подлежащих включению батарей/секций батарей, как правило, определяется потреблением реактивной мощности преобразователем и пределами потребления, особенно на высоких уровнях мощности преобразователя.

Типовая последовательность коммутации приведена на рисунке 6, где кривая *1* — фактический обмен реактивной мощностью преобразовательной подстанции с сетью переменного тока; кривая *2* отображает потребление реактивной мощности преобразователем. Точки коммутации секций батарей/батарей показаны на кривой *3* ($q_{extchng}$) при типовой конструкции фильтра переменного тока. На кривой *4* показан допустимый диапазон обмена реактивной мощностью ($q_{ac(limit)}$) с сетью переменного тока. На рисунке 7 приведено графическое представление этих компонентов реактивной мощности.



1 — фактическая реактивная мощность между преобразовательной подстанцией и сетью переменного тока ($q_{extchng}$); *2* — потребляемая преобразователем реактивная мощность (q_{dc}); *3* — реактивная мощность конденсаторной батареи фильтра на стороне переменного тока (q_f), *4* — допустимый диапазон обмена реактивной мощностью с сетью переменного тока ($q_{ac(limit)}$)

Рисунок 6 — Типовая последовательность коммутации



1 — сеть переменного тока; *2* — шины переменного тока преобразователя;
3 — элементы реактивной мощности/фильтра переменного тока; *4* — преобразователь ПТВН

Рисунок 7 — Компоненты реактивной мощности

Приложение А
(справочное)

Определение параметров помех телефонной связи

А.1 Общие сведения

Ниже приведены определения для наиболее часто используемых эксплуатационных показателей для помех телефонной связи вместе с типовыми величинами этих эксплуатационных показателей. Эксплуатационные показатели представлены для двух основных категорий — критерии, которые широко используются в странах, которые следуют европейской практике, и критерии, которые обычно применяются в странах, которые следуют североамериканской практике.

А.2 Критерии согласно европейской практике

Следующие критерии широко используются в странах, которые следуют европейской практике.

А.2.1 Коэффициент формы телефонных гармоник THFF вычисляют по формуле

$$\mathrm{THFF} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{U_n}{U} \cdot F_n \right)^2}, \tag{А.1}$$

где U_n — гармоническая составляющая напряжения порядка n;

N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

U — суммарное среднеквадратичное фазное напряжение, рассчитываемое по формуле

$$U = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} U_n^2}, \tag{А.2}$$

$$F_n = p_n \cdot n \cdot \frac{f_o}{800},$$

где p_n — коэффициент псофометрического взвешивания;

f_o — основная частота (50 Гц).

Установленный предел для коэффициента THFF в системах ПТВН, как правило, составляет приблизительно 1 %.

А.2.2 Псофометрический ток I_p, определенный по формуле

$$I_p = \frac{1}{p_{800}} \cdot \sqrt{\sum_f (h_f \cdot p_f \cdot I_f)^2}, \tag{А.3}$$

где h_f — коэффициент, который является функцией частоты, и который учитывает тип связи между соответствующими линиями. По соглашению $h_{800} = 1$;

p_f — коэффициент псофометрического взвешивания на частоте f;

I_f — составляющая тока, вызывающего возмущение, при частоте f.

В практических случаях приведенная выше формула может быть выражена в виде двух компонентов — сбалансированного (гармоники прямой и обратной последовательности) и остаточного (гармоники нулевой последовательности) эквивалентных токов помехи для трехфазной линии следующим образом:

1) сбалансированный компонент:

$$I_{pe} = \frac{1}{16} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (n \cdot p_n \cdot I_n)^2}, \tag{А.4}$$

где n — порядок гармоники;

N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

I_n — сбалансированный компонент тока в фазе для гармоники n.

2) остаточный компонент:

$$I_{rpe} = \frac{1}{16} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (n \cdot p_n \cdot I_{rn})^2}, \tag{А.5}$$

где I_{rn} — остаточный ток (сумма компонентов нулевой последовательности) для гармоники n.

Эквивалентный ток помехи был использован в нескольких проектах систем ПТВН, однако нет документально подтвержденных данных относительно заданных пределов. Приведем несколько справочных значений для типовой линии передачи электроэнергии, полученных на основании финского опыта:

$$7\ \text{А} < I_{\text{pe}} < 20\ \text{А}$$

$$1\ \text{А} < I_{\text{rpe}} < 3\ \text{А}.$$

А.3 Критерии согласно североамериканской практике

Следующие критерии широко используются в странах, которые следуют североамериканской практике.

А.3.1 Коэффициент помех телефонной связи TIF вычисляют по формуле

$$\text{TIF} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (U_n \cdot W_n)^2}}{U_1}, \tag{А.6}$$

где U_n — среднеквадратичное напряжение для одной частоты для гармоники n;

N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

U_1 — фазное напряжение на основной частоте (среднеквадратичное);

W_n — взвешивающий коэффициент TIF для одной частоты для гармоники n, вычисляемый по формуле

$$W_n = C_n 5 n f_o, \tag{А.7}$$

где C_n — взвешивающий коэффициент С-типа;

n — порядок гармоники;

f_o — основная частота (60 Гц).

В строгом определении коэффициента TIF в знаменателе используется среднеквадратичное *фазное* напряжение, однако приведенное выше определение широко применяется в сфере ПТВН для задания эксплуатационных показателей для фильтров переменного тока. Погрешность, возникшая вследствие использования величины напряжения на основной частоте в знаменателе очень мала для типовых значений общего гармонического искажения в системах энергоснабжения высокого и сверхвысокого напряжения.

Типовые заданные значения TIF находятся в диапазоне от 15 до 50.

А.3.2 Произведение IT вычисляют по формуле

$$\text{IT} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (I_n \cdot W_n)^2}, \tag{А.8}$$

где I_n — среднеквадратичный ток гармоники n;

N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

W_n — взвешивающий коэффициент TIF гармоники n, вычисляемый по формуле (А.7).

Типовые заданные значения IT в отходящих линиях переменного тока преобразовательной подстанции ПТВН находятся в диапазоне от 15 000 до 50 000.

А.3.3 Эквивалентный ток помехи вычисляют по формуле

$$I_{\text{eq}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (H_n \cdot C_n \cdot I_n)^2}, \tag{А.9}$$

где N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

H_n — взвешивающий коэффициент, приведенный к опорной частоте (1000 Гц), который учитывает зависимость взаимной связи от частоты, влияние экранирования и баланс канала связи для гармоники n;

C_n — взвешивающий коэффициент С-типа;

I_n — эквивалентный ток помехи гармоники n (как правило, соответствует току нулевой последовательности).

В тех случаях, когда предполагается, что гармонические токи в сбалансированном режиме будут вносить значительный вклад в наведенные помехи, они должны быть включены в расчет I_{eq}. Эффективный ток помехи определяют по формуле

$$I_n = \sqrt{(I_{\text{rn}})^2 + (K_b \cdot I_{\text{bn}})^2}, \tag{А.10}$$

где I_{rn} — суммарный ток в остаточном режиме для гармоники n;

K_b — коэффициент связи токов в сбалансированном и в остаточном режимах на основной частоте;

I_{bn} — ток в сбалансированном режиме для гармоники n.

Эквивалентный ток помехи редко используется для определения требований к уровню телефонных помех для линии переменного тока, питающей систему ПТВН. В одном из случаев его применения были указаны пре-

дельные величины в диапазоне от 150 до 800 мА. Концепция эквивалентного возмущающего тока также использовалась в линиях передачи электроэнергии постоянного тока, для которых согласно опыту эксплуатации было определено, что для нормальной работы диапазон типовых значений должен составлять от 0,1 до 1,0 А.

А.4 Комментарии

Европейские и североамериканские определения очень похожи. Действительно, взвешивающий коэффициент для С-кривой и коэффициент псофометрического взвешивания практически идентичны. За исключением этих факторов, коэффициенты TIF и THFF отличаются только на постоянное отношение 4000 (то есть 5 nf_0 вместо nf_0/800).

Подобным образом, принятая в Америке методика I_{eq} является вариацией принятого в Европе I_p, при этом опорная частота и взвешивающий коэффициент изменены согласно американскому подходу. Коэффициент IT может рассматриваться в качестве частного случая I_{eq}, для которого коэффициент H_n изменяется линейно с изменением частоты и приведен к частоте 1000 Гц. Для этого частного случая отношение между IT и I_{eq} равно 5000.

Принятая линейная зависимость от частоты для H_n в целом считается достаточной для стандартной телефонной проводной системы и типовых характеристик воздействия. Принято, что методика IT используется для расчета только с гармоническими токами в сбалансированном режиме. Методика I_{eq} имеет преимущество, так как учитывает индукцию в сбалансированном и в остаточном режимах, а кроме этого, эта методика может быть настроена в соответствии с потребностями конкретного проекта ПТВН посредством определения коэффициента H_n для отражения характеристик соответствующей системы, в то время как принятая линейная зависимость от частоты не считается применимой (например, вследствие высокой проводимости грунта).

Коэффициенты TIF и THFF представляют собой безразмерные величины, которые определяют искажение формы напряжения, а не абсолютную величину.

Приведенный выше расчет коэффициентов TIF и THFF выполняют с использованием в качестве опорного напряжения суммарного напряжения, полученного как среднеквадратическая сумма напряжения на основной частоте и напряжений на частотах всех гармоник. В большинстве случаев в технических требованиях на системы ПТВН вместо этого используется номинальное напряжение на основной частоте или фактическое напряжение на основной частоте, относящееся к условиям эксплуатации. Заказчик должен определенно указать, какое напряжение следует использовать.

Максимальный порядок гармоник, используемый при расчетах, должен быть больше, чем порядок, который используется для расчета гармонических искажений напряжения, вследствие относительного веса гармоник высшего порядка и характеристик связи. Теоретически следует рассматривать гармоники с частотой до 5000 Гц, однако на практике в большинстве технических условий указывается максимально пятидесятая гармоника.

Приложение Б
(справочное)

Формулы для расчета канонических гармоник для мостового преобразователя

Приведенные ниже формулы используются для определения канонических гармоник для мостового преобразователя. Эти формулы базируются на предположении о существовании идеальных симметричных условий для преобразователя ПТВН, а также идеальном сглаживании постоянного тока.

Следует учитывать множество реальных факторов, которые перечислены в разделе 6, способных изменить амплитуду канонических гармоник и создать неканонические гармоники.

Амплитуда гармонических токов преобразователя на стороне линии I_n для каждой гармоники с порядком n определяют по формулам

$$I_n = F_n \cdot \frac{U_{valve}}{U_{line}} \cdot N_b \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d, \quad (Б.1)$$

где F_n — коэффициент затухания;
U_{valve} — номинальное напряжение на фактической отпайке трансформатора со стороны вентиля, кВ;
U_{line} — номинальное напряжение на фактической отпайке трансформатора со стороны линии переменного тока, кВ;
N_b — количество 6-импульсных мостов, из которых состоит преобразователь;
I_d — фактический постоянный ток, А.

Коэффициент затухания F_n определяется согласно формуле

$$F_n = \frac{1}{2\varepsilon} \cdot \sqrt{A^2 + B^2 - 2 \cdot A \cdot B \cdot \cos(2\alpha + \gamma)}, \quad (Б.2)$$

где ε — относительное падение напряжения вследствие коммутации;
A и B — вспомогательные функции;
α — угол управления преобразователя, градусы;
γ — угол коммутации, градусы.

Вспомогательные функции A и B:

$$A = \frac{1}{n+1} \cdot \sin(n+1)\frac{\gamma}{2}, \quad (Б.3)$$

$$B = \frac{1}{n-1} \cdot \sin(n-1)\frac{\gamma}{2}. \quad (Б.4)$$

Относительное падение напряжения вследствие коммутации ε задается с помощью формулы:

$$\varepsilon = dx_N \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{dioN}}{U_{dio}}, \quad (Б.5)$$

где dx_N — относительное падение индуктивного напряжения при номинальных условиях;
I_d — фактический постоянный ток, А;
I_{dN} — номинальный постоянный ток, А;
U_{dioN} — номинальное напряжение постоянного тока холостого хода, В;
U_{dio} — фактическое напряжение постоянного тока холостого хода, В.

При работе при номинальном напряжении постоянного тока холостого хода приведенная выше формула упрощается до следующего выражения:

$$I_n = F_n \cdot \frac{U_{valve}}{U_{line}} \cdot N_b \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_{dN}, \quad (Б.6)$$

$$F_n = \frac{1}{2dx_N} \cdot \sqrt{A^2 + B^2 - 2 \cdot A \cdot B \cdot \cos(2\alpha + \gamma)}, \quad (Б.7)$$

где I_n — гармонический ток на стороне системы переменного тока, А;
N — порядок гармоник $n = (kp) \pm 1$, p — количество импульсов, $k = 1, 2, 3, ...$;
F_n — коэффициент затухания, о.е.

Приложение В
(справочное)

Типовые схемы фильтров гармоник на стороне переменного тока

В.1 Общие сведения

Существует множество схем, которые могут применяться для фильтров на стороне переменного тока в составе преобразовательных станций ПТВН. В настоящем приложении рассматриваются преимущества и недостатки различных схем фильтров. В настоящем приложении анализируются подключенные параллельно фильтры.

Утверждения относительно конструкций фильтров для систем высокого и сверхвысокого напряжения применимы также к фильтрам для систем среднего напряжения (в диапазоне киловольт), например к фильтрам на третичных обмотках трансформаторов.

Выбор оптимальной конструкции фильтра возлагается на подрядчика, и конструкция фильтра может изменяться в зависимости от параметров проекта ПТВН. На конструкцию оказывают влияние различные факторы, которые могут быть определены заказчиком:

- заданные пределы гармонических искажений (гармоники тока в линиях, искажение напряжения, факторы помех телефонной связи);
- условия системы переменного тока (изменения напряжения питания, изменения частоты, напряжение обратной последовательности, импеданс для гармоник в примыкающей системе);
- мощность коммутируемого фильтра, которая определяется предельным скачком напряжения, балансом реактивной мощности, пределами самовозбуждения для расположенных поблизости синхронных машин и т. д.;
- влияние окружающей среды (диапазон температур окружающей среды);
- стратегия управления преобразователем (регулирование напряжения или реактивной мощности);
- площадь подстанции (ограниченное количество коммутационных присоединений);
- критерии оценки потерь;
- требования к доступности и надежности.

Анализ ранее применяемых схем ПТВН может предоставить типовые решения для определенных схем. Такой подход может применяться только в качестве рекомендации или исходной концепции; для получения оптимальной конструкции необходима детальная проработка.

В настоящем приложении представлены результаты анализа преимуществ и недостатков, присущих некоторым широко распространенным конфигурационным схемам фильтров, для проектировщиков и разработчиков систем ПТВН. Так как во внимание принимают только аспекты конструкции и эксплуатационные показатели фильтров, то дополнительное оборудование, как, например, разрядники для защиты от перенапряжений, трансформаторы тока и напряжения, вынесены за рамки рассматриваемых цепей. Ограничители перенапряжений (ОПН) для защиты от перенапряжений в системах высокого и сверхвысокого напряжения, как правило, используют в конструкциях фильтров для повышения уровня прочности изоляции оборудования.

Уровень защиты и способность к поглощению энергии таких разрядников будут рассмотрены при подробном анализе переходных процессов.

В.2 Преимущества и недостатки типовых фильтров

Следующие общие рассуждения применяются ко всем конфигурациям фильтров, описание и сравнительные характеристики которых приведены ниже.

Заземление фильтров. Применяемые в системах ПТВН фильтры имеют, как правило, глухо заземленную нейтраль в системах с напряжением свыше 66 кВ и иногда 110 кВ. В системах низкого напряжения, нейтраль фильтра может быть заземлена или не заземлена, в зависимости от требований местных нормативных документов. Альтернативно нейтраль фильтра может быть заземлена через реактор.

Положение реактора. Как показано на рисунках В.1—В.7, реактор подключен к нейтральному концу цепи, хотя на практике реактор может подключаться к стороне высокого напряжения.

В случае подключения на стороне высокого напряжения цепи реактор будет находиться под воздействием токов короткого замыкания в случае возникновения короткого замыкания на землю в конденсаторной батарее. При этом требуется, чтобы реактор был рассчитан на ток расчетного короткого замыкания с подтверждением посредством надлежащего типового испытания, что, таким образом, увеличивает общую стоимость реактора. Такая компоновка позволяет реализовать схемы конденсаторной защиты от асимметрии на выводе нейтрали, что минимизирует стоимость их проектирования.

Если реактор подключен к стороне нейтрали цепи, то через реактор не протекают большие токи короткого замыкания и, следовательно, конструкция может быть проще, что исключает необходимость проведения дорогостоящих типовых испытаний. В этом случае для схемы защиты конденсатора требуется применение высоковольтных трансформаторов тока или напряжения, что повышает стоимость.

Расположение реактора может также оказать влияние на переходное восстанавливающееся напряжение, возникающее на контактах выключателя при отключении коротких замыканий на участках между реактором и конденсаторной батареей. В некоторых случаях установка реакторов со стороны линии запрещена вследствие отрицательного эффекта на переходное восстанавливающееся напряжение выключателя.

В.3 Классификация типов фильтров

В.3.1 Настроенные фильтры

Такие фильтры настраиваются на определенную частоту или частоты. Эти фильтры характеризуются относительно высоким коэффициентом добротности *Q*, как следует из формулы (В.3), то есть они имеют незначительное затухание. Резистор фильтра может подключаться последовательно с конденсатором и индуктивностью или параллельно индуктивности, и в таком случае резистор имеет большую величину. Настраиваемые фильтры также именуются узкополосными фильтрами. Примеры настроенных фильтров приведены в В.4.1—В.4.3, включая однополосные (например, одиннадцатая гармоника), двухполосные (например, одиннадцатая/тринадцатая гармоники) и трехполосные (т. е. пятая/одиннадцатая/тринадцатая) настроенные фильтры.

В.3.2 Широкополосные фильтры (демпфирующие фильтры)

Такие фильтры предназначены для подавления более чем одной гармоники, например, фильтр, настроенный на двадцать четвертую гармонику, может подавлять двадцать третью и двадцать пятую гармоники. В состав широкополосных фильтров всегда входит резистор, подключенный параллельно индуктивности, который осуществляет демпфирование частот, расположенных выше частоты настройки. Как правило, этот резистор имеет низкое сопротивление для создания большого демпфирования; выбор будет зависеть от необходимости соблюдения эксплуатационных показателей, достижения достаточно низкого активного электрического сопротивления на высоких частотах и исключения недопустимо высоких потерь на основной частоте. Если такие фильтры рассчитаны на большое демпфирование на частоте, расположенной выше частоты настойки, то такие фильтры также могут именоваться фильтрами верхних частот (HP). Примеры настроенных фильтров приведены в В.5.1 и В.5.2, включая однополосные настроенные демпфирующие фильтры верхних частот (например, HP12) и двухполосные настроенные демпфирующие фильтры верхних частот (например, HP12/24).

В.3.3 «Порядок» фильтра

Выражение «порядок» относится к порядку передаточной функции фильтров. Фильтр первого порядка — контур *C* или *R—C*, то есть шунтирующий конденсатор. Фильтр второго порядка — контур *L—C*, например, настроенный фильтр (см. рисунок В.2) или широкополосный фильтр (см. рисунок В.5). Фильтр третьего порядка содержит дополнительную конденсаторную батарею, например, настроенный двухполосный фильтр (см. рисунок В.3) или широкополосный фильтр (см. рисунок В.6).

Порядок фильтра иногда используется для однозначного определения типа рассматриваемого фильтра, например, широкополосный фильтр верхних частот второго порядка (согласно В.5.1) или широкополосный фильтр верхних частот третьего порядка (см. В.5.2).

В.4 Настроенные фильтры

В.4.1 Одночастотные настроенные фильтры

Это наиболее простая схема фильтров, состоящая из реактора, подключенного последовательно с конденсаторной батареей. На рисунке В.1 приведены схема цепи, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики типового фильтра, настроенного на одиннадцатую гармонику.

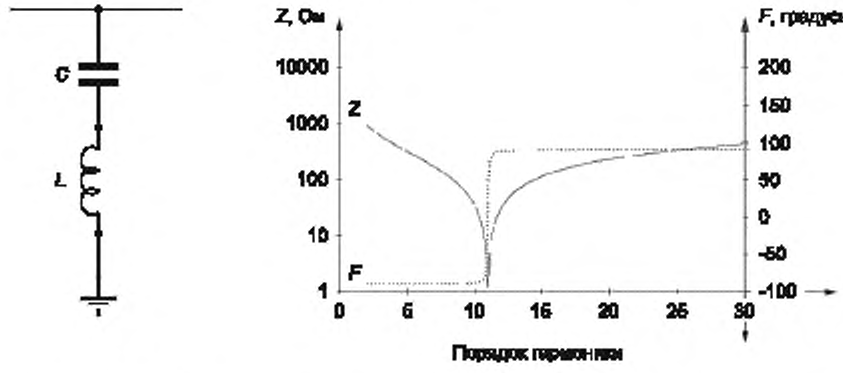


Рисунок В.1 — Одночастотный настроенный фильтр, амплитудно-частотная характеристика (*Z*), фазо-частотная характеристика (*F*)

Создание пути для тока одной гармоники с очень низким импедансом, ограниченным только сопротивлением r реактора, осуществляется посредством выбора величин емкости C и индуктивности L для создания последовательного резонанса для гармоник одной частоты:

$$2\pi f_0 nL = \frac{1}{2\pi f_0 nC}, \tag{В.1}$$

принимая во внимание

$$n = \frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{LC}}, \tag{В.2}$$

где f_0 — основная частота;

n — номер гармоники.

Посредством надлежащего выбора коэффициента добротности Q реактора и таким образом коэффициента добротности Q фильтра, где

$$Q = \frac{2\pi f_0 nL}{r} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{r}, \tag{В.3}$$

могут регулироваться эксплуатационные характеристики фильтра вблизи от частоты настройки. Потери фильтра будут определяться величинами Q на основной частоте и на частоте настройки. Необходимо принять во внимание, что сопротивление и, следовательно, величина Q реактора зависят от частоты. Изготовители реакторов могут спроектировать реактор с любым заданным коэффициентом добротности Q. Если для одночастотного настроенного фильтра требуется исключительно низкий коэффициент Q, то возможно последовательное включение резистора с небольшим сопротивлением.

Так как фильтры такого типа настроены только на одну гармонику, то может потребоваться несколько фильтров для подавления группы канонических гармоник (гармоники с порядком 11, 13, 23, 25 и т. д.).

Вследствие того, что эффективность фильтра зависит от применимости формулы (В.1), если значение f_0 отличается от номинального, то фильтр не будет настроен на требуемую гармонику. Аналогично если величины C и L при изготовлении отличаются от номинальных, что неизбежно, поскольку следует принять во внимание заводские погрешности, то с использованием формулы (В.2) невозможно точно определить требуемый порядок гармоники. Это можно преодолеть посредством регулирования величин C и/или L. Что касается конденсаторной батареи, которая определяет генерацию реактивной мощности, то предпочтительно поддерживать величину C неизменной и осуществлять регулировку посредством величины L. Это может быть достигнуто посредством применения обычных отпаек обмоток реактора, однако это ведет к повышению стоимости, как правило, на (10—20) % и снижению надежности реактора.

Так как величина емкостного сопротивления зависит от температуры, что получается согласно формуле (В.2), то при изменении температуры окружающей среды изменяется настройка фильтра.

Преимущества одночастотных фильтров:

1) простое подключение с двумя компонентами;
2) оптимальная настройка для одной гармоники;
3) низкие потери;
4) низкие требования к техническому обслуживанию.

Недостатки одночастотных фильтров:

1) для разных гармоник требуется несколько звеньев фильтра;
2) подверженность эффектам расстройки;
3) может потребоваться переключение отпаек реактора.

В.4.2 Двухчастотные настроенные фильтры

Фильтры этого типа эквивалентны двум параллельно подключенным настроенным фильтрам, однако реализованы в качестве одного комбинированного фильтра. Номинальные параметры реактивной мощности для комбинированного двухчастотного настроенного фильтра являются суммой номинальных параметров двух настраиваемых фильтров. На рисунке В.2 приведены схема цепи, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики типового фильтра, настроенного на одиннадцатую/тринадцатую гармонику.

К шинам высокого напряжения подключены конденсаторная батарея $C1$ и реактор $L1$; все остальные компоненты работают при низком напряжении. Площадь, требуемая для двухчастотного фильтра, будет меньше, чем площадь, требуемая для двух одночастотных фильтров, а кроме этого, необходим только один коммутирующий аппарат высокого напряжения. Защита требуется только для одной конденсаторной батареи высокого напряжения, что также снижает стоимость.

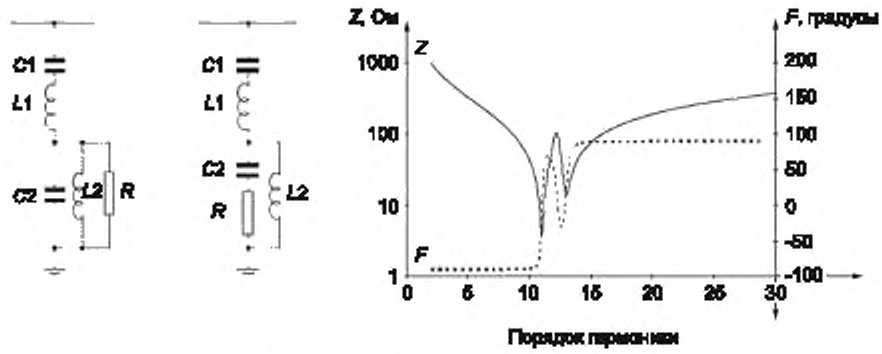


Рисунок В.2 — Двухполосный настроенный фильтр, амплитудно-частотная характеристика (*Z*), фазо-частотная характеристика (*F*)

Так как каждый подключенный фильтр может быть настроен на две гармоники, то появляется больше стимулов к установке идентичных фильтров, что позволяет получить преимущества при проектировании, испытаниях и в стоимости запасных частей. Повышается степень резервирования фильтров, что приведет к общему повышению надежности подстанции.

Точно так же, как и одночастотные настраиваемые фильтры (см. В.4.1), этот фильтр подвержен расстройке вследствие смещения частоты, изменения температуры окружающей среды и точности изготовления компонентов. Может потребоваться регулировка переключения отпаек обмоток для компенсации влияния точности изготовления.

Наличие параллельного контура *C2*—*L2* приводит к циркуляции гармонических токов, которые в конденсаторе могут превысить ток первой гармоники по сравнению с током в С1 и *L*1. Это создает трудности с надлежащей защитой от максимального тока для батареи *C*2. В действительности в большинстве случаев батареи *C*2 устанавливаются без предохранителей. Амплитуда таких циркулирующих токов может контролироваться посредством уменьшения величины коэффициента *Q*, то есть увеличением электрического сопротивления реактора *L*2 или включением резистора *R* в состав цепи. Увеличение электрического сопротивления реактора может быть достигнуто с помощью увеличения потерь в обмотках, например, посредством использования проводников с меньшей площадью сечения, увеличения потерь рассеяния в конструктивных элементах или добавления дополнительного материала для увеличения потерь на вихревые токи.

Если для контроля циркулирующих токов используется резистор, то такой резистор может подключаться последовательно с конденсаторной батареей *C*2 или параллельно с обоими компонентами *C*2 и *L*2 (см. рисунок В.2).

Выбор двух частот настройки оказывает влияние на амплитуду этих резонансных токов, следовательно, если частоты широко разделены, то параллельные резонансные токи уменьшаются.

Двухчастотный настраиваемый фильтр обеспечивает лучшее демпфирование на частотах, расположенных между двумя частотами настройки, по сравнению с одночастотными настроенными фильтрами.

Во время штатной коммутации батареи или коротких замыканиях в системе, переходные напряжения и токи на конденсаторе *C*2 могут значительно превышать перегрузочную способность конденсатора, определенную для установившегося режима. При этом может потребоваться увеличение номинального напряжения конденсаторной батареи *C*2 сверх расчетных номинальных параметров для установившегося режима с целью выдерживать такие импульсные возмущения. Переходные явления накладывают дополнительные нагрузки на разрядники для защиты от перенапряжений, которые используются для повышения уровня прочности изоляции низковольтных компонентов.

Преимущества двухчастотных фильтров:

1) оптимальная настройка для двух гармоник;

2) меньшие потери в сравнении с двумя отдельно настраиваемыми ветвями;

3) для фильтрации двух гармоник необходим только один конденсатор и реактор высокого напряжения;

4) устраняется проблема с минимальным размером фильтра для гармоник с небольшой амплитудой;

5) меньшее число типов звеньев, обеспечение резервирования фильтра.

Недостатки двухчастотных фильтров:

1) подверженность эффектам расстройки, может потребоваться регулировка переключения отпаек обмоток;

2) переходные процессы могут играть определяющую роль при расчете номинальных параметров компонентов низкого напряжения;

3) сложность подключения для четырех или пяти компонентов *C*—*L*—*R;*

4) может потребоваться два разрядника для защиты от перенапряжений для обеспечения требуемой прочности изоляции.

В.4.3 Трехчастотные настроенные фильтры

Фильтры этого типа электрически эквивалентны трем параллельно подключенным настроенным фильтрам, однако реализованы в качестве одного комбинированного фильтра. На рисунке В.3 приведены схема цепи, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики типового фильтра, настроенного на двенадцатую/двадцать четвертую/тридцать шестую гармоники.

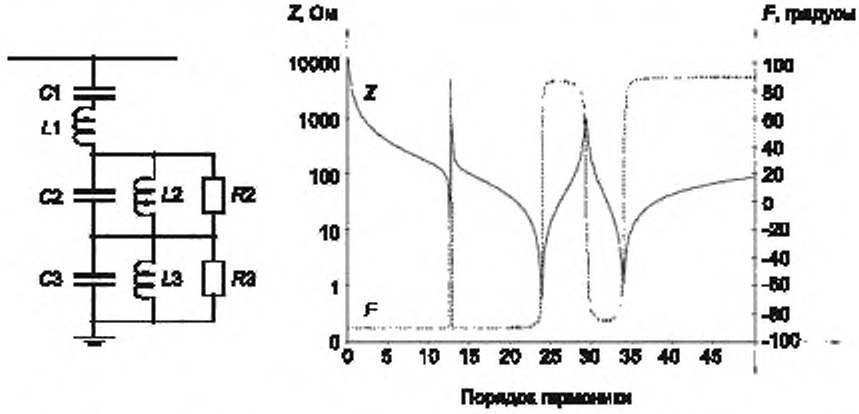


Рисунок В.3 — Трехчастотный настроенный фильтр, амплитудно-частотная характеристика (*Z*), фазо-частотная характеристика (*F*)

Хотя этот фильтр имеет сложную конструкцию, но эта компоновка позволяет надлежащим способом осуществить фильтрацию трех гармоник. Этот фильтр может быть рассчитан на три канонические гармоники для регулирования уровня гармонических искажений (например, гармоники 12/24/36) или на две канонические гармоники и одну неканоническую гармонику (например, гармоники 3/12/24) для исключения возможных проблем с резонансом.

Использование фильтров с тремя настраиваемыми частотами может улучшить эксплуатационные требования к системе регулирования реактивной мощности. Это может быть особенно важно в условиях небольших нагрузок, когда для компенсации реактивной мощности фильтра третьей гармоники может потребоваться шунтирующий реактор. Такая минимизация генерации реактивной мощности может быть важной для исключения самовозбуждения расположенных поблизости генераторов. Если предусмотрены низкие уровни TIF и IT, то такие фильтры могут обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики. Рассматриваемые фильтры по сути аналогичны двухчастотным фильтрам, их преимущества и недостатки рассматривались в В.4.2.

Преимущества трехчастотных фильтров:

1) оптимальная настройка для трех гармоник;
2) меньшие потери в сравнении с тремя отдельно настраиваемыми ветвями;
3) для фильтрации трех гармоник необходим только один конденсатор и реактор высокого напряжения;
4) устраняет проблему с минимальным размером фильтра для гармоник с небольшой амплитудой;
5) меньшее число типов звеньев, обеспечение резервирования фильтра.

Недостатки трехчастотных фильтров:

1) подверженность эффектам расстройки;
2) может потребоваться регулировка переключения отпаек обмоток;
3) переходные процессы могут играть определяющую роль при расчете номинальных параметров компонентов низкого напряжения;
4) сложность подключения для семи или восьми компонентов *C*—*L*—*R*;
5) может потребоваться два или три разрядника для защиты от перенапряжений для обеспечения требуемой прочности изоляции.

В.5 Широкополосные фильтры

В.5.1 Широкополосный фильтр второго порядка (фильтр верхних частот)

В фильтрах с такой топологией демпфирующий резистор *R* подключен параллельно с последовательным реактором *L*. На рисунке В.4 приведены схема цепи, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики широкополосного фильтра с минимальным импедансом на одиннадцатой гармонике.

Степень демпфирования широкополосного фильтра с подключенным параллельно реактору резистором может быть определена в терминах коэффициента добротности *Q* или коэффициента демпфирования *m*, которые соответственно рассчитывают по формулам

$$Q = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}}, \tag{В.4}$$

или

$$m = \frac{L}{R^2 C}. \tag{В.5}$$

Примечание — Это определение обратно определению коэффициента Q для фильтра, в котором резистор подключен последовательно (см. В.4.1). Логика заключается в том, что в обоих случаях величина Q используется для измерения точности настройки.

На рисунке В.4 показано влияние выбора высокого коэффициента добротности Q (кривая Z_1) или низкого коэффициента Q (кривая Z_2). Обратите внимание на переход между емкостным и индуктивным импедансом, при этом фазный угол 0° не возникает точно в точке с минимальным импедансом. При очень высокой частоте фазный угол уменьшается практически до нуля, то есть импеданс фильтра становится равным величине резистора R.

Включение резистора расширяет амплитудно-частотную характеристику фильтра, что позволяет получить два положительных эффекта. В этом случае фильтр менее подвержен расстройке вследствие смещения частоты, изменения температуры окружающей среды и точности изготовления компонентов. Кроме этого, амплитудно-частотная характеристика фильтра позволяет воздействовать на несколько гармоник посредством изменения величины R, например, подавление одиннадцатой и тринадцатой гармоник может быть выполнено с помощью одного фильтра. Достигаемая с помощью широкополосного фильтра степень подавления может быть меньше той, которая достигается с помощью двух настроенных звеньев при одинаковых суммарных номинальных параметрах, например, посредством однополосного настраиваемого фильтра для одиннадцатой и тринадцатой гармоник. Следовательно, может потребоваться большая установленная номинальная реактивная мощность для достижения такого же уровня подавления гармонических искажений. При добавлении резистора потери на фильтре увеличиваются как на гармонических частотах, что необходимо, так и на основной частоте, что нежелательно. Такие значительные потери могут быть недопустимыми, если стоимость потерь высока, особенно для фильтров, настроенных на подавление одиннадцатой и тринадцатой гармоник.

Преимущества широкополосных фильтров второго порядка:

1) обеспечивает подавление в спектре гармоник;

2) относительная нечувствительность к эффекту расстройки.

Недостатки широкополосных фильтров второго порядка:

1) может потребоваться большая номинальная установленная реактивная мощность в сравнении с несколькими настраиваемыми ветвями;

2) большие потери, чем у настраиваемых фильтров.

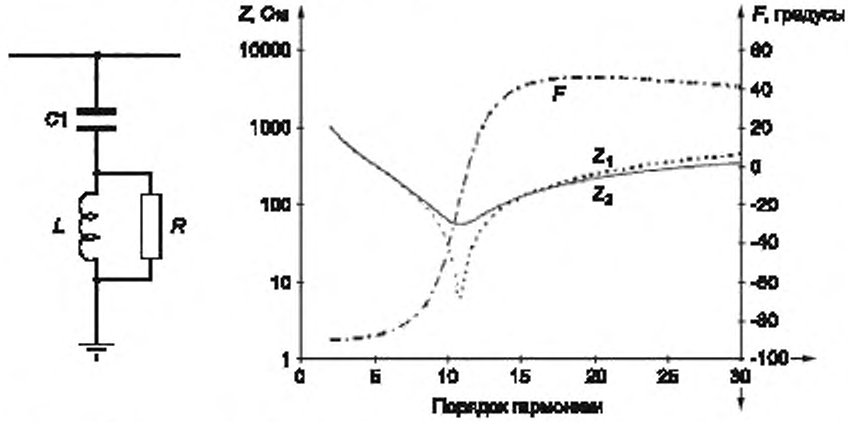


Рисунок В.4 — Широкополосный фильтр второго порядка, амплитудно-частотная характеристика (Z), фазо-частотная характеристика (F)

В.5.2 Широкополосный фильтр третьего порядка

В этой топологии вспомогательный конденсатор $C2$ подключен последовательно с резистором для работы в качестве блокирующего импеданса (см. рисунок В.5). Такой фильтр применяют для фильтрации гармоник низкого порядка, когда потери в резисторе фильтра второго порядка будут слишком высокими. На рисунке В.5 приведены схема цепи, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики широкополосного фильтра третьего порядка.

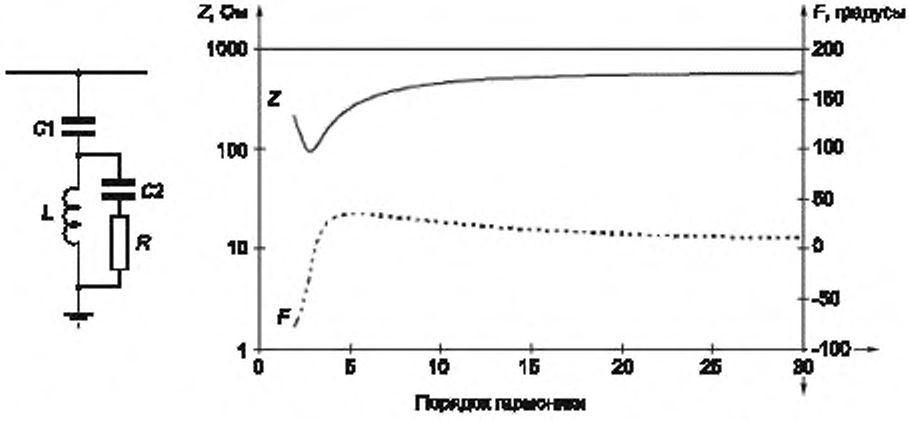


Рисунок В.5 — Широкополосный фильтр третьего порядка, амплитудно-частотная характеристика (*Z*), фазо-частотная характеристика (*F*)

Конденсатор *C2* имеет большой импеданс на основной частоте, что, следовательно, уменьшает потери на основной частоте на резисторе, так как ток в основном протекает через реактор. При увеличении частоты импеданс конденсаторной батареи *C2* уменьшается, и гармонический ток протекает через резистор *R*, обеспечивая тем самым требуемое демпфирование. Выбор величины *C2* осуществляют на экономической основе, так как уменьшенное рассеяние мощности, и, следовательно, стоимость резистора, плюс уменьшенные капитализированные потери должны возместить затраты на конденсаторную батарею *C2*.

Включение конденсаторной батареи *C2* несколько ухудшает характеристики полной проводимости фильтра, что может потребовать некоторого увеличения номинальной реактивной мощности для обеспечения требуемых эксплуатационных показателей.

Преимущества широкополосных фильтров третьего порядка:

1) обеспечивается подавление в спектре гармоник;

2) относительная нечувствительность к эффекту расстройки;

3) меньшие потери на основной частоте в резисторе, чем для широкополосного фильтра второго порядка.

Преимущества и недостатки широкополосных фильтров третьего порядка:

1) может потребоваться большая номинальная установленная реактивная мощность в сравнении с несколькими настраиваемыми ветвями;

2) большие потери, чем у настраиваемых фильтров;

3) немного слабее эксплуатационные характеристики в сравнении с широкополосным фильтром второго порядка;

4) более сложный фильтр, четыре компонента *C*—*L*—*R*.

В.5.3 Фильтр С-типа

В этой топологии вспомогательный конденсатор *C2* подключен последовательно с реактором и настроен для образования шунтирующего контура для резистора на основной частоте. На рисунке В.6 приведены схема цепи, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики типового фильтра С-типа.

Благодаря созданию настроенного фильтра *C2*—*L* в составе фильтра второго порядка практически полностью исключается протекание тока на основной частоте через резистор. При частотах выше основной гармонический ток протекает через резистор *R*, обеспечивая тем самым требуемое демпфирование. Так как компоненты *C2*—*L* представляют собой настроенный фильтр, возможна расстройка вследствие отклонения величин *L* или *C* от номинальных значений. При этом эффект расстройки должен скорее приводить к увеличению номинальных параметров резистора, чем к ухудшению суммарных эксплуатационных показателей фильтра.

Наличие конденсатора *C2* оказывает незначительное влияние на параметры импеданса.

Преимущества фильтров С-типа:

1) обеспечивается подавление в спектре гармоник;

2) относительная нечувствительность к эффекту расстройки;

3) пренебрежимо малые потери в резисторе на основной частоте.

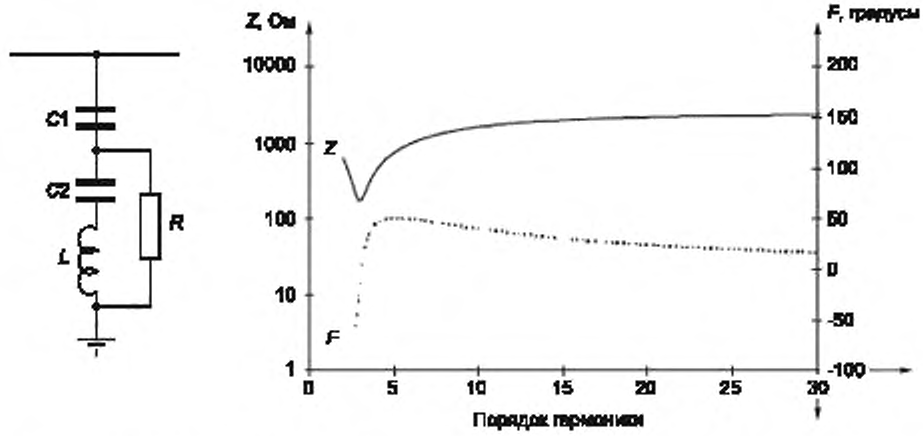


Рисунок В.6 — Фильтр типа С, амплитудно-частотная характеристика (*Z*), фазо-частотная характеристика (*F*)

Недостатки фильтров С-типа:

1) может потребоваться большая номинальная установленная реактивная мощность в сравнении с несколькими настраиваемыми ветвями;

2) большие потери, чем у настраиваемых фильтров;

3) эффекты расстройки оказывают влияние на номинальные параметры резистора;

4) может потребоваться регулировка переключения отпаек обмоток;

5) более сложный фильтр, четыре компонента *C*—*L*—*R*;

6) немного слабее эксплуатационные характеристики в сравнении с широкополосным фильтром второго порядка.

В.5.4 Широкополосные фильтры четвертого порядка

Фильтры этого типа электрически эквивалентны двум параллельно подключенным широкополосным фильтрам второго порядка, однако реализованы в качестве одного комбинированного фильтра. На рисунке В.7 приведены схема цепи, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики типового фильтра, настроенного на двенадцатую/двадцать четвертую гармоники.

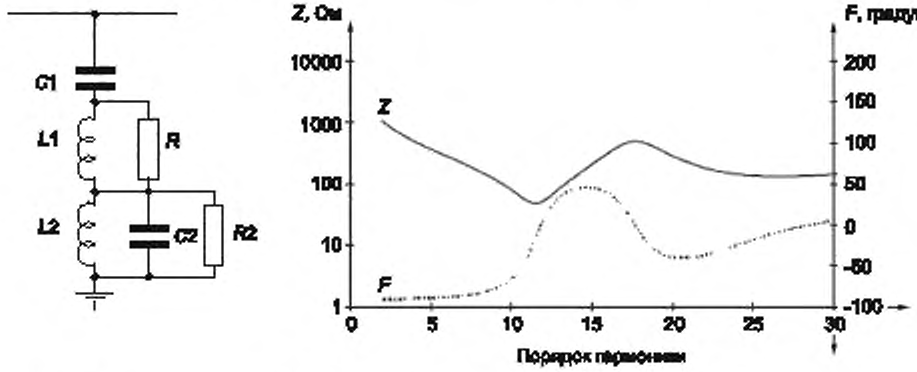


Рисунок В.7 — Широкополосный фильтр четвертого порядка, амплитудно-частотная характеристика (*Z*), фазо-частотная характеристика (*F*)

Такой фильтр обладает значительными возможностями регулирования на всем диапазоне амплитудно-частотной характеристики, позволяя изменять разделение реактивной мощности между низкими и высокими частотами и предоставляя возможность изменения демпфирования в диапазоне. Конструкция имеет такие же преимущества, что и у двухполосного настраиваемого фильтра, но в то же время менее чувствительна к эффектам расстройки. Вследствие наличия резисторов *R*1 и *R*2 происходит потеря энергии, как на основной, так и на гармонических частотах.

Во время возмущений, вызванных коммутацией или короткими замыканиями, нагрузка на низковольтные компоненты *C*2, *L*2, *R*2 может превышать их перегрузочную способность, если таковая определена на основе номинальных параметров для установившегося режима. Таким образом, в особенности для компонента *C*2, необходимо определить номинальные параметры на основе анализа переходных процессов, а не работы в установившемся режиме.

Преимущества широкополосных фильтров четвертого порядка:

1) обеспечивает подавление в широком спектре гармоник;

2) для фильтрации спектра гармоник необходим только один конденсатор и реактор высокого напряжения;

3) устраняется проблема с минимальным размером фильтра для гармоник с небольшой амплитудой;

4) меньшее число типов звеньев, обеспечение резервирования фильтра;

5) относительная нечувствительность к эффекту расстройки.

Недостатки широкополосных фильтров четвертого порядка:

1) переходные процессы могут играть определяющую роль при расчете номинальных параметров компонентов низкого напряжения;

2) большие потери, чем у двухполосных настраиваемых фильтров;

3) сложность подключения шести компонентов *C*—*L*—*R*;

4) необходима дополнительная защита для резисторов;

5) возможные дополнительные нагрузки на разрядниках для защиты от перенапряжений по сравнению с настраиваемыми фильтрами.

В.6 Рекомендации по выбору фильтров

Принимая во внимание рассмотренные в В.2, В.4 и В.5 преимущества и недостатки, можно сформулировать следующие рекомендации:

а) если частота в системе изменяется в широких пределах, то применение широкополосных фильтров более предпочтительно в сравнении с настраиваемыми фильтрами;

б) если температура окружающей среды изменяется в значительном диапазоне, то настроенные фильтры могут работать неудовлетворительно. Если предусмотрена регулировка переключения отпаек обмоток, то можно проводить регулярную настройку реакторов с периодичностью 2 раза в год для устранения изменений емкостного сопротивления вследствие летних и зимних температур;

в) если фильтры должны быть настроены точно в соответствии с порядком гармоник для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик, то может потребоваться регулировка переключения отпаек обмоток на реакторах;

г) широкополосные фильтры верхних частот второго порядка могут являться оптимальным решением для одиннадцатой/тринадцатой гармоник и более высоких групп канонических гармоник, в приложениях, где регламентируются только пределы искажения напряжения и/или диапазон импеданса для гармоник в системе, решение является более благоприятным;

д) если не требуется разрешения проблем с гармониками низшего порядка, например, третьего или пятого, и, в зависимости от требуемого уровня демпфирования, потери в широкополосных фильтрах верхних частот второго порядка, как правило, находятся на приемлемом уровне;

е) если необходимы демпфирующие характеристики для фильтров гармоник низкого порядка, то рекомендуются фильтры типа С;

ж) если необходимо ограничение тока отдельных гармоник или IT (I_{eq}), то могут потребоваться настраиваемые или двухполосные настраиваемые фильтры для обеспечения необходимого низкого импеданса;

и) если необходимо ограничение искажения напряжения, то приемлемые эксплуатационные характеристики могут быть обеспечены с помощью как настроенных, так и широкополосных фильтров;

к) если необходимо ограничение TIF (THFF), то, как правило, применяются широкополосные фильтры;

л) если необходимо ограничение перетоков реактивной мощности в сочетании с ограничением TIF, то оптимальным решением могут быть двухполосные или трехполосные настраиваемые фильтры;

м) для условий высокого напряжения и/или небольшой реактивной мощности оптимальным решением могут быть двухполосные или трехполосные настраиваемые фильтры;

н) если существующие уровни напряжения обратной последовательности в системе высокие, например, превышают 1 %, то могут потребоваться фильтры подавления третьей гармоники, настраиваемые или типа С. Если используются фильтры типа С, то они также могут обеспечить затухание на частоте пятой гармоники, если необходимо, посредством надлежащего выбора величины резистора. В некоторых схемах также возможно подавление генерации третьей гармоники вследствие напряжения обратной последовательности посредством регулировки.

Эти комментарии приведены в качестве рекомендаций, так как оптимальное решение может быть выработано только по результатам проведения детального анализа эксплуатационных характеристик и номинальных параметров.

Приложение Г
(справочное)

Эквивалентное отклонение частоты

Для одинарного настраиваемого фильтра с высокой добротностью эквивалентное отклонение частоты соответствует расстройке, которая может быть определена по формуле

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_0} + \frac{1}{2}\left[\frac{\Delta C}{C_N} + \frac{\Delta L}{L_N}\right], \quad (Г.1)$$

или

$$\Delta f_{eq} = \Delta f + f_0 \cdot \frac{1}{2}\left[\frac{\Delta C}{C_N} + \frac{\Delta L}{L_N}\right], \quad (Г.2)$$

где δ — эквивалентное отклонение частоты от номинала f_n, о.е.;

Δf — отклонение основной частоты от номинальной, Гц;

f_0 — номинальная основная частота переменного тока (50 Гц или 60 Гц), Гц;

$\frac{\Delta C}{C_N}$ — отклонение относительной емкости от номинальной, о.е.;

$\frac{\Delta L}{L_N}$ — отклонение относительной индуктивности от номинальной, о.е.;

Δf_{eq} — эквивалентное отклонение частоты, Гц.

Максимальная и минимальная эквивалентные частоты, которые должны использоваться для расчета эксплуатационных показателей, определяют по формулам

$$f = f_0 \pm \Delta f_{eq}, \quad (Г.3)$$

$$f_{max} = f_0 + \Delta f_{eq}, \quad (Г.4)$$

$$f_{min} = f_0 - \Delta f_{eq}. \quad (Г.5)$$

Эксплуатационные показатели должны соблюдаться в диапазоне частот от f_{max} до f_{min}. Для фильтров традиционной компоновки наибольший уровень гармоник должен быть, как правило, определен для f_{max} или f_{min}.

Приложение Д
(справочное)

Диаграммы диапазона импеданса

Д.1 Секторная диаграмма

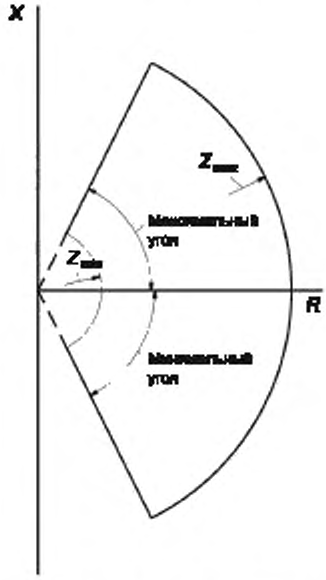


Рисунок Д.1 — Общая секторная диаграмма импеданса системы переменного тока, с минимальным импедансом Z_{min}, максимальным импедансом Z_{max}

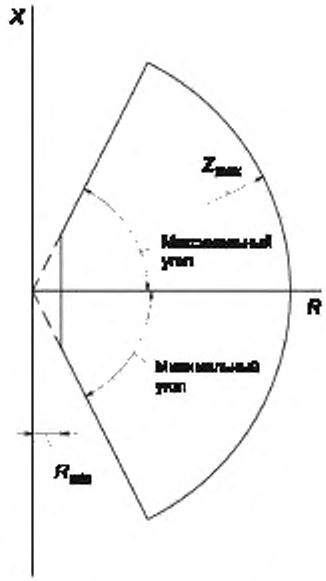


Рисунок Д.2 — Общая секторная диаграмма импеданса системы переменного тока, с минимальным активным сопротивлением R_{min}, максимальным импедансом Z_{max}

Для секторной диаграммы следует задать максимальный и минимальный угол импеданса, а также указать максимальный импеданс. В качестве нижнего предела следует указать минимальный импеданс (см. рисунок Д.1) или минимальное сопротивление (см. рисунок Д.2).

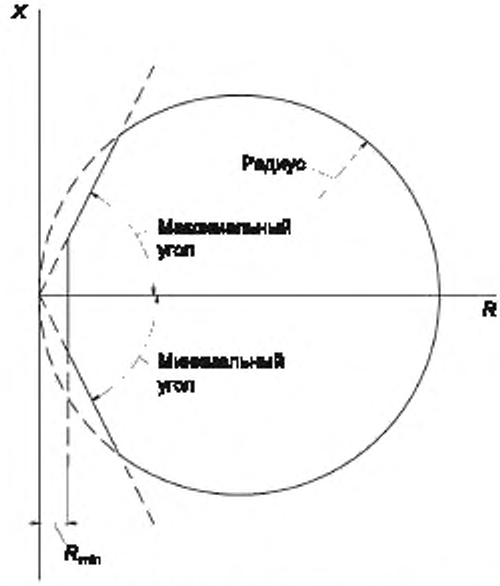
Преимущество секторных диаграмм — простота определения в случае наличия минимального количества данных о сети.

Недостатки секторных диаграмм:

- если величина R_{max} в диапазоне гармоник определяется посредством параллельного резонанса в системе, то это определяет величину Z_{max} и, таким образом, значения параметров X_{max}, X_{min}, которые зачастую превышают фактические значения;
- значения максимального и минимального углов могут быть релевантны при небольших величинах реактивного сопротивления, однако углы будут меньше при более высоких величинах реактивного сопротивления.

Относительный недостаток секторной диаграммы с минимальным импедансом (см. рисунок Д.1) — маловероятно, что отношение Z_{min} и R_{min} будет соответствовать реальным условиям; R_{min} будет иметь слишком большое значение или Z_{min} будет иметь слишком малое значение. Эти величины могут оказывать критическое воздействие на конструкцию фильтра.

Д.2 Круговая диаграмма



X, *R* — реактивная и активная составляющие импеданса сети

Рисунок Д.3 — Общая круговая диаграмма импеданса системы переменного тока, с минимальным активным сопротивлением R_{min}

Для круговой диаграммы (см. рисунок Д.3) должен быть задан радиус окружности, как показано на рисунке. В дополнение к радиусу необходимо задать максимальный и минимальный углы и минимальное сопротивление.

Преимущества круговой диаграммы:

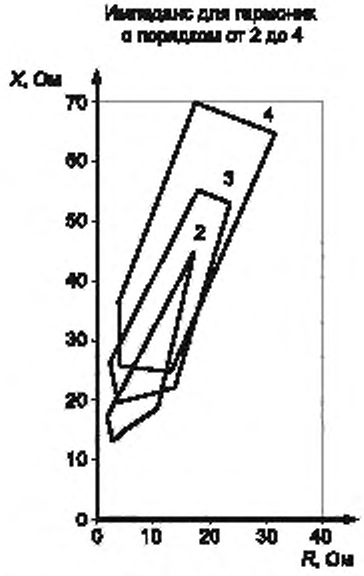
- диапазон лучше соответствует фактическим значениям в сравнении с секторными диаграммами;
- особенно более реалистичная аппроксимация для характеристических гармоник одиннадцатого, тринадцатого и других порядков.

Недостаток круговой диаграммы — радиус определяется наибольшей величиной импеданса в диапазоне импеданса, что фактически является параллельным резонансом, который может возникнуть в более узком диапазоне частот, чем это предполагается для диаграммы в целом (также возможен набор резонансов на различных частотах для разных условий в системе). Таким образом, этот подход может привести к включению большей неприменимой области, по сравнению с секторной диаграммой, в частности в секторе емкостного реактивного сопротивления для диапазона низших гармоник.

В большинстве случаев круговая диаграмма будет более точной в сравнении с секторными диаграммами, и, таким образом, является предпочтительной. При наличии достаточной исходной информации более эффективным является метод дискретных многоугольников, описанный ниже.

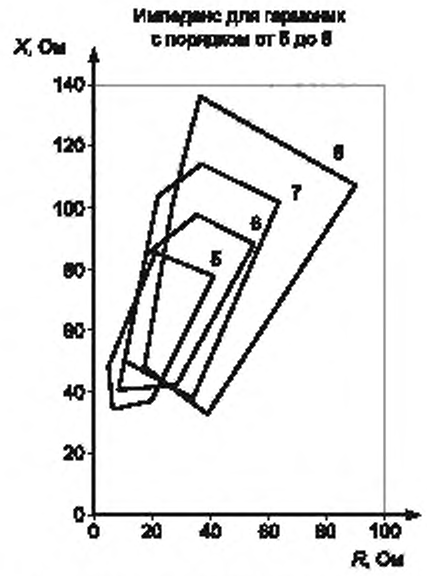
Д.3 Метод дискретных многоугольников

Для более точного представления импеданса сети необходимо получить различные диаграммы для различных диапазонов частот, так как импеданс системы зависит от частоты. Посредством этого могут быть определены относительно ограниченные сектора импеданса для каждой гармоники, что позволяет обеспечить более точное соответствие конструкции фильтра переменного тока фактическим условиям сети.



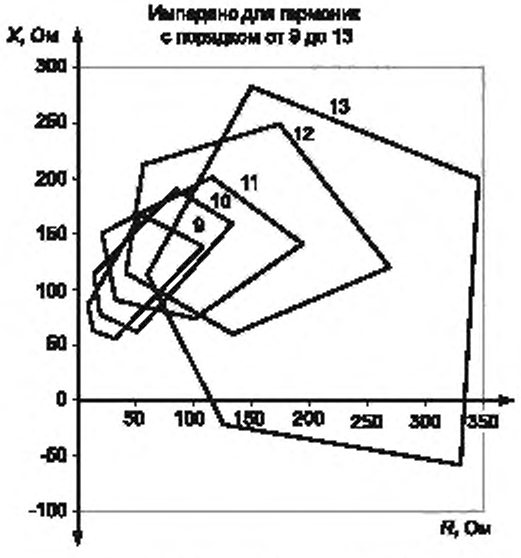
X, R — реактивная и активная составляющие импеданса сети

Рисунок Д.4 — Пример импеданса для гармоник с порядком от 2 до 4



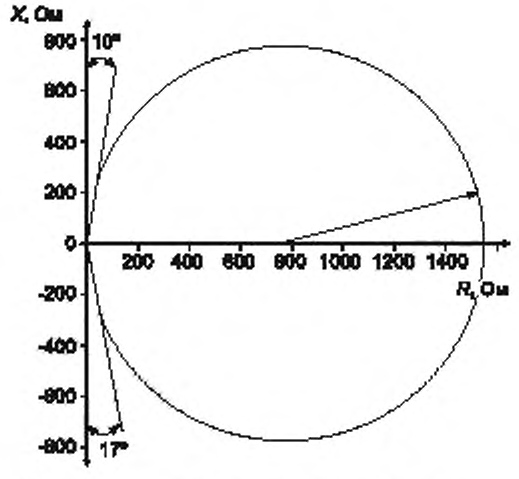
X, R — реактивная и активная составляющие импеданса сети

Рисунок Д.5 — Пример импеданса для гармоник с порядком от 5 до 8



X, R — реактивная и активная составляющие импеданса сети

Рисунок Д.6 — Пример импеданса для гармоник с порядком от 9 до 13



X, R — реактивная и активная составляющие импеданса сети

Рисунок Д.7 — Пример импеданса для гармоник с порядком от 14 до 49

На рисунках Д.4—Д.7 приведены некоторые примеры. На рисунке Д.7 приведены гармоники высшего порядка (выше n = 14), которые определены с помощью традиционной круговой диаграммы, так как в этом случае нет значительных экономических или технических преимуществ в определении более точного многоугольника для этих частот.

Если многоугольники для различных групп гармоник должны быть определены с помощью компьютерной программы, то рекомендуется включить в каждый многоугольник точки расчетного импеданса для одной или двух дополнительных гармоник на обоих концах рассматриваемого диапазона. Это применяется потому, что компьютерная модель может правильно рассчитать резонанс, но не совсем точно частоту. Кроме этого, необходимо предусмотреть дополнительный запас для амплитуд импеданса с целью компенсации возможных погрешностей моделирования.

Преимущество дискретных многоугольных диаграмм — исключение риска чрезмерного запаса при проектировании фильтров при определении характеристик гармоник низшего порядка, одиннадцатой и тринадцатой гармоник.

Недостаток дискретных многоугольных диаграмм — требуется значительно больше усилий для определения многоугольников для каждой гармоники.

Приложение Е
(справочное)

Регулирование реактивной мощности

Е.1 Способность преобразователей ПТВН потреблять реактивную мощность

Е.1.1 Установившийся режим

При работе в установившемся режиме с повышенной реактивной мощностью предполагают, что работа продолжается в течение бесконечного времени, а регулирование реактивной мощности осуществляют таким образом, что это оказывает влияние на только одну преобразовательную подстанцию или одну сеть переменного тока одновременно. Кроме этого, способность к поглощению реактивной мощности в установившемся режиме, как правило, ограниченна.

Естественным свойством преобразователя с линейной коммутацией является потребление реактивной мощности при его работе как в режиме выпрямителя, так и в режиме инвертора. На рисунке Е.1 продемонстрирована способность преобразователя к потреблению реактивной мощности при различных стратегиях управления. Этот график применим к заданным условиям напряжения в сети переменного тока и номера отпайки, выбранного на трансформаторе с устройством переключения отпаек. Параметры *p* и *q* заданы для единичных значений, относящихся к номинальной активной мощности на стороне постоянного тока.



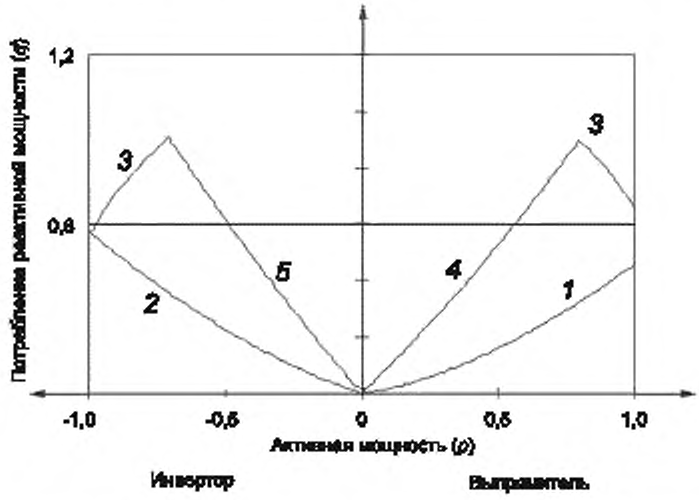
1 — регулирование постоянного напряжения и управление при α минимум α_{min}. *2* — управление при δ минимум (δ_{min}); *3* — регулирование для поддержания выпрямленного тока на заданном уровне постоянного тока; *4* — регулирование для поддержания заданного уровня реактивной мощности; *5* — регулирование для поддержания заданного уровня активной мощности; *6* — минимальные значения выпрямленного тока; *7* — максимальный угол управления (α_{max})

Рисунок Е.1 — График нагрузочной способности преобразователя при различных режимах управления

В области, заключенной между кривыми *1*, *2* и *3*, система управления преобразователя, в теории, может действовать очень быстро, если это необходимо для улучшения работы комбинированной системы переменного и постоянного тока. Могут быть реализованы дополнительные режимы управления для воздействия на переменные преобразователя переменного тока и/или постоянного тока с целью контроля потока активной и реактивной мощности, напряжения переменного тока и частоты.

На рисунке Е.2 приведен пример *P*—*Q* диаграммы преобразователя с повышенной способностью к потреблению реактивной мощности при α_{max} = 35°, δ_{max} = 40° и U_{diomax} = 1,2U_{dioN}. Максимальный предел выпрямителя ограничен кривой (α + γ), кривой максимального напряжения U_{dio} (идеальное напряжение постоянного тока холостого хода, которое равно $\frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_{v\,L-L}$), кривой максимальной располагаемой мощности и вертикальной лини-

ей при p = 1,0 о.е., которая соответствует номинальному постоянному току. Для инвертора максимальный предел определяется максимальной кривой U_{dio} и максимальной кривой располагаемой мощности, а минимальный предел ограничен минимальной кривой δ.



1 — регулирование постоянного напряжения и управление при α минимум α_{min}; *2* — постоянный минимальный угол управления (δ_{min}); *3* — регулирование для поддержания заданного значения выпрямленного тока; *4* — максимальный угол управления (α_{max}); *5* — максимальный угол управления (δ_{max})

Рисунок Е.2 — Нагрузочная способность преобразователя
при δ_{min} = 17°, δ_{max} = 40°, α_{min} = 5°, α_{max} = 35° и U_{diomax} = 1,2U_{dioN}

Как показано выше, преобразовательная подстанция постоянного тока может быть спроектирована для работы с очень низким уровнем инъекции реактивной мощности в подключенную сеть переменного тока. Режим повышенного поглощения реактивной мощности имеет следующие недостатки.

а) Повышение углов управления обуславливает необходимость повышения напряжения переменного тока на стороне вентиля для достижения нормального напряжения постоянного тока и максимальной передаваемой мощности. Это означает, что вентили должны быть рассчитаны на более высокое напряжение, чем при нормальном оптимизированном проектировании. Такой подход имеет следующие последствия:

- непосредственное влияние на стоимость вентилей и потери преобразователя, так как увеличивается количество тиристоров и других компонентов в составе вентилей;
- увеличение амплитуды коммутационных импульсов и, следовательно, увеличение стоимости разрядников вентилей;
- увеличение стоимости цепей демпфирования вентилей, так как компоненты должны быть рассчитаны на повышенное рассеяние мощности;
- увеличение охлаждающей способности вентилей, так как система охлаждения должна быть рассчитана на повышенное рассеяние мощности.

Даже для случая длинных линий передачи электроэнергии некоторые описанные выше функции управления реактивной мощностью могут быть достигнуты без повышения напряжения U_{dio} и чрезмерного увеличения запаса для тиристорных вентилей. Например, система ПТВН может быть рассчитана на некоторую способность к выдерживанию перегрузки по току (даже при условии работы резервной системы охлаждения) и может быть спроектирована таким образом, чтобы не требовалось поддерживать напряжение постоянного тока неизменным в этом операционном режиме. К примеру, на электропередаче Gezhouba–Shanghai напряжение постоянного тока находится в диапазоне от 475 до 525 кВ в режиме регулирования реактивной мощности вплоть до номинального режима эксплуатации.

б) Увеличение реактивной мощности при номинальной активной мощности также означает увеличение располагаемой мощности, что приводит к увеличению номинальных параметров трансформатора преобразователя.

в) Работа при высоких углах управления при номинальном токе приводит к увеличению гармонических искажений как на стороне переменного тока, так и на стороне постоянного тока, что вызывает увеличение стоимости фильтров переменного и постоянного тока.

г) Частые изменения напряжения U_{dio} посредством переключения отпаек с помощью переключателя отпаек приводят к необходимости более частого технического обслуживания переключателя отпаек трансформатора.

Также существует возможность эксплуатации преобразователей ПТВН при неизменном напряжении U_{dio} во всем рабочем диапазоне. Это приводит к незначительному увеличению углов включения в части диапазона, однако диапазон переключателя отпаек трансформатора и расчетные циклы работы переключателя отпаек уменьшаются, что увеличивает надежность и интервалы технического обслуживания.

Е.1.2 Кратковременные режимы работы

В переходном или кратковременном режиме с повышенным потреблением реактивной мощности допустима работа со значительно большими углами управления, так как вентили ПТВН испытываются при углах управления 90° и значительных токах в течение периода времени длительностью от 0,5 до 1,0 мин. На рисунках Е.3 и Е.4 показано потребление реактивной мощности в зависимости от величины угла управления для выпрямителя и инвертора, соответственно. Эти кривые построены с использованием I_d в качестве параметра и при $U_{dio} = U_{dioN}$. Как видно из графика, преобразователь имеет практически такое же потребление реактивной мощности при небольшой величине постоянного тока, как и при большой величине постоянного тока и нормальных углах управления. Эта особенность очень полезна в ситуациях, подобных тем, которые были описаны в 7.7.

Так как переключатель отпаек трансформатора не может работать во время протекания переходных процессов длительностью, как правило, менее 5 с, то другая преобразовательная подстанция также будет подвергнута воздействию, так как напряжение постоянного тока уменьшается в случае увеличения переменных α или δ. Таким образом, для поддержания активной мощности на постоянном уровне уменьшение напряжения постоянного тока компенсируется увеличением величины постоянного тока.

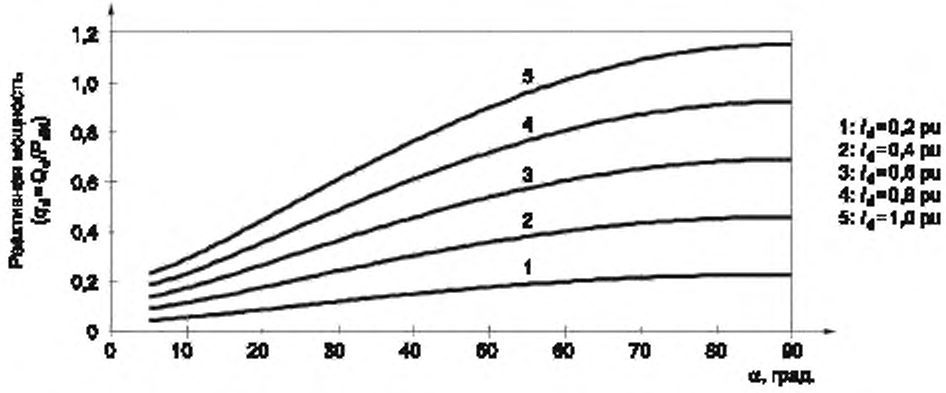


Рисунок Е.3 — Потребление реактивной мощности выпрямителем в зависимости от угла управления α при $U_{dio} = U_{dion}$, d_x = 9,4 % и d_r = 0,2 %

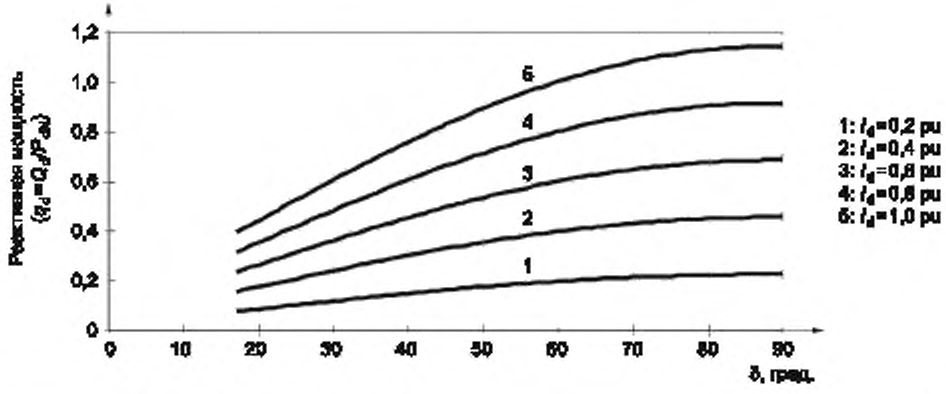


Рисунок Е.4 — Потребление реактивной мощности инвертором в зависимости от угла управления δ при $U_{dio} = U_{dion}$, d_x = 9,4 % и d_r = 0,2 %

Е.2 Управление преобразователем *Q*—*V* вблизи от точек коммутации

Это способ управления преобразователем, который позволяет использовать способность преобразователя к временному потреблению реактивной мощности, как показано в Е.1, что требуется в следующих ситуациях:

- когда обмен реактивной мощностью находится на таком уровне, что экспорт в систему переменного тока нарушает заданный предел при коммутации фильтров и суживает диапазон мощности постоянного тока вокруг точек переключения в определенных условиях, как например, при максимальном напряжении и частоте в системе переменного тока, а также плюсовом допуске конденсатора;
- когда применяются жесткие ограничения на скачкообразное изменение напряжения при переключении отпаек;
- для обеспечения плавного контроля напряжения переменного тока, если такой контроль осуществляется с помощью секций батарей/батарей;
- при уменьшении временных перенапряжений.

Хотя технически возможно выдержать предусмотренные требования в соответствии с приведенными выше соображениями посредством выбора батарей/секций батарей фильтров меньшей мощности, это может быть исключено по экономическим причинам. Вместо этого преобразователь используется для поддержания скачкообразных изменений напряжения и поддержания реактивной мощности в заданных пределах. Это достигается посредством принудительного временного увеличения углов включения погасания преобразователя с минимально возможной задержкой после возникновения коммутации. Таким образом, в момент отключения секции батареи/батареи, производится уменьшение общей реактивной мощности, что приводит к возникновению отрицательного скачка напряжения переменного тока. Если одновременно с этим может быть уменьшено потребление реактивной мощности, то общее влияние на напряжение будет незначительным.

Такая процедура, которая представляет значительный интерес для преобразователя, предполагает резкое уменьшение переменной δ, что, конечно, невозможно, если преобразователь работает в режиме δ_{min}. Если планируется переключение секции батареи/батареи, то можно подготовиться к этому посредством медленного увеличения переменной δ на соответствующую величину, а затем, после отключения батареи, следует резко уменьшить переменную δ до номинальной величины. Если секция батареи/батарея включена, то подготовка не требуется. Угол управления δ может быть резко увеличен для увеличения поглощения реактивной мощности преобразователем в момент коммутации секции батареи/батареи, после чего следует медленно возвратить его к номинальному значению.

Если реактивная мощность или напряжение переменного тока контролируется только посредством секций батарей/батарей, то такое управление носит дискретный характер, и реактивная мощность преобразователя может быть точно компенсирована только в ограниченном количестве точек в диапазоне от нуля до номинальной мощности. Сочетание коммутации секции батареи/батареи и системы управления преобразователя, реализованное таким образом, что коммутация самой секции батареи/батареи всегда обеспечивает чрезмерную компенсацию, что полностью или частично устраняется системой управления преобразователя с увеличенными параметрами α или δ, может являться практическим решением для случая, когда требуется обеспечить низкий уровень обмена реактивной мощностью с сетью переменного тока.

Е.3 Скачкообразное изменение напряжения при коммутации фильтра

Скачкообразное изменение напряжения *dU* на шинах после коммутации секции батареи/ батареи зависит от мощности сети переменного тока и режима управления преобразователя ПТВН. Если ΔQ_0 выражает реактивную мощность (МВАр) при номинальном напряжении U_0 для коммутируемой секции батареи/батареи, а *U* выражает напряжение на шинах до момента коммутации, то результирующее скачкообразное изменение напряжения после коммутации секции батареи/батареи фильтра будет определяться согласно:

$$\Delta U = \Delta Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \cdot VSF, \tag{Е.1}$$

где *VSF* — коэффициент чувствительности по напряжению для комбинации сети переменного тока и преобразователя ПТВН. Коэффициент *VSF* определен в качестве отношения постепенного изменения напряжения переменного тока *dU* к инъекции небольшой реактивной мощности *dQ* в коммутирующий шинопровод для заданного уровня активной мощности преобразователя ПТВН, то есть

$$VSF = \frac{dU}{dQ}.$$

Для специального случая, когда преобразователь ПТВН заблокирован, приведенная выше формула для *dU* приобретает следующую форму:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q_0}{(S - Q_{c0})} \cdot U. \tag{Е.2}$$

Если S выражает полную мощность, МВА, трехфазного короткого замыкания на коммутирующих шинах, то Q_{c0} выражает общую реактивную мощность для секции батареи/батареи фильтра (включая реактивную мощность коммутируемых секций батареи/батарей фильтра), которые подключены после коммутации, при номинальном напряжении.

Эта формула также используется для оценки величины S посредством измерения напряжения U перед коммутацией и изменения напряжения после коммутации ΔU следующим образом:

$$S = \frac{\Delta Q_0}{\Delta U} \cdot U + Q_{c0}. \quad \text{(E.3)}$$

Библиография

[1] МЭК 60507:2013 Изоляторы высокого напряжения керамические и стеклянные, используемые в системах переменного тока. Методы испытаний в условиях искусственного загрязнения (Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems)

[2] МЭК 62271-1:2017 Устройства комплектные распределительные высокого напряжения. Часть 1. Общие технические требования к комплектным распределительным устройствам переменного тока (High-voltage switchgear and controlgear — Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear)

[3] СН 2.2.4-2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки

[4] IEC/TR 60146-1-2:2011 Преобразователи полупроводниковые и линейно коммутированные преобразователи. Часть 1-2: Общие требования и руководство по применению (Semiconductor converters and line commutated converters — Part 1-2: General requirements and application guide)

УДК 621.316.1:006.354 ОКС 29.240.01

Ключевые слова: передача постоянного тока высокого напряжения, мостовая преобразовательная схема, вентиль, преобразовательный трансформатор, фильтр гармоник, каноническая гармоника, неканоническая гармоника

Редактор *В.Н. Шмельков*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Е.Ю. Митрофанова*
Компьютерная верстка *И.А. Налейкиной*

Сдано в набор 25.11.2020. Подписано в печать 22.12.2020. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 5,90.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru