

УДК 621.3

Контроль качества электроэнергии и способы компенсации нарушений

Смертьева И.В.

Научный руководитель –к.т.н., доцент ПЕТРУША Ю.С.

Электрическая энергия как товар используется во всех сферах жизнедеятельности человека, обладает совокупностью специфических свойств и непосредственно участвует при создании других видов продукции. Понятие качества электроэнергии (КЭ) отличается от понятия качества других видов продукции. Каждый электроприемник (ЭП) предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: частота, номинальное напряжение, ток. Поэтому для нормальной его работы должно быть обеспечено требуемое КЭ.

В данной работе рассматриваются продолжительные изменения характеристик напряжения электропитания, а также способы и средства регулирования напряжения, которые помогут избежать аварийных ситуаций.

Качество электрической энергии — это степень соответствия параметров электрической энергии их значениям, которые устанавливает ГОСТ 32144-2013.

Продолжительные изменения характеристик напряжения электропитания представляют собой длительные отклонения характеристик напряжения от номинальных значений и обусловлены, в основном, изменениями нагрузки или влиянием нелинейных нагрузок. Случайные события представляют собой внезапные и значительные изменения формы напряжения, приводящие к отклонению его параметров от номинальных. Данные изменения напряжения, как правило, вызываются непредсказуемыми событиями (например, повреждениями оборудования пользователя электрической сети) или внешними воздействиями (например, погодными условиями или действиями стороны, не являющейся пользователем электрической сети).

Продолжительные изменения характеристик напряжения:

Отклонение частоты:

Показателем КЭ, относящимся к частоте, является отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения. Номинальное значение частоты напряжения электропитания в электрической сети равно 50 Гц. Отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,4$ Гц.

Медленные изменения напряжения:

Медленные изменения напряжения электропитания (как правило, продолжительностью более 1 мин) обусловлены обычно изменениями нагрузки электрической сети. Показателями КЭ, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное $\delta U(-)$ и положительное $\delta U(+)$ отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального/согласованного значения. Для указанных выше показателей КЭ установлены следующие нормы: положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения.

Колебания напряжения и фликер:

Колебания напряжения электропитания (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночные быстрые изменения напряжения, обуславливают возникновение фликера. Показателями КЭ, относящимися к колебаниям напряжения, являются кратковременная доза фликера P_{st} , измеренная в интервале времени 10 мин, и длительная доза фликера P_{lt} , измеренная в интервале времени 2 ч, в точке передачи электрической энергии. Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы: кратковременная доза фликера P_{st} не должна превышать значения 1,38, длительная доза фликера P_{lt} не должна превышать значения 1,0.

Несинусоидальность напряжения:

Показателями КЭ, относящимися к гармоническим составляющим напряжения являются: значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка KU_n в процентах напряжения основной гармонической составляющей U_1 в точке передачи электрической энергии и значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей) KU , % в точке передачи электрической энергии.

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы: значения коэффициента гармонических составляющих напряжения и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения не должны превышать табличных значений, зависящих от напряжения сети и порядка гармоники. Например, для сети с напряжением 35 кВ, KU не должен превышать 6%.

Несимметрия напряжений в трехфазных системах:

Несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети. Показателями КЭ, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $K2U$ и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности $K0U$. Значение данных коэффициентов не должны превышать 4%.

Различают следующие виды контроля КЭ:

1. Диагностический контроль – выполняется на границе раздела сетей потребления, с целью обнаружения «виновника» ухудшения ПКЭ.
2. Сертификационный контроль – ведётся органами сертификации с целью получения информации о состоянии сертифицированной электроэнергии в сети энергоснабжающих организаций.
3. Оперативный контроль КЭ ведут в местах электрической сети, где на данный момент не могут быть устранены искажения напряжения. Проводится мониторинг.
4. Коммерческий учёт ПКЭ – ведётся на границе раздела электрических сетей поставщика и потребителя с целью расчёта величин скидок/надбавок к тарифам на электроэнергию.

ГОСТ 30804.4.30-2013 устанавливает для каждого измеряемого показателя КЭ три класса характеристик процесса измерения – А, S и В. Для каждого класса определены методы измерения и соответствующие требования к характеристикам средств измерения.

Класс А применяют, если необходимо проведение точных измерений, например, при проверке соответствия стандартам, устанавливающим нормы КЭ, при условии выполнении условий договоров, предусматривающих возможность разрешения спорных вопросов путем измерения и т.д.

Класс S применяют при проведении обследований и оценке КЭ с использованием статистических методов. Хотя интервалы времени измерений показателей КЭ для классов S и А одинаковы, требования к характеристикам процесса измерения класса S снижены.

Класс В установлен для того, чтобы избежать признания средства измерения многих существующих типов устаревшими.

Для класса А и S в качестве основного интервала времени при измерении показателей КЭ должен быть принят интервал длительностью 10 периодов для систем электроснабжения частотой 50 Гц. Измерения на основных интервалах времени 10 периодов должны синхронизироваться с текущим временем при каждой 10-минутной отметке текущего времени внутренних часов средства измерения. Для класса В число и длительность объединенных временных интервалов устанавливает изготовитель средства измерения.

Далее рассмотрим способы и средства регулирования напряжения.

Под регулированием напряжения понимается комплекс технических мероприятий по ограничению отклонений напряжений от их номинальных значений на шинах потребителей электроэнергии в допустимых ГОСТ 32144-2013 пределах. Кроме того, регулирование

напряжений выполняется в системообразующей и распределительных сетях электроэнергетических систем с целью обеспечения экономичной и надежной работы энергетического оборудования и поддержания напряжений в узлах сети в технически допустимых границах. Таким образом, регулирование напряжений производится как в системах электроснабжения потребителей, так и в сетях электроэнергетических систем.

Регулирование напряжения связано с балансом реактивной мощности в сети и на шинах потребителей электроэнергии. Пониженные уровни напряжений наблюдаются, как правило, в районах с дефицитом реактивной мощности.

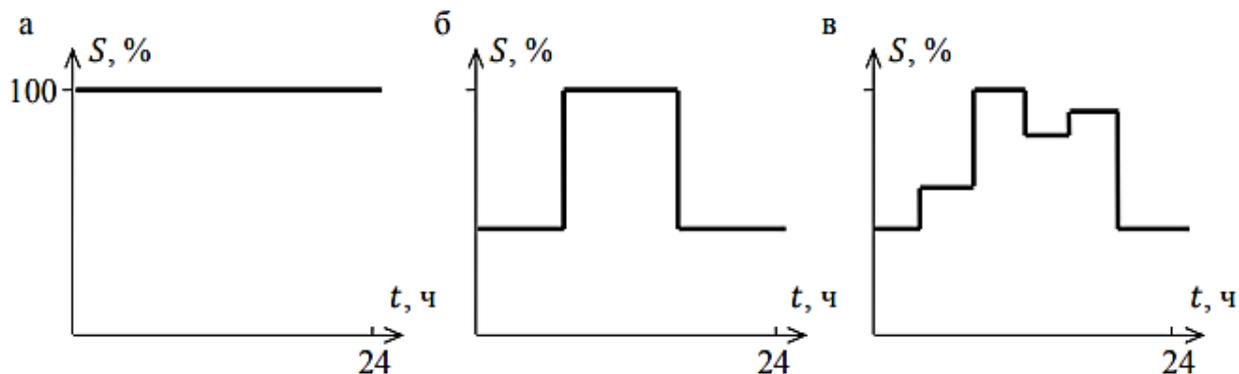
Различают централизованное и местное регулирование напряжения. При централизованном регулировании в питающем узле одновременно поддерживаются допустимые уровни напряжения в целом для группы потребителей близлежащего района.

Местное регулирование предполагает поддержание требуемых уровней напряжения непосредственно на шинах потребителя. Местное регулирование напряжения можно подразделить на групповое и индивидуальное. Групповое регулирование выполняется одновременно для группы потребителей, индивидуальное регулирование — для одного конкретного, как правило, особого потребителя.

Централизованное регулирование напряжения в зависимости от характера графиков нагрузок можно условно разбить на три типа: стабилизация напряжения; двухступенчатое регулирование; встречное регулирование напряжения.

Стабилизация напряжения применяется для потребителей с практически неизменной нагрузкой, где требуемый уровень напряжения необходимо поддерживать неизменным в течение суток. График нагрузки таких предприятий показан на рис. 1, а.

Двухступенчатое регулирование применяют для нагрузок, график которых имеет два явно выраженных уровня (рис. 1, б). При этом поддерживаются два 35 требуемых уровня напряжения в соответствии с графиком нагрузок. Обычно требуемый уровень напряжения в режиме максимальных нагрузок выше, чем в режиме минимальных нагрузок.



а – неизменный; б – двухступенчатый; в – многоступенчатый
Рисунок 1 – График нагрузок потребителей

Встречное регулирование напряжения применяется для потребителей с переменным, многоступенчатым графиком нагрузок (рис. 1, в) и является развитием двухступенчатого. Для каждого значения нагрузки в системе электроснабжения потребителя будут иметь место свои значения потерь напряжения. Для поддержания требуемых уровней напряжений на шинах потребителя напряжение следует регулировать в соответствии с графиком нагрузок.

Встречное регулирование заключается в поддержании повышенного напряжения на шинах электрических станций или понижающих подстанций в период наибольших нагрузок и в снижении его до номинального в период наименьших нагрузок. При таком регулировании в режимах максимальных и минимальных нагрузок соответственно повышается и понижается, и поэтому называется встречным.

Средствами регулирования напряжения могут служить: генераторы на электростанциях, трансформаторы с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой

(РПН) и без нагрузки (ПБВ); вольтодобавочные трансформаторы и линейные регуляторы; компенсирующие устройства, вырабатывающие (батареи конденсаторов, синхронные компенсаторы в перевозбужденном режиме) и потребляющие (реакторы, синхронные компенсаторы в недовозбужденном режиме) реактивную мощность.

Под регулированием понимается текущее изменение параметров системы (напряжения, коэффициента трансформации, потерь напряжения), применяемое в целях обеспечения желательного режима напряжений. Регулирование может проводиться автоматически. Законы регулирования напряжения должны устанавливаться из условий обеспечения наиболее экономичной совместной работы источников реактивной мощности, электрических сетей и присоединенных к ним электроприемников.

Среди способов регулирования напряжения следует особо выделить применение автоматизированных источников реактивной мощности (компенсирующих устройств). Напряжение на шинах генераторного напряжения станций регулируется путем изменения тока возбуждения генераторов автоматически с помощью специальных автоматических регуляторов возбуждения (АРВ). Регулирование на шинах низшего напряжения понизительных подстанций может производиться с помощью: а) трансформаторов с РПН; б) синхронных компенсаторов; в) линейных регуляторов ЛР. Напряжение при этом должно регулироваться автоматически с помощью регуляторов напряжения по желаемому закону в пределах располагаемого диапазона одновременно для всех линий распределительной сети, присоединенных к шинам данного ЦП. Поэтому эти схемы централизованного регулирования могут обеспечить требуемое качество напряжения у электроприемников только в тех случаях, когда к шинам ЦП присоединяются линии распределительной сети, питающие однородных потребителей. Под однородными потребителями понимаются группы электроприемников, для которых графики изменения нагрузок во времени являются практически однотипными.

Напряжение может регулироваться с помощью трансформаторов. Двухобмоточные и трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы могут устанавливаться в различных пунктах электрических сетей и выполнять функции повышения или понижения класса напряжения сети. Для регулирования напряжения необходимо изменять коэффициент трансформации. Понижающие трансформаторы изготавливаются с возможностью изменения коэффициента трансформации в пределах 10...20 %. Изменение коэффициента трансформации достигается изменением числа витков одной из обмоток трансформатора, снабженной, помимо основных, дополнительными регулировочными ответвлениями.

По конструктивному выполнению переключающих устройств различают трансформаторы с ПБВ и РПН. Трансформаторы с ПБВ (переключением без возбуждения) необходимо отключать от сети для переключения регулировочных ответвлений. Трансформаторы с РПН (переключение под нагрузкой) не требуют отключения от сети для переключения регулировочных ответвлений. Трансформаторы с ПБВ в настоящее время выполняются с основным и четырьмя дополнительными ответвлениями. Переключающее устройство ПБВ выполняется обычно в виде кругового переключателя, принципиальная схема обмоток и переключателя трансформатора с ПБВ в однофазном исполнении приведена на рис. 2.

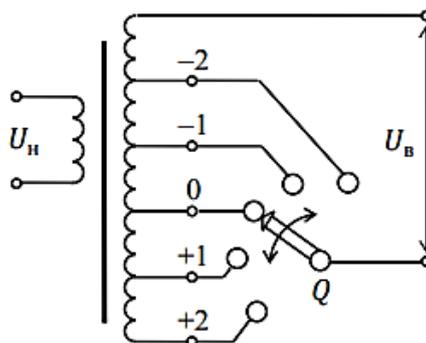


Рисунок 2 – Трансформатор с ПБВ

Для переключения регулировочных ответвлений трансформатор отключается от сети, круговой переключатель Q переводится в нужное положение и трансформатор включается в сеть.

Трансформаторы со встроенным устройством РПН отличаются от трансформаторов с ПБВ наличием специального устройства переключения под нагрузкой без отключения трансформатора от сети. Принцип конструкции устройства РПН приведен на рис. 3.

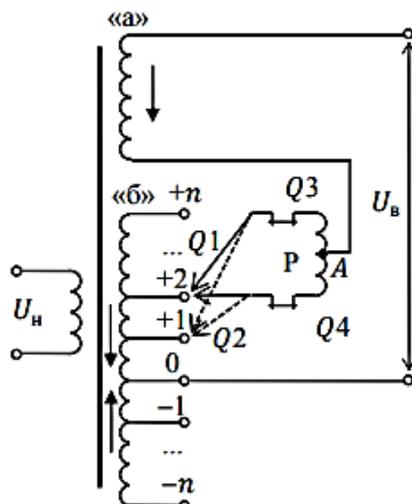


Рисунок 3 – Трансформатор с РПН

Обмотка, на которой расположено РПН, выполняется из двух частей: нерегулируемой «а» и регулируемой «б». На регулируемой обмотке часть витков включена согласно с витками основной нерегулируемой обмотки (регулируемые ответвления +1, +2, ..., +n) и часть встречно (ответвления -1, -2, ..., -n). При использовании регулировочных ответвлений, включенных согласно с основной обмоткой, коэффициент трансформации увеличивается по сравнению с номинальным, что приводит к понижению напряжения на низшей стороне трансформатора. При использовании ответвлений, включенных встречно, коэффициент трансформации уменьшается, и напряжение на низшей стороне трансформатора повышается.

Трансформаторы с РПН имеют большее число ступеней регулировочных ответвлений, чем трансформаторы с ПБВ. Обычно пределы регулирования коэффициента трансформации трансформаторов с РПН составляют от ±16 до ±20 % от номинального.

Одним из способов регулирования напряжения является продольное и поперечное регулирование напряжения. Продольное и поперечное регулирование напряжения выполняется с помощью линейных и последовательных регулировочных трансформаторов. Линейные регулировочные трансформаторы и последовательные регулировочные

(вольтодобавочные) трансформаторы используются для регулирования напряжения на шинах подстанций, где установлены трансформаторы без регулирования коэффициента трансформации под нагрузкой. Кроме того, они могут устанавливаться для регулирования напряжения на отдельных линиях и группах линий. Для регулирования напряжения на шинах подстанций регулировочные трансформаторы (РТ) включаются последовательно с силовым трансформатором (Т) без РПН. Линейные регуляторы (ЛР), используемые для регулирования напряжения на отдельных линиях или группах линий, устанавливаются на шинах низшего напряжения подстанций непосредственно в линии. Линейные регулировочные трансформаторы устанавливаются также на подстанциях с автотрансформаторами (АТ), если необходимо изменять напряжение на шинах низшего напряжения под нагрузкой. В этом случае линейный регулятор устанавливается последовательно с обмоткой низшего напряжения автотрансформатора.

Линейный и последовательный регулировочные трансформаторы состоят из двух трансформаторов: последовательного (ПТ) и питающего регулировочного (ПРТ, см. рис. 4). На первичную обмотку 1 питающего регулировочного трансформатора может быть подано фазное напряжение одноименной или разноименных фаз или любое междуфазное напряжение. Вторичная обмотка ПРТ 2 содержит устройство переключения числа витков 3, подобное РПН. Первичная обмотка последовательного трансформатора 4 включена между средней точкой вторичной обмотки питающего трансформатора и переключающим устройством. Вторичная обмотка ПТ 5 включается последовательно с обмоткой высшего напряжения силового нерегулируемого трансформатора ВН.

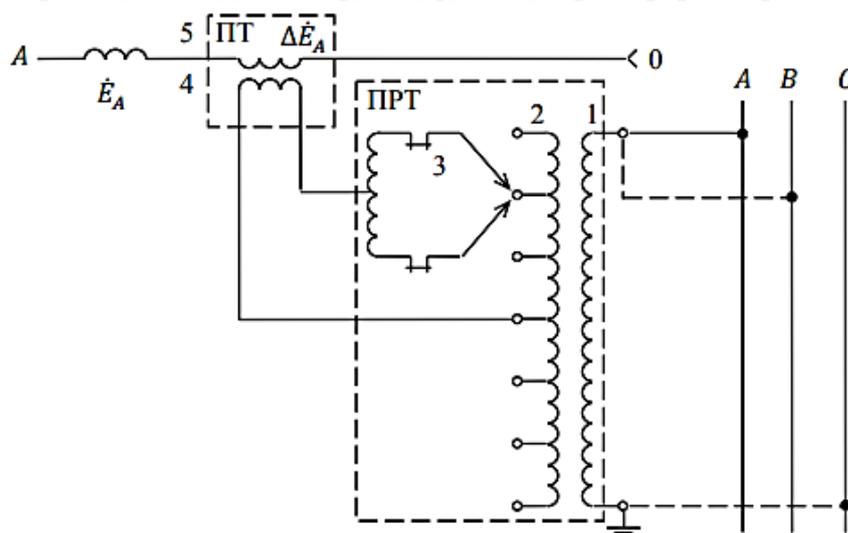


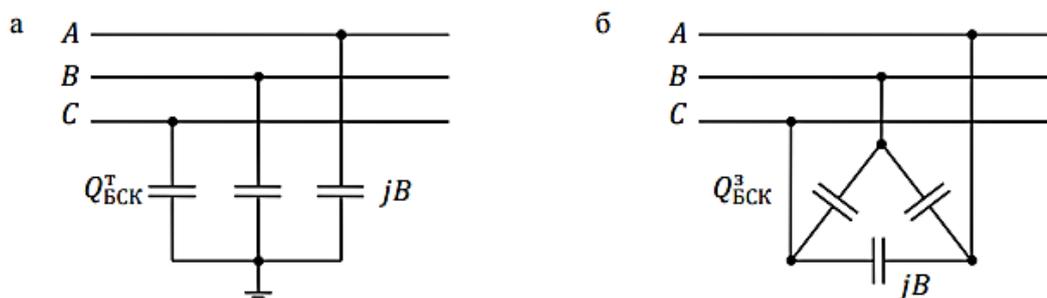
Рисунок 4 – Схема регулировочного трансформатора (фаза А)

При этом регулирование с помощью РПН трансформатора ПРТ выполняется по модулю и называется продольным регулированием. Коэффициент трансформации при таком регулировании является действительной величиной. Если первичная обмотка 1 фазы А ПРТ включена на соседние фазы В и С (пунктирные линии на рис. 4), то такое регулирование называется поперечным. При подключении обмотки 1 фазы А ПРТ к фазе А и одной из фаз В или С одновременно регулируются модуль и фаза напряжения и такое регулирование называется продольно-поперечным. При поперечном и продольно-поперечном регулировании коэффициент трансформации является комплексной величиной.

Линейные регулировочные трансформаторы обычно изготавливаются в трехфазном исполнении на напряжение 6...35 кВ с пределом регулирования $\pm 15\%$. Последовательные регулировочные трансформаторы (вольтодобавочные) изготавливаются в виде трехфазных автотрансформаторов с высшим напряжением 220, 330 кВ и в виде однофазных автотрансформаторов с высшим напряжением 500, 750 кВ с широкими пределами регулирования.

Ещё одним способом регулирования напряжений в электрической сети является изменение величины падения или потери напряжения на элементах электрической сети при помощи изменения перетоков реактивной мощности. Для изменения перетоков реактивной мощности с целью регулирования напряжения в электрических сетях используются компенсирующие устройства. Компенсирующие устройства предназначены для выработки или потребления реактивной мощности. Для выработки реактивной мощности используются: батареи статических конденсаторов; статические тиристорные компенсаторы; синхронные компенсаторы в перевозбужденном режиме. Для потребления реактивной мощности служат шунтирующие реакторы (ШР) и синхронные компенсаторы в недовозбужденном режиме.

Синхронный компенсатор (СК) — синхронная явнополюсная машина, работающая в режиме холостого хода и предназначенная для генерации или потребления реактивной мощности. СК потребляет из сети небольшую активную мощность, обусловленную собственными потерями. Положительными свойствами СК как источников реактивной мощности являются: а) возможность увеличения генерируемой мощности при понижении напряжения в сети вследствие регулирования тока возбуждения; б) возможность плавного и автоматического регулирования генерируемой реактивной мощности. Батареи статических конденсаторов (БСК) применяются для генерации реактивной мощности в узлах сети и включаются на шинах понижающих подстанций (шунтовые батареи). БСК собираются из отдельных конденсаторов, соединенных последовательно и параллельно. Последовательное соединение конденсаторов позволяет увеличить рабочее напряжение БСК, а параллельное — мощность БСК. В сетях трехфазного тока конденсаторы включаются по схеме звезды (рис. 5, а) и треугольника (рис. 5, б).



а – звезда; б – треугольник
Рисунок 5 – Схемы включения БСК

Шунтирующие реакторы можно применять для регулирования реактивной мощности и напряжения. Реактор — это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для использования его индуктивности в электрической цепи. Активное сопротивление реактора очень мало. Шунтирующие реакторы рассчитаны на напряжения 35...750 кВ и могут как присоединяться к линии, так и включаться на шины подстанции. На рис. 6. показаны обозначение реактора и включение его в сеть.

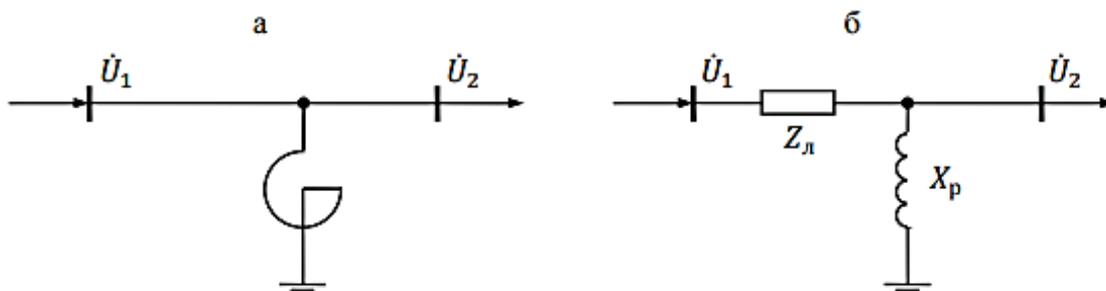


Рисунок 6 – Включение реактора в сеть (а) и схема замещения сети (б)

Статические тиристорные компенсаторы (СТК) предназначены для плавной (регулируемой) генерации или потребления реактивной мощности, что достигается использованием в СТК нерегулируемой батареи конденсаторов и включенного последовательно или параллельно с ней регулируемого реактора (рис. 7). Плавность регулирования реактивной мощности СТК достигается с помощью тиристорного блока, входящего в устройство управления.

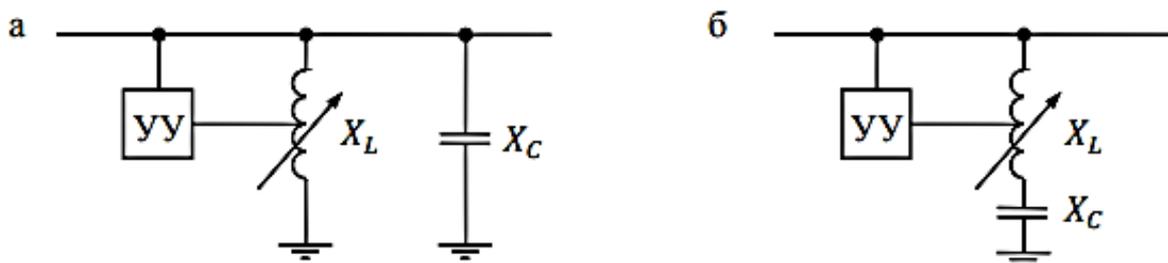


Рисунок 7 – Принципиальная схема СТК с параллельным (а) и последовательным (б) включением управляемого реактора

Регулирование напряжения в сети путем изменения ее параметров связано с изменением величины падения напряжения при изменении продольных параметров сети.

Потерь напряжения в сети зависит от сопротивления сети и нагрузки. Практически изменение сопротивлений сети связывают с изменением напряжений в ней при выборе сечений проводов и жил кабелей с учетом отклонений напряжения у приемников электроэнергии (по допустимой потере напряжения), а также при применении последовательного включения конденсаторов в воздушных линиях (установки продольной компенсации — УПК).

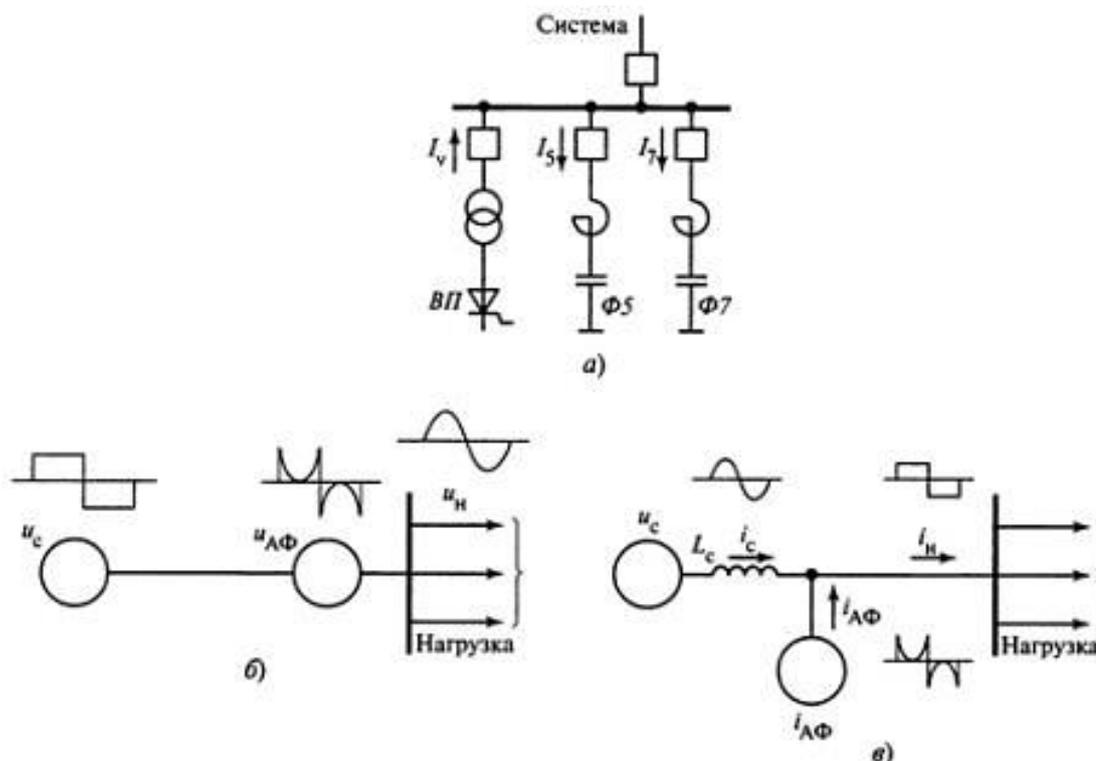
Последовательно включенные конденсаторы компенсируют часть индуктивного сопротивления линии, тем самым уменьшается реактивная слагающая в линии и создается как бы некоторая добавка напряжения в сети, зависящая от нагрузки.

Последовательное включение конденсаторов целесообразно лишь при значительной реактивной мощности нагрузки ($\text{tg}\varphi > 0,75$).

Применение УПК позволяет улучшить режимы напряжения в сетях. Однако следует учитывать, что повышение напряжения, создаваемое такими конденсаторами, зависит от значения и фазы тока, проходящего через УПК. Поэтому возможности регулирования последовательными конденсаторами ограничены. Наиболее эффективно применение УПК для снижения отклонений напряжения на перегруженных радиальных линиях.

Среди технических средств для уменьшения не синусоидальности напряжения применяют: фильтровые устройства: включение параллельно нагрузке узкополосных резонансных фильтров, фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), фильтросимметрирующих устройств (ФСУ).

На рис. 8, а показана схема поперечного (параллельного) пассивного фильтра высших гармоник. Звено фильтра представляет собой контур из последовательно соединенных индуктивности и емкости, настроенных на частоту определенной гармоники.



а — пассивного, б — активного фильтра (АФ) как источника напряжения, в — АФ как источника тока, ВП — вентильный преобразователь, Ф5, Ф7 — соответственно звенья фильтра на 5-ю и 7-ю гармоники, u_c — напряжение сети, $u_{АФ}$ — напряжение АФ, u_n — напряжение на нагрузке, I_c — ток сети, $I_{АФ}$ — ток, генерируемый АФ, I_n — ток нагрузки
 Рисунок 8 – Принципиальные схемы фильтров высших гармоник

С увеличением частоты индуктивное сопротивление реактора увеличивается пропорционально, а батареи конденсаторов — уменьшается обратно пропорционально номеру гармоники. На частоте одной из гармоник индуктивное сопротивление реактора становится равным емкостному сопротивлению батареи конденсаторов, и в цепи звена фильтра возникает резонанс напряжений. При этом сопротивление звена фильтра n току резонансной частоты равно нулю и оно шунтирует электрическую систему на этой частоте.

Идеальный фильтр полностью отфильтровывает токи гармоник, на частоты которых настроены его звенья. Однако практически наличие активных сопротивлений реакторов и батарей конденсаторов и неточная настройка звеньев фильтра приводят к неполной фильтрации гармоник. Параллельный фильтр представляет собой ряд звеньев, каждое из которых настроено на резонанс для частоты определенной гармоники.

Поперечные фильтры присоединяют как в местах возникновения высших гармоник, так и в пунктах их усиления. Поперечный фильтр является одновременно и источником реактивной мощности, и средством компенсации реактивных нагрузок.

Параметры фильтров подбирают таким образом, чтобы звенья были настроены в резонанс на частоты фильтруемых гармоник, а их емкости позволяли генерировать необходимую реактивную мощность на промышленной частоте. В ряде случаев для компенсации реактивной мощности параллельно фильтру включают батарею конденсаторов. Такое устройство называют фильтрокомпенсирующим (ФКУ). Фильтрокомпенсирующие устройства выполняют и функцию фильтрации гармоник, и функцию компенсации реактивной мощности.

В настоящее время помимо пассивных узкополосных фильтров применяют и активные фильтры (АФ). Активный фильтр — преобразователь переменного-постоянного тока с емкостным или индуктивным накопителем электрической энергии на стороне постоянного тока, формирующий методом импульсной модуляции определенное значение напряжения

или тока. В его составе интегрированные силовые ключи, соединенные по типовым схемам. Подключение АФ в сеть в качестве источника напряжения показано на рис. 8, б, в качестве источника тока — на рис. 8, в.

Таким образом, качество электрической энергии определяется совокупностью ее характеристик, при которых электроприемники могут нормально работать и выполнять заложенные в них функции. Поэтому измерения параметров сети имеют огромное значение в оценке качества электроэнергии. На сегодняшний день существуют приборы, способные определять и контролировать не только все показатели качества электрической энергии и величину вносимых электромагнитных помех, но и сторону их вносящую. Важную роль в обеспечении качества электрической энергии отводится как энергоснабжающей организации, так и потребителям.

Литература

1. Ананичаева С.С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие / С. С. Ананичаева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин.; 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ. 2012. 93 с.
2. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М.: Госстандарт России, 2013.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Госстандарт России, 2013.