

Ю. А. Папаика, Д. С. Грек

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК С УЧЕТОМ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Постановка вопроса

В настоящее время широкое применение получили электропечи сопротивления (ЭПС) нового поколения, оснащенные тиристорными преобразователями и адаптивными регуляторами температуры. В работах [1, 2] показано, что негативное воздействие высших гармонических составляющих тока и напряжения на основное электрооборудование (трансформаторы КТП, асинхронные двигатели и конденсаторные установки) выражается в виде появления дополнительных потерь активной мощности. Уровни этих потерь проанализированы аналитически и получены зависимости, позволяющие оценить режимные зоны с наибольшими потерями мощности. Используя такой подход, можно разработать систему управления режимами электропотребления ЭПС, ориентированную на энергосберегающие технологии проведения процесса нагрева. Однако в реальных условиях функционирования печного оборудования в полной степени исключить влияние высших гармоник в сетях только режимными изменениями параметров невозможно, поэтому возник вопрос анализа выбора параметров специальных средств для устранения (абсорбции) гармоник для условий, характерных при работе печных преобразователей. Исследованию характера воздействия несинусоидальности на электрооборудование и выбору параметров абсорбирующих фильтров посвящена данная статья.

Актуальность исследований по данному направлению заключается в режимных особенностях печных преобразователей нового поколения, которые позволяют регулировать температуру в широких пределах. Уровни высших гармоник при этом изменяются существенно, кроме того при использовании нового способа управления режимами электропотребления [3, 4] максимальные уровни генерации гармоник не будут оказывать существенного влияния.

Таким образом, анализ выбора параметров фильтрокомпенсирующих устройств при учете специальных режимов печного преобразователя является актуальной научно-технической задачей.

Данная работа продолжает ранее проведенные исследования в области электроснабжения и электромагнитной совместимости оборудования электротехнологии [1-4]. Исследуются режимы с учетом специальных характеристик ЭПС и дополнительных средств коррекции несинусоидальности с точки зрения повышения качества электроэнергии в сетях.

Цель работы – установить зависимости для выбора параметров фильтрокомпенсирующих устройств при учете специальных режимов работы ЭПС.

Основная часть

При работе ЭПС на всем интервале термообработки в электрическую сеть генерируются высшие гармонические составляющие. Исключения составляют особые режимные точки [1], в которых практически нет искажения кривой сетевого напряжения. Однако необходимо отметить, что работа печи в данных точках длительное время невозможна, поэтому проанализируем негативное влияние высших гармоник на электрообудование цеха.

Трансформаторы. Гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, создают дополнительные потери в трансформаторах, которые могут привести к значительным потерям энергии и быть причиной выхода из строя самого трансформатора вследствие перегрева.

Протекание по обмоткам трансформатора несинусоидальных токов, вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, приводит к увеличению активного сопротивления обмоток трансформатора и, как следствие, к дополнительному нагреву. Срок службы трансформатора зависит от нагрева его частей, что не позволяет при несинусоидальном токе использовать его на всю номинальную мощность, ее приходится занижать. Например, полная загрузка трансформатора может наступить при использовании лишь 80% номинальной мощности, указанной в паспортных данных.

Кроме того, высокочастотные гармоники тока – причина появления вихревых токов в обмотках трансформатора, что вызывает дополнительные потери мощности и перегрев трансформатора.

Батареи конденсаторов. Предназначены они для компенсации реактивной мощности нагрузки, т.е. для повышения коэффициента мощности электроустановки. Однако во время несинусоидальности тока батареи конденсаторов одновременно являются элементами, абсорбирующими гармоники со всей сети, так как сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте тока. Батареи конденсаторов изменяют нормальный путь гармоник тока от нелинейного потребителя к источнику питания, замыкая часть этого тока через себя. Так как сопротивления элементов сети носят индуктивный характер, то при применении установок компенсации реактивной мощности и наличии нелинейных электропотребителей появляется вероятность проявления резонансных явлений на отдельных элементах системы электроснабжения.

Наличие высших гармоник в напряжении питания индукционных электродвигателей является причиной возникновения в магнитном потоке составляющих на частотах высших гармоник, которые в свою очередь будут наводить гармоники ЭДС и, как следствие этого, в обмотках ротора появляются высшие гармоники тока. Эти гармоники будут взаимодействовать с основным магнитным потоком, создавая дополнительные механические моменты на валу электрической машины. В результате создаются гармонические пульсации вращающего момента на валу двигателя. В экстремальных случаях может возникнуть вибрация на резонансной частоте вращающейся массы ротора, приводящая к накоплению усталости металла и возможному разрыву вала ротора элек-

тродвигателя. В электрических машинах, кроме аналогичных потерь в статоре (потери в меди и магнитопроводе), из-за значительной разницы в скоростях вращающихся магнитных полей, создаваемых высшими гармониками, и скоростью вращения ротора возникают дополнительные потери в демпферных обмотках ротора и магнитопроводе электрической машины.

При подключении нелинейной нагрузки (двигателей постоянного тока, преобразователей, всех видов выпрямителей) к шинам, к которым подсоединена батарея конденсаторов, во избежание резонанса необходима установка фильтров и блокирующих конденсаторов.

В случаях, когда существуют гармонические лимиты по условиям выгоды или лимиты, установленные генерирующими организациями, достаточно часто батареи фильтрующих конденсаторов оказываются необходимыми для достижения требований стандартов IEEE 519-1992.

Схема с тремя отходящими ветвями для типичного фильтра, поглощающего 5-, 7- и 11-ю гармоники, представлена на рис. 1. Количество отходящих ветвей зависит от гармоник, которые необходимо поглотить и от реактивной мощности, которую необходимо компенсировать. В некоторых случаях даже одной отходящей ветви может быть достаточно для достижения поставленных задач.

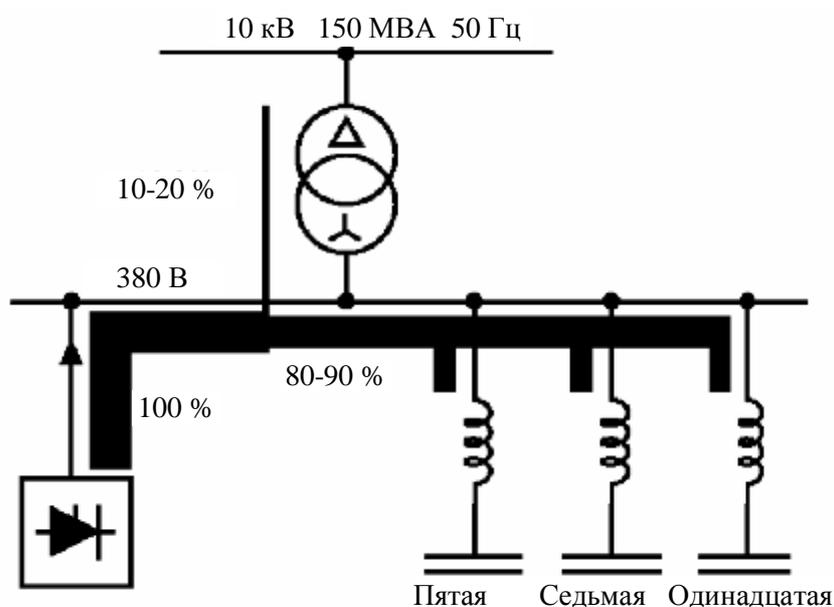


Рис. 1. Компенсация реактивной мощности батареями конденсаторов

В соответствии с IEEE 519-1992 падение напряжения может достигать 3% от номинального. Если к некоторой шине подключена нелинейная нагрузка и она вызывает падение напряжения меньше, чем на 3%, то это может привести к выводу, что любое электрическое оборудование может быть подключено к этой же шине без всякого опасения. Необходимо заметить, что если батарея конденсаторов подключена без реакторов к такой шине, то будет существовать определенная резонансная частота. Если эта резонансная частота совпадает с неко-

торой гармонической частотой, тогда будут иметь место значительное увеличение гармонических токов и падения напряжения.

В случае, если нет ограничений по гармоническим лимитам, могут быть установлены блокирующие конденсаторы. Необходимо учитывать также и тот факт, что большая часть гармоник в данном случае будет передаваться вверх по схеме, представленной на рис. 2.

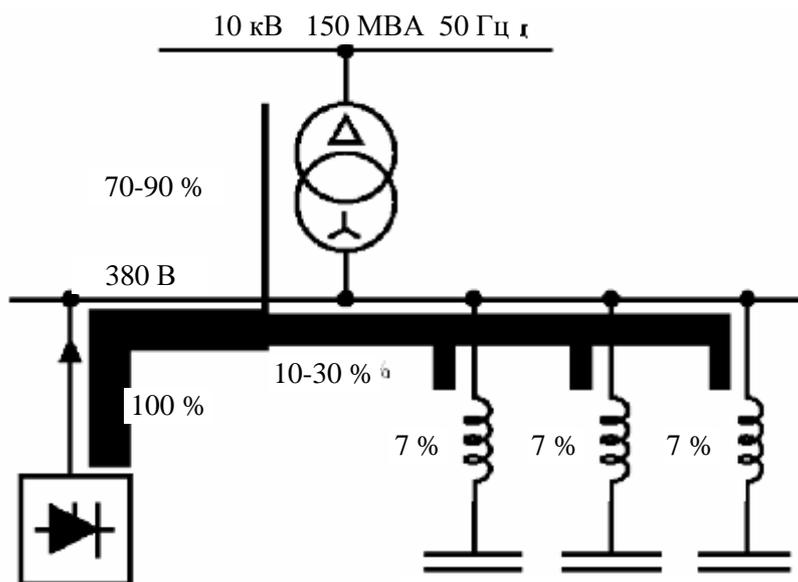


Рис. 2. Компенсация реактивной мощности батареями блокирующих конденсаторов

В современных сетях электроснабжения нагрузка нередко носит нелинейный характер вследствие применения полупроводниковых преобразователей переменного тока (например, при работе импульсных стабилизаторов и преобразователей электроэнергии). Это приводит к появлению высших гармоник тока, которые по своей величине становятся соизмеримыми с первой (50 Гц) гармоникой. Например, в шестиполупериодных преобразователях электроэнергии очень весомой является третья гармоника (150 Гц). Конденсаторы в установках компенсации реактивной мощности в совокупности с индуктивной нагрузкой могут образовывать колебательные контуры, близкие по частоте резонанса к частоте одной из высших гармоник. Это может привести к значительному увеличению тока конденсаторов и соответственному снижению их срока службы. А перенапряжения, возникающие при резонансе на элементах конденсаторной установки, и нагрузки могут стать причиной пробоя изоляции. Для устранения подобных проблем на этапе исследования объекта до внедрения конденсаторных установок компенсации реактивной мощности необходимо проводить анализ спектра тока потребляемой электроэнергии. При выявлении высших гармоник, сопоставимых с первой гармоникой, применяются фильтры-пробки, настроенные на частоту наиболее значительных гармоник.

В процессе работы трехфазного печного преобразователя возможна несимметрия фаз нагревателей. Это обусловлено применением специальных неполнофазных режимов питания нагревателей, улучшающих электромагнитную

совместимость в сети. Иногда в электропечных установках используют преобразователи постоянного тока.

Кроме того, возможны несимметричные режимы, обусловленные, в первую очередь, асимметрией напряжения сети переменного тока и отклонением индуктивностей фазовых дросселей схемы от номинальных значений. Анализ показал [1], что асимметрия сети влияет на процессы в преобразователе сильнее, чем асимметрия дросселей.

Фильтр, установленный на стороне постоянного тока, выполняется с выводом нулевой точки последовательного включения конденсаторов С1 и С2. Пренебрегая ответвлением высших гармоник тока в нагрузке, в силу односторонней проводимости ключей неуправляемого выпрямителя в конденсатор С1 поступает ток i_{01} , который является суммой анодных токов диодов, соединенных катодами, а в конденсатор С2 – ток i_{02} (сумма анодных токов диодов, соединенных анодами). Каждый из указанных токов в симметричном режиме имеет пульсацию частотой $3f_{сети}$. В асимметричных же режимах появляются пульсации на первой и второй гармонике сети.

Вторая гармоника тока замыкается через нагрузку и определяет пульсации напряжения на ней в зависимости от выбора конденсатора, емкость которого характеризуется последовательным соединением С1 и С2. Первая и третьи гармоники тока замыкаются через внутренний контур преобразователя, минуя нагрузку. При конечной емкости конденсаторов С1 и С2 эти токи вызывают противофазные пульсации напряжения на конденсаторах С1 и С2, причем третья гармоника пульсаций присутствует и в симметричной схеме при симметрии напряжения сети и практически не зависит от параметров несимметрии.

Величина пульсаций на каждой из гармоник определяется коэффициентом пульсации, равным отношению амплитуды i -й гармоники пульсации тока i_{0i} (или i_{02}) к постоянной составляющей тока нагрузки:

$$k_{pi} = \frac{I_{pi}}{I_{н.ср}}. \quad (1)$$

Поскольку колебания разных частот суммируются, то в наихудшем случае суммарная амплитуда пульсаций равна сумме амплитуд пульсаций всех гармоник. Используем суммарный коэффициент пульсации $k_{п\Sigma}$. Чем больше частота пульсаций, тем меньше вызываемое ею напряжение на конденсаторе, поэтому при расчете суммарного коэффициента пульсации введены весовые коэффициенты, причем за базовую частоту пульсации принята вторая гармоника сети:

$$k_{п\Sigma} = 2 \cdot k_{п1} + k_{п2} + 0,667 \cdot k_{п3} \quad (2)$$

Коэффициенты пульсаций являются вероятностными величинами, которые зависят не только от амплитуд обратной и нулевой последовательностей токов, но и от случайных фазовых соотношений. Были разработаны математические модели, которые позволяют выявлять максимальные значения коэффициентов пульсации. В таблице приведены максимальные значения коэффици-

ентов пульсаций тока i_{01} (или i_{02}). При предельной асимметрии сети, допускаемой ГОСТ 13109-97 (коэффициенты обратной и нулевой последовательности $K_{U2}=4\%$, $K_{U0}=4\%$), в трех различных режимах задания токов печного преобразователя:

режим 1 – величина сетевого тока фазы пропорциональна величине фазного напряжения;

режим 2 – величины всех сетевых токов одинаковы;

режим 3 – величина сетевого тока фазы обратно пропорциональна величине фазного напряжения.

Значения коэффициента пульсаций в зависимости от режима работы печи

| Характер несимметрии сети | $K_{U2}=4\%$, $K_{U0}=4\%$ | | | $K_{U2}=4\%$, $K_{U0}=0\%$ | | |
|-----------------------------------------|--------------------------------|------|-----|--------------------------------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Режим задания тока | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Максимальное значение $K_{п1}$, % | 11,5 | 8,5 | 6,5 | 6,5 | 4,7 | 3,5 |
| Максимальное значение $K_{п2}$, % | 13,5 | 12,5 | 12 | 13,5 | 11 | 7,5 |
| Максимальное значение $K_{п3}$, % | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 |
| Максимальное значение $K_{п\Sigma}$, % | 59 | 52 | 47 | 49 | 43 | 37 |

Пульсации напряжения в нагрузке при несимметрии питающего напряжения определяет только вторая гармоника. При заданном коэффициенте пульсаций на нагрузке $k_{п.н.}$ емкость конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{k_{п2}}{2 \cdot k_{п.н.} \cdot \pi \cdot f_{сет.н} \cdot R}, \quad (3)$$

где R – сопротивление нагрузки выпрямителя. Амплитуда пульсаций напряжения на нагрузке.

$$\Delta U_n = k_U U_\phi k_{п.н.} \quad (4)$$

Значительные пульсации напряжения на конденсаторе $C1$ (или $C2$) не только увеличивают напряжения, прикладываемые к тиристорам, но и могут неблагоприятно воздействовать на работу системы управления, включая функционирование замкнутого контура управления формированием сетевого тока. Для исключения этого необходимо увеличивать емкость конденсаторов фильтра по сравнению с выражением (4). Можно добавить, что даже при игнорировании пульсаций напряжений на конденсаторах при тех же требованиях к пульсациям в нагрузочной цепи суммарная емкость конденсаторов фильтра в печном преобразователе вдвое больше, чем в аналогичном активном выпрямителе на базе инвертора напряжения.

При исследовании режимов работы печного преобразователя получены зависимости, связывающие энергетические коэффициенты преобразователя и неполнофазные режимы питания нагревателей.

Выводы

1. При установке фильтрокомпенсирующих устройств для абсорбции высших гармоник уровень последних снижается на 80 – 90%. При определении соотношения сетевых параметров иногда достаточно установить фильтр на гармонику наименьшей частоты в спектре.

2. Специальные режимы работы печного преобразователя позволяют повысить энергетические показатели установки и уменьшить вредное влияние высших гармоник на сеть.

3. Коэффициенты пульсаций, вызванные ассиметричными режимами работы печного преобразователя постоянного напряжения, зависят от режима задания тока и параметров несимметрии сети (показатели несимметрии по прямой и обратной последовательности).

Список литературы

1. Папаика Ю.А. Рациональные режимы электропотребления печей сопротивления с тиристорным регулированием. // Техн. електродинаміка. Тем. вип. Ч. 4. Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – №25. – С. 87–89.
2. Папаика Ю.А., Лысенко А.Г. Обоснование применения специальных режимов нагрева электропечей сопротивления для повышения качества электроэнергии в распределительных сетях промышленных предприятий. // Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук.–техн. зб. – 2008. – Вип. 13. – С. 12–17.
3. Пат. 82854. Україна. Спосіб керування режимами електроспоживання нагрівальної установки./ Г.Г. Півняк, С.І. Випанасенко, Ю.А. Папаика // Відкриття. Винаходи. – 2008. – №10. – С. 3.
4. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. – McGraw-Hill, 1996. – 265 p.