

Д.Н. Прищепа,
кандидат техн. наук;
Ю.А. Загрудинов

НЕГАТИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Изложены влияние нелинейных потребителей электроэнергии на систему электроснабжения и различные устройства, питающиеся от этой системы. Рассматриваются негативные последствия, вызываемые высшими гармониками напряжения и тока, и возможные пути и средства их решения.

Ключевые слова: нелинейные потребители электроэнергии, высшие гармоники, потери, нагрев.

ВВЕДЕНИЕ

В недавнем прошлом основная часть электрической энергии потреблялась линейными нагрузками – лампами накаливания, нагревательными элементами, двигателями и другими подобными потребителями электроэнергии.

Современная электронная аппаратура в большинстве случаев представляет собой нелинейную электрическую нагрузку для системы электроснабжения (СЭС), то есть потребляет ток несинусоидальной формы, что создает искажения в питающей сети и как следствие искажение напряжения (степень искажений определяется коэффициентом искажения синусоидальности $K_{\text{и}}$ – отношением действующего значения высших гармоник к действующему значению основной (первой) гармоники [1]), которое воздействует на другое оборудование, получающее электроэнергию от общего источника. Если доля нелинейной нагрузки не превышает 10–15 % – проблем при эксплуатации системы электроснабжения, как правило, не возникает, если выше 25 % – возможны перегрев и дополнительные потери в элементах СЭС, сбои в коммуникациях и системах передачи данных, повреждение различных устройств и другие нежелательные эффекты.

ПРОБЛЕМЫ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ВЫСШИМИ ГАРМОНИКАМИ

С конца 1990-х годов резко возросла доля нелинейных электропотребителей. Дело в том, что для электропитания вышеуказанных потребителей используются встроенные импульсные источники питания, представляющие собой нелинейные нагрузки, сопротивление которых изменяется с течением времени.

Ток, потребляемый этими источниками, имеет ярко выраженный импульсный характер. Это объясняется схемными особенностями импульсных источников питания, а именно, наличием сетевого выпрямителя (диодного моста) и сглаживающего емкостного фильтра [2]. При приближении кривой питающего напряжения к максимальному значению электронные вентили диодного моста скачкообразно меняют свое сопротивление от бесконечности до определенного малого значения. Такой характер изменения сопротивления вентиля равносильен включению или отключению им нагрузки. Таким образом, периодическое включение и отключение приводят к появлению коротких импульсов потребляемого тока.

Такие токи представляют собой несинусоидальный периодический сигнал, который можно представить в виде суммы постоянной величины и бесконечного ряда синусоидальных сигналов с кратными частотами.

Наличие высших гармонических составляющих в токах нелинейных электропотребителей приводит к негативным последствиям:

- искажению формы питающего напряжения;
- перегреву нулевых рабочих проводников;
- наводке в телекоммуникационных и управляющих сетях;
- повышенному акустическому шуму в электромагнитном оборудовании;
- нагреву и дополнительным потерям в трансформаторах и электрических машинах.

Рассмотрим подробнее причины возникновения указанных последствий и возможные пути и средства их решения.

Форма питающего напряжения. Повышенное значение коэффициента амплитуды нагрузки K_a (крест-фактор – отношение пикового значения потребляемого тока к его действующему значению) указывает на то, что имеется большой пик потребляемого тока за половину периода сетевой частоты. Чем выше пиковое значение тока и меньше его длительность за полупериод напряжения сети, тем больше его искажение. Коэффициент амплитуды тока данной нагрузки изменяется в зависимости от характера источника электропитания, в то время как способность самого источника к обеспечению нагрузок с большим коэффициентом амплитуды определяется его полным внутренним сопротивлением и его способностью обеспечивать пиковые значения потребляемого от него тока.

Для многих устройств, выполняющих функции источников электропитания, такая способность может быть достигнута только путем завышения номинальных параметров этого оборудования. В частности, в современных генераторных установках переменного тока сверхпереходное реактивное сопротивление составляет приблизительно 15 %, что производит достаточно неблагоприятное воздействие на форму напряжения, если не используются специальные обмотки или мощность генератора не будет выбрана заведомо завышенной.

Современные источники бесперебойного питания (ИБП) способны контролировать форму напряжения на каждом полупериоде синусоиды. В настоящее время в подавляющем большинстве систем бесперебойного питания практически любой мощности используются инверторы на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT) при высокочастотном широтно-импульсном методе их управления. Такие системы обладают способностью питания нагрузок с высокими коэффициентами амплитуды тока (3 и выше) за счет переключений на высокой частоте и корректировке формы напряжения на каждом полупериоде. Эта способность отдавать ток с высокими пиковыми значениями может приводить к тому, что форма напряжения на выходе ИБП с двойным преобразованием энергии заметно лучше, чем у промышленной сети на входе системы [3].

Перегрев нулевых рабочих проводников. Высшие гармоники тока, кратные трем (т. е. 3, 9, 15, 21 и т. д.), определяющие высокое значение коэффициента амплитуды и генерируемые однофазными нагрузками, оказывают специфическое результирующее воздействие в трехфазных системах. В сбалансированной (симметричной) трехфазной системе гармонические (синусоидальные) токи во всех трех фазах сдвинуты на 120° по отношению друг к другу, и в результате сумма токов в нейтральном проводнике равна нулю. Следовательно, не возникает и падения напряжения на проводнике нейтрали в кабеле. Это утверждение остается справедливым для большинства гармоник. Однако некоторые из них имеют направление вращения вектора тока в ту же сторону, что и основная гармоника (первая, «фундаментальная», т. е. 50 Гц), то есть они имеют прямую последовательность. Другие же вращаются в обратном направлении и, таким образом, имеют обратную последовательность. Это не относится к гармоникам, кратным третьей:

$$n = 3(2k + 1), \text{ где } k = 0, 1, 2, \quad (1)$$

В трехфазных цепях они сдвинуты на 360^0 относительно друг друга, совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. Нечетные гармоники, кратные третьей, суммируются в проводнике нейтрали (рис. 1).

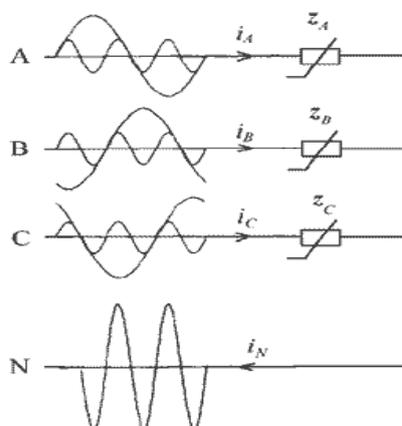


Рис.1. Процесс формирования тока нейтрали при нелинейной нагрузке

В результате с учетом того, что они составляют большую долю в действующем значении фазных токов, общий ток в нейтрали может превышать фазные токи:

$$I_n = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} \quad (2)$$

где I_3, I_9, I_{15} – действующие значения соответствующих гармоник тока.

Так, например, при фазных токах, равных 37 А, ток нейтрали составляет 55 А при частоте, равной 150 Гц. [4]. Неправильно спроектированные четырехпроводные кабельные линии трехфазных сетей могут перегреваться вплоть до воспламенения, подтверждая тем самым необходимость увеличения сечения проводников нейтрали трехфазных кабелей сети электропитания компьютерного оборудования. Гармоники, кратные третьей, приводят к падениям напряжения как в нейтрали, так и в фазных проводниках, вызывая искажения формы напряжения на других нагрузках, подключенных к этой сети.

Кроме указанного выше, в линейных напряжениях трехфазной сети будут отсутствовать гармоники, кратные трем, в связи с чем соотношение между фазным и линейным напряжениями при несинусоидальных токах становится меньше чем $\sqrt{3}$.

Наводки в телекоммуникационных и управляющих сетях. Когда телекоммуникационные или управляющие сети проходят вблизи силовых сетей, по которым протекают токи высших гармоник, в первых могут наводиться помехи и возникать искажения информационного сигнала. Величина искажения будет зависеть от частоты высших гармоник, длины параллельных участков сетей и расстояния между ними.

Акустический шум. В трансформаторах, дросселях и других электромагнитных элементах высшие гармоники тока, создавая электродинамические усилия, вызывают дополнительные акустические шумы.

Нагрев и дополнительные потери в трансформаторах и электрических машинах. Дополнительные потери, вызывающие перегрев трансформаторов при наличии высших гармоник, возникают из-за скин-эффекта в меди обмотки (увеличение активного сопротивления обмотки с ростом частоты), а также увеличением потерь на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе трансформатора.

В электрических машинах кроме аналогичных потерь в статоре (потери в меди и магнитопроводе) из-за значительной разницы в скоростях вращающихся магнитных полей, создаваемые

мых высшими гармониками, и скоростью вращения ротора возникают дополнительные потери в демпферных обмотках ротора и магнитопроводе электрической машины [5].

ВОЗМОЖНЫЕ СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Для ослабления влияния негативных эффектов, вызываемых высшими гармониками тока при нагрузках с высоким значением коэффициента амплитуды, могут использоваться различные методы.

Обеспечение симметричного режима работы трехфазной системы. В первую очередь необходимо добиться, насколько это возможно, сбалансированности нагрузок по фазам. При этом обеспечивается минимальный ток в проводнике нейтрали и минимальное содержание гармоник в выходном напряжении ИБП. Соответствующие схемы контроля и управления в ИБП будут поддерживать номинальное действующее значение выходного напряжения, в то же самое время стремясь обеспечить его синусоидальную форму. Не всегда возможно одновременно выполнить обе эти функции. В общем случае несбалансированная нагрузка воздействует на напряжение, вызывая его искажение. Хотя оно и относительно мало по величине, но также добавляется к общим искажениям в кабеле. Обычно преобладают те искажения напряжения, которые сгенерированы в распределительной сети.

Одним из рациональных способов симметрирования однофазных нагрузок в трехфазной сети является использование ИБП с двойным преобразованием энергии при трехфазном входе и однофазном выходе (3ф / 1ф). В этом случае разгружается нейтраль, так как она не участвует в работе трехфазного выпрямителя на входе ИБП, находящегося в нормальном режиме преобразования напряжения. Однако этот эффект пропадает при переходе ИБП на режим «Bypass».

Включение в систему разделительного трансформатора с обмотками «треугольник-звезда». Этот метод использовался на практике, но не всегда с успехом [6]. Предполагалось, что в этом случае трансформатор не пропускает гармоники, кратные третьей, и что отсутствие проводника нейтрали на стороне первичной обмотки исключает падение напряжения на нейтрали. Но такое утверждение оказалось правильным лишь частично. Сбалансированные гармоники, кратные третьей, наводят соответствующие магнитные потоки в стержнях сердечника трансформатора и, если они равны по величине и совпадают по фазе, напряжения, наведенные в первичной обмотке, будут скомпенсированы. Кроме того, любой трансформатор имеет индуктивность рассеяния, которая добавляется к существующему полному входному сопротивлению распределительной сети. Это может оказывать эффект уменьшения коэффициента амплитуды тока нагрузки и суммарного значения коэффициента искажений синусоидальности тока. Однако искажение напряжения увеличивается, а достижимое максимальное значение напряжения постоянного тока для питания инвертора ИБП снижается.

Использование фильтров. Третья гармоника является доминирующей по своему наиболее неблагоприятному воздействию в однофазных цепях. Включение в схему фильтра, который имеет низкое полное сопротивление на частоте этой гармоники, понижает генерируемое нелинейной нагрузкой напряжение. Применение таких фильтров в случае систем бесперебойного питания наиболее успешно для компенсации эффекта несбалансированных нагрузок, которые имеют тенденцию генерировать высокие уровни гармоник. Фильтры могут быть установлены как внутри ИБП, так и на выходном конце кабеля (т. е. на стороне нагрузки). Тогда токи третьей гармоники циркулируют между нагрузкой и фильтром, частично снижая суммарный ток в проводнике нейтрали.

Однако такое подключение не дает окончательного решения проблемы, если на выходе ИБП подключены распределенные нагрузки. Установленный таким образом фильтр защищает только часть нагрузки, к которой он непосредственно подключен. Поэтому схема подключения должна быть такой, чтобы фильтр защищал всю нагрузку, а не только ее часть. Это

может вызвать затруднения по стоимости оборудования и необходимой занимаемой площади при расстановке дополнительных устройств в нескольких участках распределительной сети на различных этажах здания.

Особое значение имеют фильтры, устанавливаемые на входе ИБП. Шестиполупериодные выпрямители, применяемые в трехфазных ИБП, создают высокий уровень пятой гармоники тока в питающей сети. Для снижения гармонического состава потребляемого тока и повышения коэффициента мощности системы в фазные провода включают индуктивные сопротивления (дрессели). Повышением эффективности подавления высших гармоник тока является включение входного фильтра ИБП, настроенного на пятую гармонику.

Снижение полного сопротивления распределительной сети. Это один из эффективных методов снижения нелинейных искажений. Кабели и сборные шины имеют полное сопротивление, которое прямо связано с длиной линий. Увеличение сечения кабелей (проводов) снижает активное сопротивление распределительной сети, но не снижает ее индуктивность. Максимальное эффективное сечение жил кабелей (проводов) составляет приблизительно 95 мм^2 . [6] С дальнейшим увеличением сечения кабелей их индуктивность остается относительно постоянной. Очевидно, что более эффективным будет использование параллельно соединенных кабелей (проводов). При возможности использования децентрализованной системы бесперебойного питания следует рассмотреть разделение всего устанавливаемого оборудования (т. е. устройств, входящих в состав защищаемой нагрузки) на секции, каждая из которых будет запитана от отдельного источника бесперебойного питания (ИБП).

Следует помнить о том, что во время профилактических, ремонтных и прочих работ системы бесперебойного питания должны и могут быть переключены в режим обхода («Bypass»). При этом возможно возрастание уровня искажений, так как нелинейная нагрузка напрямую будет подключена к первичному источнику переменного напряжения (генератор, трансформатор подстанции и т. п.). Форма напряжения сетевого электропитания часто бывает искажена из-за других нагрузок, не относящихся к критическим, но имеющих характеристики, подобные компьютерному и офисному оборудованию. Искажения формы напряжения электропитания, сгенерированные другим оборудованием, добавятся к искажениям от компьютерной нагрузки, которая была переключена на питание непосредственно от сети (на время профилактики или ремонта ИБП), создавая, таким образом, более высокие уровни искажений.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 54149 – 2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций: учеб. пособие для вузов / В.М. Бушуев, В.А. Деменский, Л.Ф. Захаров и др. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2011. – 384 с.
3. Климов В.П., Москалев А.Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания // Практическая силовая электроника: науч.-техн. сб. / под ред. Г.М. Малышкова, А.В. Лукина. – М.: АОЗТ "ММП-Ирбис", 2002. – Вып. 5.
4. Канустин В.М., Лопухин А.А. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть // Современные технологии автоматизации. – 1997. – №2.
5. Harmonic disturbances in networks and their treatment // Cahier Technique Schneider Electric.
6. Forrester W. Networking in Harmony // Electrical Contractor. – 1996. – Nov. / Dec.