

УДК 621.311.6.03

Высшие гармоники и основные способы их уменьшения в системах электроснабжения

Разумчик П.В.

Научный руководитель Радкевич В.Н., к.т.н., доцент.

На промышленных предприятиях широко применяются электроприемники, вольт-амперные характеристики которых нелинейны. Эти электроприемники потребляют из сети несинусоидальные токи при подведении к их зажимам синусоидального напряжения. Несинусоидальные токи, проходя по элементам сети, создают падения напряжения в сопротивлениях этих элементов и приводят к искажениям формы кривой напряжения в узлах электрической сети [1-4].

Несинусоидальные кривые токов и напряжений можно рассматривать как сложные гармонические колебания, состоящие из совокупности простых гармонических колебаний различных частот. Известно, что всякая периодическая функция $f(\omega t)$, удовлетворяющая условиям Дирихле (являющаяся ограниченной, кусочно-непрерывной, имеющая на протяжении периода ограниченное число экстремальных значений), может быть представлена тригонометрическим рядом Эйлера-Фурье:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)), \quad (1)$$

где A_0 - постоянная составляющая (нулевая гармоника); k - номер гармоники; a_k, b_k - коэффициенты ряда Эйлера-Фурье, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ - основная частота, T - период несинусоидальной периодической функции.

При $k=1$ из выражения (1) определяется гармоника, называемая первой или основной. Остальные члены ряда ($k>1$) называют высшими гармониками.

Рассмотрим высшие гармоники в трехфазных цепях и их классификацию.

Пусть для фазы A k -я гармоника напряжения определяется по формуле

$$u_{Ak} = U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (2)$$

где U_{km} - максимальное значение (амплитуда) напряжения k -й гармоники, φ_k - угол начальной фазы k -й гармоники.

Тогда с учетом, что $\omega t = 2\pi$, для k -х гармонических напряжений фаз B и C соответственно можно записать:

$$u_{Bk} = U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k - \frac{2\pi}{3}k); \quad (3)$$

$$u_{Ck} = U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k + \frac{2\pi}{3}k). \quad (4)$$

Всю совокупность гармоник k от 0 до ∞ можно распределить по трем группам в зависимости от их порядковых номеров. В первую группу входят гармоники с порядковыми номерами

$$k = 3n + 1, \quad (5)$$

где n - последовательный ряд чисел $(0, 1, 2, 3, \dots)$.

Гармоники данной группы образуют симметричные системы напряжений, последовательность которых соответствует последовательности фаз первой гармоники,

т.е. они образуют симметричные системы напряжений прямой последовательности. Действительно,

$$u_{Bk} = U_{km} \sin \left(k\omega t + \varphi_k - \frac{2\pi}{3}(3n+1) \right) = U_{km} \sin \left(k\omega t + \varphi_k - \frac{2\pi}{3} \right); \quad (6)$$

$$u_{Ck} = U_{km} \sin \left(k\omega t + \varphi_k + \frac{2\pi}{3}(3n+1) \right) = U_{km} \sin \left(k\omega t + \varphi_k + \frac{2\pi}{3} \right). \quad (7)$$

Ко второй группе относятся высшие гармоники с порядковыми номерами, определяемыми по выражению

$$k = 3n + 2. \quad (8)$$

Для этих гармоник имеют место такие соотношения:

$$u_{Bk} = U_{km} \sin \left(k\omega t + \varphi_k - \frac{2\pi}{3}(3n+2) \right) = U_{km} \sin \left(k\omega t + \varphi_k + \frac{2\pi}{3} \right); \quad (9)$$

$$u_{Ck} = U_{km} \sin \left(k\omega t + \varphi_k + \frac{2\pi}{3}(3n+2) \right) = U_{km} \sin \left(k\omega t + \varphi_k - \frac{2\pi}{3} \right). \quad (10)$$

Следовательно, гармоники данной группы образуют симметричные системы напряжений обратной последовательности.

Третью группу составляют гармоники, у которых порядковый номер $k = 3n$. Для этих гармоник справедливы следующие зависимости:

$$u_{Bk} = U_{km} \sin \left(k\omega t + \varphi_k - \frac{2\pi}{3}3n \right) = U_{km} \sin (k\omega t + \varphi_k); \quad (11)$$

$$u_{Ck} = U_{km} \sin \left(k\omega t + \varphi_k + \frac{2\pi}{3}3n \right) = U_{km} \sin (k\omega t + \varphi_k). \quad (12)$$

Таким образом, векторы напряжений данной группы во всех фазах в любой момент времени имеют одинаковые модули и направления, т.е. эти гармоники образуют системы нулевой последовательности.

Рассмотрим основные источники высших гармоник тока и напряжения на промышленных предприятиях [1-4]:

1. Вентильные преобразователи.

Токи, потребляемые из сети вентильными преобразователями, помимо основной гармоники, содержат ряд гармоник более высоких порядков, номера которых определяются выражением [3]

$$k = pn \pm 1, \quad (13)$$

где p – число фаз выпрямления, n – натуральный ряд чисел.

В амплитудных спектрах первичных токов преобразователей содержатся как канонические гармоники ($k = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$), номера которых определяются по формуле (2), так и аномальные гармоники ($k = 2, 3, 4, 6, 8, 10, \dots$). Амплитуды аномальных гармоник, по сравнению с амплитудами канонических гармоник, как правило, невелики.

2. Дуговые электрические печи.

Уровень 5, 7, 11 и 13-й гармоник тока, генерируемых дуговыми электропечами невелик, а вот 2, 3, 4, 6-я гармоники значительно ощутимы. Эквивалентное действующее значение токов высших гармоник в токе печи за счет аномальных гармоник возрастает в 1,8-2 раза.

3. Установки дуговой и контактной электросварки.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения установок дуговой и контактной сварки определяется в основном 5, 7, 11, 13-й гармониками.

4. Газоразрядные лампы.

Токи 3-й и 5-й гармоник газоразрядных ламп составляют 10 и 3 % от тока 1-й гармоники. Эти токи совпадают по фазе в соответствующих линейных проводниках сети и, складываясь в нулевом рабочем проводнике сети 400/230 В, обуславливают ток в нем, почти равный фазному току (или даже больше фазного). Остальными гармониками для газоразрядных ламп можно пренебречь.

В результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей высших гармоник, а также повышенного нагрева токоведущих частей из-за высших гармоник, в электроустановках наблюдаются следующие негативные последствия [1,2,4]:

- ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, кабелей;
- ухудшение коэффициента мощности электроприемников;
- ухудшение или нарушение работы устройств автоматики, телемеханики, компьютерной техники и других устройств с элементами электроники;
- увеличение погрешности измерений индукционных счетчиков электроэнергии, которые приводят к неполному учету потребляемой электроэнергии;
- перегрев и разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий вследствие их перегрузки токами третьей гармоники;
- ухудшение условий работы батарей конденсаторов;
- сокращение срока службы электрооборудования из-за интенсификации теплового и электрического старения изоляции;
- дополнительные потери в трансформаторах, которые могут привести к значительным потерям электроэнергии;
- выход из строя трансформаторов вследствие перегрева;
- необоснованное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей вследствие дополнительного нагрева внутренних элементов защитных устройств;
- нарушение работы вентильных преобразователей при высоком уровне высших гармонических составляющих.

Существуют следующие способы подавления высших гармоник тока, такие как:

1. Включение линейных дросселей.

Простейшим способом снижения уровня генерируемых нелинейными нагрузками высших гармоник тока во внешнюю сеть является последовательное включение линейных дросселей. Такой дроссель имеет малое значение индуктивного сопротивления на основной частоте 50 Гц и значительные величины сопротивлений для высших гармоник, что приводит к их ослаблению.

2. Применение пассивных фильтров.

Применение последовательно включенных линейных дросселей в ряде случаев не позволяет уменьшить гармонические искажения тока до желаемых пределов. В этом случае целесообразно применение пассивных LC-фильтров, настроенных на определенный порядок гармоник.

3. Применение специальных разделительных трансформаторов.

Разделительный трансформатор с обмотками "треугольник-звезда" позволяет эффективно бороться с гармониками, кратными третьей, при сбалансированной нагрузке.

4. Применение магнитных синтезаторов.

Магнитный синтезатор обеспечивает защиту нагрузки от различных искажений напряжения питания, в частности, от провалов и импульсов напряжения, импульсных и высокочастотных помех, наличия высших гармоник, вызывающих искажения синусоидальной формы входного напряжения.

5. Применение активного кондиционера гармоник (АКГ).

Принцип действия активного кондиционера гармоник основан на анализе гармоник тока нелинейной нагрузки и генерировании в распределительную сеть таких же гармоник тока, но с противоположной фазой. Как результат этого, высшие гармонические составляющие тока нейтрализуются в точке подключения АКГ. Это означает, что они не распространяются от нелинейной нагрузки в сеть и не искажают напряжения первичного источника энергии.

6. Улучшение формы кривой сетевого тока.

Этого можно достичь компенсацией высших гармоник магнитного потока трансформатора преобразователя наложением высших гармоник на токи обмоток трансформатора или обеспечением специальных законов управления преобразователями.

7. Увеличением числа фаз преобразователей.

8. Рациональным построением схемы электроснабжения.

В системах электроснабжения промышленных предприятий наиболее распространенными средствами уменьшения влияния высших гармоник являются применение трансформаторов преобразователей с повышенным напряжением 110-330кВ, питание нелинейных нагрузок от отдельных трансформаторов, подключение параллельно нелинейным нагрузкам синхронных и асинхронных электродвигателей

Вывод

Знание физических процессов возникновения высших гармоник тока и напряжения в сетях электроснабжения, источников возникновения высших гармоник, их негативного влияния на потребители электроэнергии и электрическую сеть, существующих методов борьбы с высшими гармониками позволяет сформировать аспект проблемы и, при правильном подходе и разностороннем анализе, наметить пути ее коренного решения.

Литература

1. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет, 2004, – 214с.
2. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336с.
3. Основы теории цепей/ Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов. –М.: Энергия, 1975. – 752с.
4. Федоров А. А., Каменева В. В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472с.