

ПОМЕХОГЕНЕРИРУЮЩЕЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А. А. Довгун

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научные руководители: Т. В. Алферова, А. А. Алферов

На современных промышленных предприятиях значительное распространение получили нагрузки, вольт- или вебер-амперные характеристики которых нелинейны. Обычно такие нагрузки называют нелинейными. К их числу относятся в первую очередь различного рода вентильные преобразователи (ВП), главным образом тиристорные, установки дуговой и контактной электросварки, электродуговые сталеплавильные печи (ЭДСП) и руднотермические печи, газоразрядные лампы, силовые магнитные усилители и трансформаторы. Эти нагрузки потребляют из сети ток, кривая которого оказывается несинусоидальной, а в некоторых случаях и непериодической; в результате возникают нелинейные искажения кривой напряжения сети или, другими словами, несинусоидальные режимы.

Несинусоидальные режимы неблагоприятно сказываются на работе силового электрооборудования, систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Возникающие в результате воздействия высших гармоник (ВГ) экономические ущербы обусловлены главным образом ухудшением энергетических показателей, снижением надежности функционирования электрических сетей и сокращением срока службы электрооборудования. Иногда имеют место ухудшение качества и уменьшение количества выпускаемой продукции. Поэтому прогрессирующее внедрение вентильного электропривода и электротехнологии обусловило важность и актуальность решения проблемы ВГ в электрических сетях.

Основной круг вопросов, составляющих содержание этой проблемы, сводится к следующему:

- количественной оценке основных источников высших гармоник тока и напряжения, генерируемых различными нелинейными нагрузками в системах электроснабжения промышленных предприятий;
- прогнозированию значения ВГ тока и напряжения в СЭС промышленного предприятия;
- снижению уровней ВГ.

1. Количественная оценка основных источников высших гармоник тока и напряжения, генерируемых различными нелинейными нагрузками в системах электроснабжения промышленных предприятий (теоретическая часть)

Основными источниками высших гармоник в системах электроснабжения являются вентильные преобразователи. Существенное влияние на несинусоидальность напряжения сети могут оказывать и установки электросварки, электродуговые печи, газоразрядные источники света. Силовые трансформаторы и двигатели также являются источниками высших гармоник при работе их на нелинейной части кривой намагничивания. Однако это оборудование работает обычно в условиях сравнительно

невысокого насыщения стали, и поэтому создаваемые им токи высших гармоник относительно невелики.

Вентильные преобразователи находят широкое применение на заводах черной и цветной металлургии и предприятиях химической промышленности. Потребителями постоянного тока на предприятиях являются регулируемый электропривод, электролизные установки, гальванические ванны, электрифицированный железнодорожный транспорт, магнитные сепараторы и другие технологические установки. Суммарная номинальная мощность вентильных преобразователей на предприятиях достигает 800 МВт и более.

В настоящее время известно большое количество схем выпрямления трехфазного тока. Однако для установок большой и средней мощности наибольшее распространение получили трехфазная мостовая схема Ларионова и шестифазная мостовая схема с уравнительным реактором. Разложение кривых первичных (потребляемых из сети) токов указанных схем выпрямления на гармонические составляющие показывает, что помимо основной гармоники токи содержат ряд гармоник более высоких порядков, номера которых определяются выражением

$$\nu = \rho \cdot k + 1, \quad (1)$$

где ρ – число фаз выпрямления; $k = 1, 2, 3, \dots$ – последовательный ряд чисел.

В настоящее время в промышленности получили распространение вентильные преобразователи с усложненными законами управления. Такие преобразователи имеют улучшенные энергетические показатели и оказывают меньшее влияние на питающую их сеть.

В сварочных и зарядных агрегатах, системах возбуждения синхронных машин получили распространение полупроводимые мостовые схемы. Такие преобразователи генерируют как нечетные, так и четные гармоники.

Приведенные исследования показали, что в амплитудных спектрах первичных токов преобразователей содержатся как канонические гармоники ($\nu = 5; 7; 11; 13, \dots$), номера которых определяются по формуле (1), так и неканонические, или аномальные гармоники ($\nu = 2; 3; 4; 6; 8; 9; 10, \dots$). Основной причиной появления аномальных гармоник является асимметрия импульсов управления, свойственная всем широко распространенным системам управления. Амплитуды аномальных гармоник по сравнению с амплитудами канонических гармоник, как правило, невелики и не превосходят 2–3 % тока первой гармоники.

Дуговые электроды получили широкое распространение на металлургических и машиностроительных предприятиях. Печи строятся емкостью от половины до сотен тонн с трансформаторами мощностью от 0,4 до 60 МВА. Нелинейность вольт-амперной характеристики дуги приводит к генерации печами токов высших гармоник. Формы кривых тока печей в большой степени зависят от режима горения дуги в различные периоды плавки. В начальный период расплавления ток печи колеблется между токами режимов холостого хода и металлического короткого замыкания. Форма кривых токов в этот период значительно отличается от синусоидальной, но даже в этот период времени уровни гармоник, генерируемые ДСП, оказываются в 3–4 раза меньше уровней высших гармоник, генерируемых вентильными преобразователями той же мощности.

С появлением жидкого металла плавку ведут при короткой дуге, колебания тока становятся меньше. Форма кривых тока улучшается и приближается к синусоидальной.

В токах электродуговых печей наряду с гармониками 5, 7, 11, 13... порядков содержатся также гармоники 2, 3, 4, 6... порядков, которые по аналогии с соответствующими гармониками вентиляльных преобразователей называют аномальными. Основными причинами появления аномальных гармоник являются непрерывные изменения условий горения дуг печи и неполное выравнивание сопротивлений короткой сети.

Величины аномальных гармоник тока близки к величинам 5-й и 7-й гармоник. Эквивалентное действующее значение токов высших гармоник в токе печи за счет аномальных гармоник возрастает в 1,8–2 раза.

В настоящее время на промышленных предприятиях большое распространение получают *машины контактной электросварки*, включение которых производится с помощью игнитронных или тиристорных контактов. Для плавного регулирования сварочного тока тиристорные и игнитронные контакторы снабжаются системами фазового регулирования. Применение фазового регулирования приводит к искажению формы тока, потребляемого сварочными машинами.

Определяющими гармониками при разложении тока являются первая, третья и пятая. Проведенные экспериментальные исследования показали, что в спектре токов машин контактной электросварки, кроме нечетных гармоник, присутствуют также четные гармоники. Появление четных гармоник объясняется разбросом углов регулирования игнитрона, величина которого достигает 10° . Влияние четных высших гармоник на несинусоидальность токов сварочных машин невелико.

Для четырехпроводных промышленных и городских сетей 380/220 В источником гармоник в основном является люминесцентное освещение. *Люминесцентные лампы*, а также мощные дуговые ртутные люминесцентные лампы (типа ДРЛ) имеют нелинейные вольт-амперные характеристики. При этом форма тока лампы близка к треугольнику, а форма напряжения на лампе имеет примерно прямоугольный вид. Наибольшее значение в спектре высших гармоник тока лампы имеет 3-я гармоника. Ее величина может достигать 19 % тока первой гармоники.

Типичной нелинейной нагрузкой в электрических сетях является силовой трансформатор. Это объясняется нелинейной характеристикой намагничивания стального сердечника трансформатора. При этом при синусоидальном первичном напряжении намагничивающий ток имеет несинусоидальную форму.

Вследствие несимметрии магнитопроводов трехфазных трехстержневых трансформаторов действующие значения намагничивающих токов крайних фаз в 1,3–1,5 раза больше намагничивающего средней фазы. По той же причине в намагничивающих токах имеются все нечетные высшие гармоники, в том числе и кратные трем. Наибольший удельный вес, кроме основной, имеют 3-я, 5-я и 7-я гармоники.

2. Прогнозирование значения ВГ тока и напряжения в СЭС промышленного предприятия (практическая часть)

Для прогнозирования высших гармонических составляющих необходимо выполнить расчет несинусоидальных режимов. Для реализации расчета режима высших гармоник на ЭВМ была разработана программа «Sigma». Программа позволяет выполнять расчеты несинусоидальности токов и напряжений в системах электропитания промышленного предприятия. Источником токов высших гармоник является вентиляльный преобразователь (6-, 12-фазный), а также любой другой источник, задающийся амплитудой и углом каждой гармоники.

В результате работы программы «Sigma» определяются действующие значения токов отдельных гармоник в ветвях и напряжений в узлах схемы, а также эквивалентные действующие значения токов в ветвях и напряжений в узлах и суммарные потери активной мощности в элементах системы электроснабжения от токов высших гармоник.

Л и т е р а т у р а

1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с. : ил.
2. Гераскин, О. Т. Применение вычислительной техники для расчета высших гармоник в электрических сетях / О. Т. Гераскин, В. В. Черепанов. – М. : ВИПКэнерго, 1987. – 53 с. : ил.