

## СТЕПЕНЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ЭЛЕМЕНТЫ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А. А. Алферов

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

Влияние несинусоидальности напряжений и токов на работу электрооборудования ощущается практически во всех странах с развитой промышленностью и, как правило, приводит, с одной стороны, к увеличению потерь напряжения и мощности в сетях, уменьшению их пропускной способности, а с другой – к нарушению нормальной работы и уменьшению срока службы электрооборудования, снижению производительности труда, а также количества и качества выпускаемой продукции. Например, известно, что при допустимых значениях несимметрии напряжения 2 % и несинусоидальности 5 % срок службы асинхронных двигателей сокращается на 21 %, синхронных – на 32 %, трансформаторов – на 8 %, кабельных линий – на 40 % [1].

Один из первых экспериментов по влиянию высших гармоник на кабельные линии был проведен в 1984 г. [2]: его целью было выяснить, способствуют ли высшие гармоники ускоренному старению изоляции проводов и кабелей. Для выяснения этого положения учеными были проведены замеры токов утечки кабелей, проложенных почти одновременно и работающих в сходных температурных условиях; часть обследованных кабелей работала при практически синусоидальном напряжении, другая – при уровне высших гармоник в кривой напряжения в пределах 6–8,5 % (преобладали 5 и 7-я гармоники). Токи утечки во втором случае через 2,5 года эксплуатации оказались в среднем на 36 %, через 3,5 года – на 43 % больше, чем в первом.

Опыт эксплуатации свидетельствует о том, что в сетях с большим удельным весом вентильных нагрузок часто возникают однофазные замыкания в кабеле. Так, в сетях непрерывного толстолистого стана горячего проката число однофазных замыканий на землю за год оказалось на 30–40 % больше, чем в сетях, где преобразователи отсутствовали [2].

Присутствующие в кабельных линиях нелинейных электропотребителей высшие гармонические составляющие приводят к негативным последствиям:

1. Возможному перегреву и разрушению нулевых рабочих проводников кабельных линий вследствие их перегрузки токами гармоник кратных трем.

Согласно ПУЭ нулевой провод не защищается от перегрева автоматическими выключателями либо предохранителями. Существующие системы электроснабжения проектировались с учетом линейной нагрузки, когда потребляемый электроприемниками ток содержал лишь основную гармонику (50 Гц). Следовательно, ток в нулевом проводе не мог превышать ток в наиболее нагруженной фазе, т. е. защита на фазных проводах одновременно защищала от перегрева и нулевой провод.

При рассмотрении вопроса искажения формы кривой тока и напряжения сети низкого напряжения (НН) следует учитывать, что подавляющее большинство потребителей такой сети, в том числе и нелинейных, являются однофазными, а сеть выполняется трехфазной с нулевым проводом. В результате в нулевом проводе будут протекать токи всех высших гармоник (ВГ) нулевой последовательности. При этом возникает проблема перегрузки нулевого провода в четырехпроводных сетях НН, вызванная неравномерной загрузкой фазных проводов при подключении к ним однофазных нелинейных потребителей [3].

Проделанный в работе [4] анализ свидетельствует, что теоретически максимальный ток нейтрали с учетом гармоник в 1,73, а иногда и в 3 раза превышает фазный. При резкопеременной нагрузке пульсации тока наблюдаются в каждой из фаз в разное время. Поскольку все эти токи протекают в нейтрали, о взаимной компенсации речи быть не может. В случае если пики нагрузки не пересекаются, ток нейтрали будет равен утроенному фазному току. Эта ситуация достаточно типична для сетей с большим удельным весом электронного оборудования.

Сегодня, когда токи в нулевых проводах превосходят токи фазных проводов, а защита от токовых перегрузок в цепях нулевых проводов не предусмотрена, возможен перегрев и разрушение нулевых проводов кабельных линий вследствие их перегрузки токами нулевой последовательности.

С учетом того что состав электроприемников потребителя изменяется без реконструкции электрической сети, можно ожидать перегорания нулевых проводников из-за протекания токов гармоник кратных трем. Обрыв нулевого провода может привести к смещению нейтрали и, как следствие, выходу из строя электроприемников.

2. Созданию дополнительных потерь в кабельных линиях гармониками, генерируемыми нелинейной нагрузкой.

Проведенные в 90-х гг. XX в. расчеты [5] показали, что в сетях НН 40 % общего объема дополнительных потерь обусловлены отклонениями напряжений, 40 % – несинусоидальностью напряжений и 20 % – несимметрией напряжений.

Сопротивление переменному току состоит из сопротивлений потерь, вызванных поверхностным эффектом и эффектом близости.

Поверхностный эффект проявляется в том, что под действием магнитного поля кабеля ток, протекающий по жиле, вытесняется ближе к ее поверхности. Таким образом, плотность тока в слоях жилы, прилегающих к поверхности, несколько выше, чем в центре жилы, что приводит к увеличению общего сопротивления жилы.

При очень больших частотах ток практически существует только в тонком поверхностном слое, т. е. внутри достаточно толстого проводника ток высокой частоты не течет. Данное явление приводит к дополнительным потерям мощности, рассеиваемой в жиле кабельной линии, и дополнительному ее нагреву.

Эффект близости вызван взаимодействием внешних электромагнитных полей (ЭМП) вокруг проводников линии. При малом расстоянии между проводником с током (основным) и другими (соседними) в последних возникают вихревые токи того же направления, что и в основном. Если по соседнему проводнику распространяется ток противоположного направления, то вихревые токи совпадают по направлению с током на близко расположенных участках проводников. Вследствие этого плотность тока на этих участках увеличивается, а в более удаленных – уменьшается, т. е. ток фактически вытесняется на близко расположенные поверхности проводников. При одинаковых направлениях токов происходит обратное – плотность тока увеличивается на удаленных один от другого участках поверхности проводников и уменьшается на близко расположенных. Изменение плотности тока по сечению проводника увеличивает его погонное сопротивление [6].

Высшие гармоники тока также приводят к дополнительным потерям в изоляционных материалах кабельных линий. Данные потери могут обуславливаться сквозным током или активными составляющими поляризационных токов. В случае высоких напряжений потери возникают вследствие ионизации газовых включений внутри диэлектрика, особенно интенсивно происходящих при высоких частотах.

С повышением частоты питающего напряжения происходит снижение активного и емкостного сопротивления изоляции и, как следствие, увеличение токов утечки через нее [7].

Также гармоники тока приводят к дополнительным потерям электроэнергии и напряжения в линиях электропередач. Гармоники напряжения увеличивают свое воздействие на диэлектрик кабельной линии пропорционально увеличению максимального значения амплитуды, что увеличивает число повреждений кабелей и стоимость их ремонтов [8].

В работе [9] вводится обобщенный показатель несинусоидальности, который является экономически обоснованным с точки зрения ущерба от высших гармоник. При этом рассматриваются следующие составляющие ущерба: сокращение срока службы оборудования вследствие ускоренного старения изоляции, стоимость ремонта кабельных сетей вследствие повышенной аварийности и дополнительные активные потери в электрических сетях. Причем в этом случае отсутствуют нарушения нормальной работы электроприемников (повреждение оборудования, сбой в работе чувствительного оборудования и т. д.). Обобщенный показатель рассчитывается для конкретной СЭС различных отраслей народного хозяйства. Таким образом, предложенный показатель позволяет оценить качество электроэнергии в конкретной сети в том случае, если нет нарушений нормальной работы электроприемников.

3. Ускоренному старению изоляции проводов и кабелей, электрооборудования и, следовательно, сокращению срока их службы.

При высоком уровне высших гармоник происходит ускоренное старение изоляции КЛ как вследствие более интенсивного нагрева, так и ускорения ионизационных процессов, что приводит к снижению срока их службы.

Проблема старения электроизоляционных материалов, используемых при изготовлении силовых кабелей, имеет важное практическое значение, так как эти изделия предназначены для многолетней эксплуатации и преждевременный выход их из строя ведет к серьезным негативным последствиям. Однако в процессе эксплуатации кабели с полимерной изоляцией часто выходят из строя значительно раньше гарантированного срока службы. Это связано с возникновением и развитием в полимерной изоляции под действием электрического поля и влаги системы тонких цилиндрических микроканалов – триингов. Изучение частотных характеристик триингов дало возможность установить, что механизм воздействия сил электрического поля на полимер ускоряется с повышением частоты. С повышением температуры существенно возрастает диффузия воды в полимеры, что снижает их механическую и электрическую прочность [10].

В ходе проведения исследований [11] влияния преобразователей частоты на изоляцию силовых кабелей нефтедобывающих станций была выявлена проблема выхода из строя кабелей, питающих погружные установки центробежных насосов нефтедобывающих станций. На установках совместно с преобразователями частоты применялись кабели КППБП – это трехжильные плоские кабели с двухслойной изоляцией и допустимой температурой нагрева 120 °С. В процессе эксплуатации подобных установок наблюдались неоднократные повреждения и отказы силовых кабелей в виде оплавлений и пробоя изоляции. В некоторых случаях срок службы кабелей не превышал 100 дней.

Таким образом, несинусоидальность кривой напряжения и тока приводит к увеличению потерь мощности и электроэнергии в кабеле, ускоряет процесс старения изоляции и тем самым ведет к сокращению срока службы кабелей и электрооборудования и, как следствие, повышению вероятности аварийного отказа.

#### Литература

1. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И. В. Жежеленко [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.

2. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
3. Шидловский, А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. – Киев : Навук. думка, 2005. – 209 с.
4. Оценка теплового режима кабеля питающего нелинейную нагрузку / В. Н. Тульский [и др.] // Пром. энергетика. – 2012 – № 7. – С. 42–45.
5. Кузнецов, В. Г. Проблемы повышения качества энергии в электрических сетях и системах / В. Г. Кузнецов // Техн. электродинамика. – 1991. – № 2. – С. 84–92.
6. Кохно, М. Т. Системы и средства электросвязи и проводного вещания : учеб. пособие / М. Т. Кохно, В. М. Логинов. – Минск : ИВЦ Минфина, 2010. – 352 с.
7. Алферов, А. А. Оценка потерь мощности через изоляцию кабельных линий на промышленных предприятиях при наличии в сети гармоник отличных от фундаментальной / А. А. Алферов, Н. В. Грунтович // Сб. материалов XII-й Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов. – Гомель, 26–27 апр. 2012 г. / ГГТУ им. П. О. Сухого. – С. 496–499.
8. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
9. Жежеленко, И. В. Нормирование уровней гармоник с учетом экономического ущерба / И. В. Жежеленко // Электричество. – 1976. – № 5. – С. 64–68.
10. Андреев, А. М. Исследование старения электроизоляционных материалов силовых кабелей и конденсаторов / А. М. Андреев, В. А. Канискин, Ю. А. Полонский // Электричество. – 1999. – № 1. – С. 39–44.
11. Зализный, Д. И. Влияние преобразователей частоты на изоляцию силовых кабелей нефтедобывающих станций / Д. И. Зализный, О. Г. Широков, С. Н. Кухаренко // Энергетика. – 2011. – № 1. – С. 17–23.