

транспортировке, что позволяет автоматизировать процессы их использования.

Заключение

Правительством уделяется огромное внимание вопросам обеспечения энергетической безопасности и независимости страны. Дальнейшее повышение энергоэффективности Республики Беларусь будет обеспечиваться за счет глубокой модернизации производств, внедрения современных наукоемких технологий, цифровизации и электрификации. Мировой опыт и национальная стратегия едины в главном: только комплексный подход, объединяющий технологические инновации (включая энергоаудит и эффективный теплотранспорт), развитие кадрового потенциала, активную государственную политику и вовлечение общества, позволит реализовать весь потенциал энергосбережения и создать устойчивое энергоэффективное будущее.

Литература

1. <https://gosstandart.gov.by/sustainable-energy> от 03.02.2025.

**Прищепов М.А., д.т.н., профессор,
Протосовицкий И.В., к.т.н., доцент,
Зеленькевич А.И., к.т.н., доцент, Збродыга В.М., к.т.н., доцент**
*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СХЕМАМИ СОЕДИНЕНИЙ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ И НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Рост установленной мощности потребителей в сельских электрических сетях сопровождается увеличением несимметричных и искажающих нагрузок, что вызывает ухудшение показателей качества электрической энергии [1, 2]. В условиях ограниченных финансовых и эксплуатационных ресурсов возрастает потребность в применении технических решений, обеспечивающих улучшение

качества напряжения при минимальном усложнении электротехнического оборудования. К числу таких решений относятся силовые трансформаторы со специализированными схемами соединения обмоток, способные снижать уровень несимметрии и содержание высших гармонических составляющих напряжения.

На трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ для повышения симметрии и синусоидальности вторичного напряжения широко применяются трансформаторы со схемой соединения «звезда – зигзаг с нулевым проводом» (группа 11). Однако их параллельная работа с трансформаторами типов ТМГ и ТМГСУ, имеющими схему «звезда – звезда с нулевым проводом» (группа 0), затруднена вследствие различия угловых сдвигов фаз [3].

Перспективным решением является использование силовых трансформаторов со схемой соединения «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» (Y/2Zn), относящейся к нулевой группе соединений [4]. Данная схема обеспечивает повышенную устойчивость к несимметрии нагрузок и допускает параллельную работу с серийными трансформаторами без ухудшения качества напряжения.

Трансформатор типа Y/2Zn выполнен на плоском несимметричном трёхстержневом магнитопроводе с цилиндрическими обмотками. Обмотка высокого напряжения соединена по схеме «звезда». Обмотка низкого напряжения состоит из трёх последовательно соединённых частей, размещённых на различных стержнях магнитопровода. Соотношение числа витков 0,5/0,25/0,25 обеспечивает формирование вторичного напряжения как векторной суммы электродвижущих сил указанных участков обмотки.

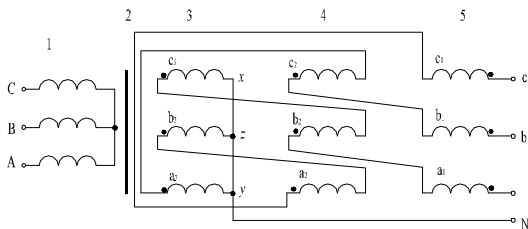


Рис. 1. Схема соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» силового трансформатора

Анализ режимов холостого хода показывает, что ЭДС вторичной обмотки совпадают по фазе с ЭДС обмотки ВН, что подтвер-

ждает принадлежность схемы к нулевой группе [7]. Насыщение стали определяет наличие высших гармоник в намагничивающем токе, однако гармоники, кратные трём, в первичной цепи отсутствуют из-за отсутствия пути протекания [5, 6].

При несимметричной нагрузке в фазных напряжениях возникают составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. В первичной цепи, выполненной по схеме «звезда» без нулевого проводника, токи нулевой последовательности отсутствуют, тогда как токи прямой и обратной последовательностей формируют уравновешенную систему.

Во вторичной обмотке токи нулевой последовательности распределяются по половинам и четвертям фазных обмоток и замыкаются через нулевой провод. При этом создаваемые ими магнитодвижущие силы взаимно компенсируются в каждом стержне магнитопровода, что предотвращает возникновение магнитных потоков нулевой последовательности и, следовательно, исключает генерацию трансформатором напряжений нулевой последовательности в питающую сеть.

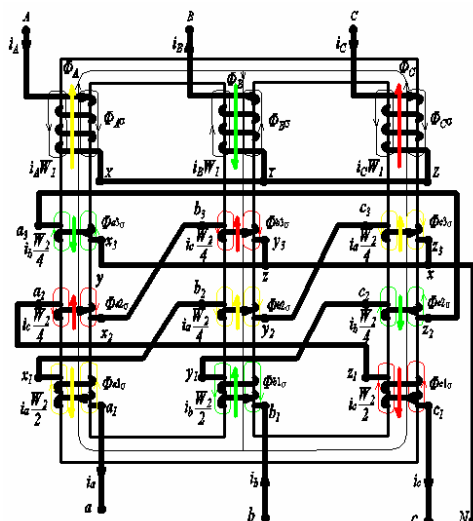


Рис. 2. Схема распределения МДС и магнитных потоков трехфазного трансформатора «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» при симметричной нагрузке

При питании нелинейной трёхфазной нагрузки токи содержат высшие гармонические составляющие. Гармоники прямой и обратной последовательностей преобразуются между сторонами высокого и низкого напряжения аналогично основным гармоническим компонентам. Гармоники нулевой последовательности не передаются в сеть вследствие компенсации соответствующих магнитодвижущих сил в магнитопроводе. Указанное свойство подтверждает устойчивость схемы Y/Zn к воздействию искажающих нагрузок [9].

Для верификации теоретических положений проведены экспериментальные исследования трансформаторов со схемами Y/Y_n , Y/Y_n-CY и Y/Z_n [10, 11]. Нагрузка создавалась путём изменения тока фазы c в диапазоне от 0 до $1,2 I_n$ при отсутствии нагрузки в фазах a и b . Измерения параметров выполнялись анализатором качества электроэнергии Fluke 425.

Полученные зависимости коэффициентов несимметрии напряжений (рис. 3) выявили минимальные значения для схемы Y/Z_n : 1,7% для обратной последовательности и 2,9% для нулевой последовательности при $I = I_n$.

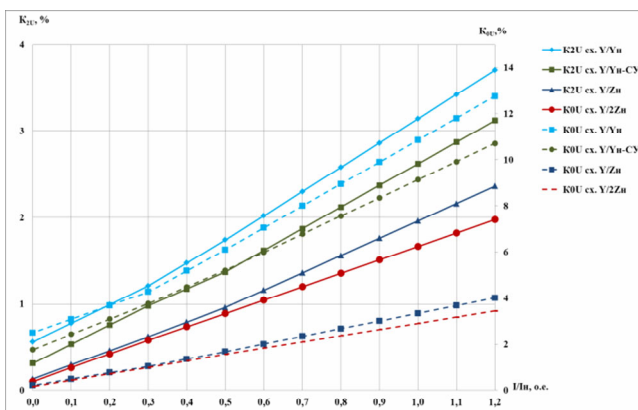


Рис. 3. Зависимости значений коэффициентов несимметрии напряжений по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательности от величины тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима $I_a = 0, I_b = 0, I_c = 0 \dots 1,2 I_n$

При исследовании работы трансформаторов с нелинейной нагрузкой (через полупериодный выпрямитель) установлено, что

схема $Y/2Zn$ обеспечивает наименьший суммарный коэффициент гармоник K_U при номинальной нагрузке: 3,06 % против 3,89 % (Y/Y_n) и 4,66 % (Y/Z_n) (рис. 4).

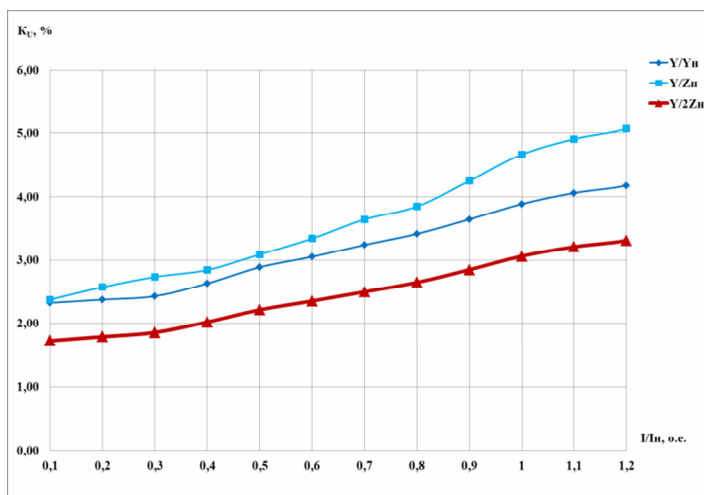


Рис. 4. Зависимости значений суммарного коэффициента гармонических составляющих K_U вторичных напряжений при работе трансформатора на нелинейную нагрузку

Спектральный анализ подтвердил увеличение амплитуд высших гармоник при возрастании нагрузки. Наиболее существенными являлись пятая и седьмая гармонические составляющие, величины которых не превышали установленных нормативами предельных значений.

Заключение

Силовой трансформатор со схемой соединения «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» относится к нулевой группе соединений, что обеспечивает его совместную параллельную работу с трансформаторами типа Y/Y_n и расширяет возможности повышения качества электрической энергии в сельских распределительных сетях.

Магнитодвижущие силы нулевой последовательности в обмотках низшего напряжения полностью компенсируются, что устраняет их влияние на магнитный поток и предотвращает возникновение напряжений нулевой последовательности в сети.

Несимметрия напряжений определяется исключительно составляющими прямой и обратной последовательностей, трансформирующимися между обмотками высшего и низшего напряжений.

Уровень высших гармоник уменьшается вследствие компенсации гармоник нулевой последовательности; остаточные значения обусловлены падениями напряжения на активных сопротивлениях обмоток.

Экспериментальные исследования показали, что схема соединения $Y/2Zn$ формирует минимальные значения коэффициентов несимметрии и гармонических составляющих по сравнению с традиционными схемами Y/Yn и Y/Zn .

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения трансформаторов со схемой $Y/2Zn$ в сельских электрических сетях, подверженных действию несимметричных и нелинейных нагрузок.

Список использованных источников

1. Об утверждении комплексного плана развития электроэнергетической сферы до 2025 года с учетом ввода Белорусской атомной электростанции и межотраслевого комплекса мер по увеличению потребления электроэнергии до 2025 года [Электронный ресурс]: Постановление Совета Министров Республики Беларусь, 1 марта 2016 г., № 169: в ред. Постановления Совета Министров Республики Беларусь от 07. 04. 2021, № 205 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2021.

2. О некоторых мерах по повышению надежности белорусской энергосистемы [Электронный ресурс]: Декрет Президента Респ. Беларусь, 22.12.2018 г., № 493 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2018.

3. Минский электротехнический завод имени В.И. Козлова. Каталог. Трансформаторы силовые масляные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metz.by/files/2021/03/Silovye-maslyanye-transformatory.pdf> – Дата доступа: 20.04.2021.

4. Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: пат. № 16008 Респ. Беларусь / А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет». – № а 20100121; заявл. 2010.02.01; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 180–181.

5. Петров, Г.Н. Электрические машины. Ч.1 / Г.Н. Петров. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

6. Васютинский, С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С.Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.

7. Прищепов, М.А. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленькевич // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 16–25.

8. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленькевич // Агропанорама. – 2018. – № 6. – С. 25–31.

9. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» при нелинейном характере нагрузки / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленькевич // Агропанорама. – 2018. – № 1. – С. 9–19.

10. Прищепов, М.А. Экспериментальные исследования работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М.А. Прищепов, А.И. Зеленькевич, В.М. Збродыга // Агропанорама. – 2019. – № 5. – С. 38–41.

11. Зеленькевич, А.И. Снижение несинусоидальности и несимметрии напряжений в сельских электрических сетях применением трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02/ А.И. Зеленькевич. – Минск, 2022. – 25 с.

УДК 631.171:65.011.56

**Сеньков¹ А.Г., к.т.н., доцент, Гируцкий² И.И., д.т.н., доцент,
Матвейчук² Н.М., к.ф.-м.н., доцент**

¹*ГП «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси»,
г. Минск*

²*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск*

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

С развитием технологий искусственного интеллекта (ИИ) решения на их основе внедряются в различные сферы нашей жизни, в том числе, в сельское хозяйство. На сегодняшний день не сущест-