



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01R 21/133 (2024.01)

(21)(22) Заявка: 2024112518, 07.05.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
07.05.2024Дата регистрации:
05.09.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 07.05.2024

(45) Опубликовано: 05.09.2024 Бюл. № 25

Адрес для переписки:

344113, г.Ростов-на-Дону, пр. Королева, 17, кв.
133, Лобова Екатерина Викторовна

(72) Автор(ы):

Костинский Сергей Сергеевич (RU),
Троицкий Анатолий Иванович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Костинский Сергей Сергеевич (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2638904 C1, 18.12.2017. RU
2777017 C1, 01.08.2022. RU 2815674 C1,
19.03.2024. RO 134712 A0, 29.01.2021. CN
104237673 A, 24.12.2014.

(54) Способ определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, эксплуатируемых в городских и промышленных системах электроснабжения

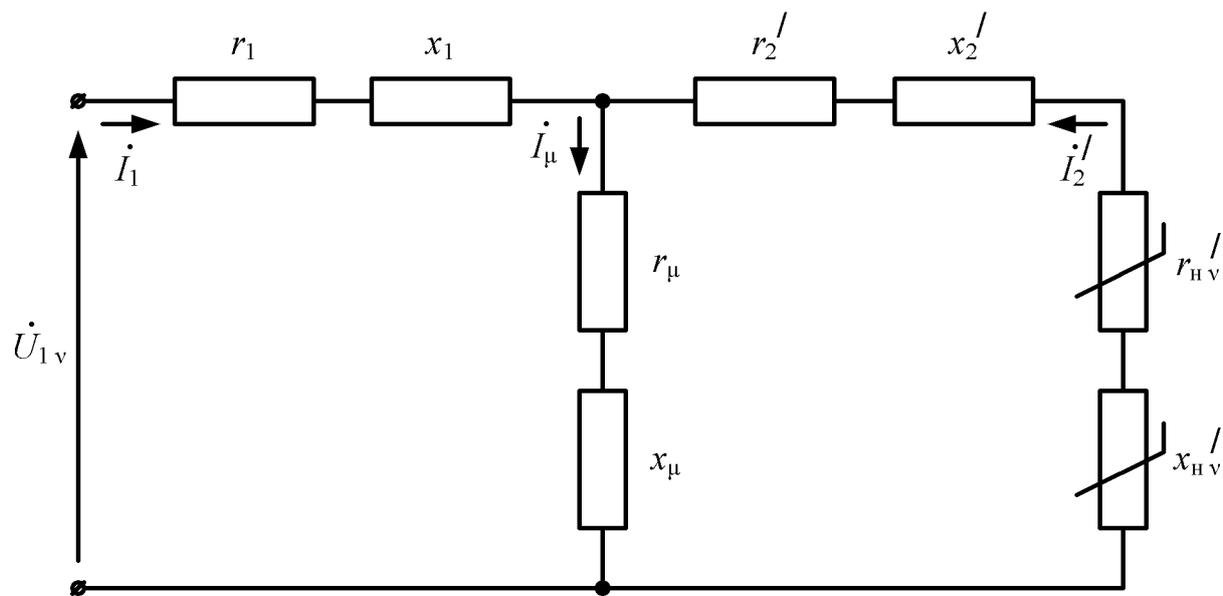
(57) Реферат:

Изобретение относится к системам электроснабжения, в частности к способу определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах. Технический результат: повышение точности. Сущность: на основании паспортных данных трансформатора выполняют расчет номинального тока в обмотке высшего напряжения (ВН), вычисляют активное, полное и индуктивное сопротивления обмоток силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки ВН и приведенные активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки низшего напряжения (НН), номинальный ток холостого хода (ХХ). Используя значение номинального тока ХХ, рассчитывают совокупные активное, полное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки ВН трансформатора. Далее, зная величины активного и индуктивного сопротивлений ветви рассеяния

обмотки ВН, находят активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания. Используя измеряемые с помощью измерительных приборов, установленных во вводной ячейке, питающей шины НН трансформаторной подстанции (ТП), к которой подключен конечный потребитель электрической энергии (нагрузка), для каждой из трех фаз и для каждой гармонической составляющей, начиная от 1-й до 40-й, значения активной мощности, потребляемой нагрузкой, подключенной к трансформатору, силы тока в обмотке НН трансформатора и нагрузке и напряжения на зажимах обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузке, вычисляют активное, полное и реактивное (индуктивное) сопротивления от 1-й до 40-й гармонических составляющих нагрузки для каждой фазы, подключенной к выводам обмотки НН трансформатора. Зная коэффициент трансформации, находят приведенные активное, реактивное и комплексное полное сопротивления для каждой гармонической составляющей

нагрузки каждой фазы, подключенной к выводам обмотки НН трансформатора. Зная вычисленные ранее параметры Т-образной схемы замещения фаз трансформатора, для каждой гармонической составляющей каждой фазы рассчитывают условно-постоянные коэффициенты $A_{1v}, A_{2v}, A_{3v}, B_{1v}, B_{2v}, B_{3v}, C_{1v}, C_{2v}, C_{3v}, D_{1v}, D_{2v}, D_{3v}$. Используя их значения, а также величины приведенного активного, полного и реактивного сопротивлений для каждой гармонической составляющей нагрузки каждой фазы, вычисляют комплексные значения потерь полной мощности

в фазах трансформатора для каждой гармонической составляющей. Суммируя их, находят комплексное значение суммарных потерь полной мощности в каждой фазе трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих. Сложив комплексные значения суммарных потерь полной мощности, рассчитанные для каждой фазы, рассчитывают комплексное значение технических потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих. 9 ил.



Фиг. 1

RU 2826221 C1

RU 2826221 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01R 21/133 (2024.01)

(21)(22) Application: **2024112518, 07.05.2024**

(24) Effective date for property rights:
07.05.2024

Registration date:
05.09.2024

Priority:

(22) Date of filing: **07.05.2024**

(45) Date of publication: **05.09.2024** Bull. № 25

Mail address:

**344113, g.Rostov-na-Donu, pr. Koroleva, 17, kv.
133, Lobova Ekaterina Viktorovna**

(72) Inventor(s):

**Kostinskii Sergei Sergeevich (RU),
Troitskii Anatolii Ivanovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

Kostinskii Sergei Sergeevich (RU)

(54) **METHOD OF DETERMINING COMPLEX VALUE OF TECHNICAL LOSSES OF FULL POWER IN POWER THREE-PHASE TWO-WINDING TRANSFORMERS USED IN URBAN AND INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS**

(57) Abstract:

FIELD: power supply systems.

SUBSTANCE: invention relates to power supply systems, in particular to a method of determining a complex value of technical losses of full power in power three-phase two-winding transformers. Based on the transformer nameplate data, the rated current in the high voltage (HV) winding is calculated, active, total and inductive resistance of windings of power three-phase double-winding transformer, active and inductive resistance of HV winding and reduced active and inductive resistance of dissipation of winding of low voltage (LV), rated current of idle run (IR) are calculated. Using the value of rated current of IR, the total active, total and inductive resistance of the magnetization branch and the scattering branch of the HV winding of the transformer are calculated. Further, knowing the values of active and inductive resistances of the dispersion branch of the HV winding, the active and inductive resistances of the magnetization branch are found. Using the measuring instruments installed in the input cell, the LV supply bus of the transformer substation (TS), to which the final consumer of

electrical energy (load) is connected, for each of three phases and for each harmonic component, starting from 1st to 40th, values of active power consumed by the load connected to the transformer, current strength in the LV winding of the transformer and the load and voltage at the terminals of the LV winding of the power three-phase two-winding transformer and the load, active, total and reactive (inductive) resistances from 1st to 40th harmonic components of the load are calculated for each phase connected to the terminals of the low-voltage transformer winding. Given the transformation ratio, the reduced active, reactive and complex impedances are found for each harmonic component of the load of each phase connected to the terminals of the low-voltage transformer. Knowing the previously calculated parameters of the T-shaped equivalent circuit of the transformer phases, for each harmonic component of each phase conditionally constant coefficients are calculated $A_{1\ v}, A_{2\ v}, A_{3\ v}, B_{1\ v}, B_{2\ v}, B_{3\ v}, C_{1\ v}, C_{2\ v}, C_{3\ v}, D_{1\ v}, D_{2\ v}, D_{3\ v}$. Using their values, as well as the values of the reduced active,

RU 2 826 221 C1

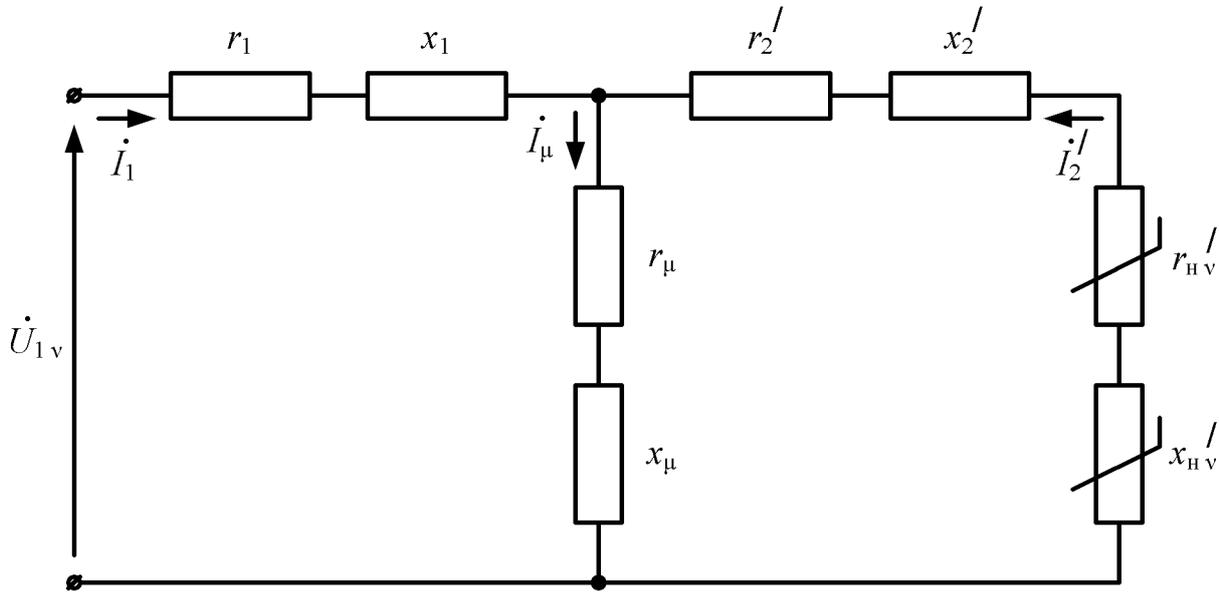
RU 2 826 221 C1

total and reactive resistances for each harmonic component of the load of each phase, complex values of total power losses in transformer phases are calculated for each vharmonic component. By summing them, the complex value of total losses of full power in each phase of the transformer is found taking into account additional losses from higher harmonic components. By adding complex values of total losses

of full power, calculated for each phase, complex value of technical losses of full power in power three-phase two-winding transformer is calculated taking into account additional losses from higher harmonic components.

EFFECT: higher accuracy.

1 cl, 9 dwg



Фиг. 1

RU 2826221 C1

RU 2826221 C1

Изобретение относится к системам электроснабжения, а именно к городским и промышленным системам электроснабжения, в частности к способу определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, используемых для транспортировки электрической энергии конечному потребителю.

Изобретение позволяет определить комплексное значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, используемых для транспортировки электрической энергии конечному потребителю, для оценки эффективности их работы.

Изобретение может быть использовано для достоверного и оперативного выявления силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторов с повышенным уровнем комплексного значения технических потерь полной мощности, что позволяет оперативно принимать технические и организационные меры по устранению причин возникновения потерь. Изобретение может быть применено при построении автоматизированных информационно-измерительных систем технического учета электроэнергии в качестве их дополнительной функции.

Потребление электроэнергии связано с использованием широкого спектра различных бытовых и промышленных электроприемников, которые для своей работы используют напряжение постоянного тока, получаемое путем выпрямления напряжения переменного тока и его сглаживания при помощи емкостного фильтра [Чернышева Д.В. Влияние несинусоидальности напряжения и тока на элементы системы электроснабжения // Известия Юго-Западного государственного университета. Техника и технологии. 2012. № 2-1. С. 100-105]. Для системы электроснабжения указанная аппаратура представляет собой нелинейную электрическую нагрузку и потребляет ток несинусоидальной формы. Это создает искажения в питающей сети и искажение напряжения, которое воздействует на иное оборудование, получающее электроэнергию от общего источника [Прищепка Д.Н., Загруддинов Ю.А. Негативное воздействие нелинейной нагрузки на систему электроснабжения // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2014. № 644. С. 199-203]. В последние годы отмечается значительное ухудшение качества электрической энергии в сетях промышленных и непромышленных потребителей [Боярская Н.П., Темербаев С.А., Довгун В.П., Кабак А.Л., Колмаков В.О. Анализ спектрального состава токов и напряжений светодиодных и газоразрядных источников света // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2013. № 8. С. 180-184]. Ухудшение качества электроэнергии в распределительных сетях характерно для большинства развитых стран, т.к. остается все меньше электроприемников с линейными вольт-амперными характеристиками [Лещинская Т.Б., Таранов М.М. Исследование токов эмиссии бытовых электроприемников // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2009. № 2. С. 54-61.].

Электроснабжение невозможно осуществить без применения трансформаторов, с помощью которых электроэнергия экономно передается на расстояние и рационально распределяется между потребителями. Трансформаторы, будучи неотъемлемой частью энергосистемы, имеются на всех ступенях напряжения и играют роль согласующего элемента между сетью и потребителем. Высшие гармонические составляющие тока создают дополнительные потери в обмотках трансформаторов и дополнительные потери на вихревые токи в магнитопроводе. Все это приводит к снижению эффективности процессов передачи электроэнергии и сокращению расчетного срока

службы электрооборудования и электрических сетей из-за ускоренного теплового и электрического старения изоляции [Гужов С., Полищук А., Туркин А. Сети уличного освещения с полупроводниковыми управляющими устройствами и источниками света: управление и расчет режимов // Полупроводниковая светотехника. 2009. № 1. С. 42-46].

5 Известен способ определения технологических потерь электроэнергии в оборудовании тяговых подстанций, входящих в систему тягового электроснабжения [Патент RU 2573098, МПК В60М 3/00, G01R 21/133, опубл. 20.01.2016], заключающийся в измерениях на тяговой подстанции постоянного тока напряжения и тока на уровне напряжения 3,3 кВ, отличающийся тем, что измерения на вводе преобразователей тяговых подстанций
10 и дополнительно к ним устройствах усиления осуществляются синхронно с измерениями на стороне высокого напряжения переменного тока преобразовательного трансформатора, результаты измерений передаются на сервер обработки данных через корпоративную сеть передачи данных с тяговых подстанций, на основе которых определяются технологические потери электроэнергии на тягу в оборудовании тяговой
15 подстанции за анализируемый период времени как разность между расходом электроэнергии, определяемым по данным автоматизированной системы коммерческого учета, и расходом электроэнергии по данным измерительных систем, установленных на вводах преобразовательных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока, а также устройств усиления системы тягового электроснабжения.

20 Основным недостатком описанного способа является тот факт, что фиксируются и анализируются только показатели расхода электроэнергии, на основании разности которых технологические потери определяются по интервалам измерений, что не позволяет применять указанный способ для произвольного момента времени при различных величинах нагрузки.

25 Указанный способ также содержит в себе недостаток, связанный с высокой погрешностью определения технических потерь, поскольку при оценке потерь в системе электроснабжения на основании разности расхода электроэнергии, отсутствует возможность выделить технические потери, ввиду наличия коммерческих и инструментальных потерь, а также расхода электроэнергии на собственные нужды
30 подстанции.

Известен способ определения комплексного значения совокупных технических потерь полной мощности в городских и промышленных системах электроснабжения [Патент RU 2815674, МПК G01R 21/133, СПК G01R 21/133, опубл. 19.03.2024], принятый в качестве прототипа, заключающийся в том, что выполняют расчет номинального
35 тока в обмотке высшего напряжения, далее вычисляют активное, полное и индуктивное сопротивления обмоток, после чего вычисляют активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки высшего напряжения и приведенные активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки нижнего напряжения, затем определяют величины комплексного полного сопротивления рассеяния обмотки высшего напряжения и
40 приведенного комплексного полного сопротивления рассеяния обмотки нижнего напряжения, после чего выполняют расчет номинального тока холостого хода силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и, используя его значение, рассчитывают совокупные активное, полное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки высшего напряжения, после чего, зная величины активного
45 и индуктивного сопротивлений ветви рассеяния обмотки высшего напряжения, находят активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания и определяют комплексное полное сопротивление ветви намагничивания, на основании погонных параметров линии электропередачи, входящей в состав системы электроснабжения,

находят активное и индуктивное сопротивления, а также комплексное полное сопротивление линии электропередачи, после чего вычисляют совокупное комплексное полное сопротивление линии электропередачи и рассеяния обмотки высшего напряжения, на основании данных синхронно измеряемых с помощью измерительных приборов или заданных произвольно определяют напряжение питающей сети в точке подключения линии электропередачи системы электроснабжения, активную мощность, потребляемую нагрузкой, подключенной к силовому трехфазному двухобмоточному трансформатору, силу тока в обмотке нижнего напряжения и нагрузку и напряжение на зажимах обмотки нижнего напряжения, после чего вычисляют активное, полное и индуктивное сопротивления нагрузки, подключенной к выводам обмотки нижнего напряжения, после чего вычисляют значение коэффициента трансформации силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, и, используя это значение, находят значение приведенного активного и индуктивного сопротивлений нагрузки, а также комплексного полного сопротивления нагрузки, подключенной к выводам обмотки нижнего напряжения, затем вычисляют приведенное комплексное полное сопротивление рассеяния обмотки нижнего напряжения и нагрузки и выполняют расчет комплексного значения совокупных технических потерь полной мощности в одной фазе системы электроснабжения.

Недостатком описанного способа является тот факт, что при его использовании нет возможности выделить из комплексного значения совокупных технических потерь полной мощности в системе электроснабжения величину потерь отдельно в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе.

Указанный способ также содержит в себе недостаток, связанный с погрешностью определения технических потерь полной мощности, поскольку при оценке потерь не учитываются дополнительные потери, связанные с наличием высших гармонических составляющих в системе электроснабжения, обусловленных наличием нелинейной электрической нагрузки, потребляющей ток несинусоидальной формы.

Задача изобретения заключается в рассмотрении в целом совокупности силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузки, связанных общим режимом работы, использовании при расчетах известных паспортных данных силовых трансформаторов и измеряемых на зажимах обмотки низшего напряжения силового трехфазного двухобмоточного трансформатора значениях активной мощности, силы тока и напряжения для каждой гармонической составляющей.

Технический результат заключается в повышении точности определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, эксплуатируемых в городских и промышленных системах электроснабжения.

Технический результат достигается за счет того, что в соответствии со способом определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, эксплуатируемых в городских и промышленных системах электроснабжения на основании паспортных данных силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, входящего в состав системы электроснабжения, выполняют расчет номинального тока в обмотке высшего напряжения (ВН), далее вычисляют активное, полное и индуктивное сопротивления обмоток силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, после чего вычисляют активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки ВН и приведенные активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки низшего напряжения (НН) силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. После чего выполняют

расчет номинального тока холостого хода (XX) силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и, используя его значение, рассчитывают совокупные активное, полное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки ВН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. Далее, зная величины

5 активного и индуктивного сопротивлений ветви рассеяния обмотки ВН, находят активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания. Используя измеренные с помощью измерительных приборов, установленных во вводной ячейке, питающей

10 шины НН трансформаторной подстанции (ТП), к которой подключен конечный потребитель электрической энергии (нагрузка), для каждой из трех фаз и для каждой гармонической составляющей начиная от 1-ой до 40-ой, значения активной мощности,

потребляемой нагрузкой, подключенной к силовому трехфазному двухобмоточному трансформатору, силы тока в обмотке НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузки и напряжения на зажимах обмотки НН силового

15 трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузке, вычисляют активное, полное и реактивное (индуктивное) сопротивления основной гармонической составляющей нагрузки для одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН

силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. Затем вычисляют активные, реактивные и полные сопротивления для остальных гармонических составляющих

20 нагрузки этой фазы от 2-й до 40-й. Зная коэффициент трансформации силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, находят приведенные активное, реактивное и комплексное полное сопротивления для каждой гармонической

составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. Зная вычисленные ранее параметры Т-образной схемы замещения одной фазы силового трехфазного двухобмоточного

25 трансформатора, для каждой гармонической составляющей рассчитывают следующие значения (α_v , β_v , γ_v , δ_v , θ_v , ε_v , τ_v и μ_v), используемые затем для расчета условно-

постоянных коэффициентов (A_{1v} , A_{2v} , A_{3v} , B_{1v} , B_{2v} , B_{3v} , C_{1v} , C_{2v} , C_{3v} , D_{1v} , D_{2v} , D_{3v}) для каждой гармонической составляющей. Используя рассчитанные условно-

30 постоянные коэффициенты для каждой гармонической составляющей, а так же величины приведенного активного, полного и реактивного сопротивлений для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, вычисляют комплексные значения

потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора для каждой гармонической составляющей, и затем, суммируя их,

35 находят комплексное значение суммарных потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих. Для оставшихся двух фаз, используя

в качестве исходных данных измеренные с помощью измерительных приборов, установленных во вводной ячейке, питающей шины НН ТП, значения активной

40 мощности, потребляемой нагрузкой, подключенной к силовому двухобмоточному трансформатору, силы тока в обмотке НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузки и напряжения на зажимах обмотки НН силового

трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузке, для каждой гармонической составляющей начиная от 1-ой до 40-ой, проводят аналогичные описанным ранее для

45 одной фазы расчетные действия, с целью получить комплексные значения суммарных потерь полной мощности в каждой из этих фаз с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих. Сложив комплексные значения суммарных

потерь полной мощности рассчитанные для каждой фазы силового трехфазного

двухобмоточного трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, рассчитывают комплексное значение технических потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих.

5 На Фиг. 1 представлена схема замещения одной фазы системы электроснабжения, представляющей собой совокупность силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и несинусоидальной нагрузки.

На Фиг. 2 представлена Таблица 1, в которой приведены паспортные данные силового трехфазного двухобмоточного трансформатора.

10 На Фиг. 3 представлена Таблица 2, в которой приведены расчетные параметры схемы замещения для фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора.

На Фиг. 4 представлена Таблица 3, в которой приведены данные измеренные для фазы L1 для гармонических составляющих нагрузки от 1-ой до 40-ой с помощью анализатора качества электрической энергии, установленного во вводной ячейке, питающей шины НН трансформаторной подстанции.

На Фиг. 5 представлена Таблица 4, в которой приведены расчетные значения приведенного активного и реактивного сопротивлений для фазы L1 для гармонических составляющих нагрузки от 1-ой до 40-ой, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора.

20 На Фиг. 6 представлена Таблица 5, в которой приведены расчетные значения условно постоянных коэффициентов для каждой гармонической составляющей от 1-ой до 40-ой, рассчитанные для фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора.

На Фиг. 7 представлена Таблица 6, в которой приведены комплексные значения потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора для каждой гармонической составляющей от 1-ой до 40-ой.

На Фиг. 8 представлена Таблица 7, в которой приведены данные измеренные для фазы L2 для гармонических составляющих нагрузки от 1-ой до 40-ой с помощью анализатора качества электрической энергии, установленного во вводной ячейке, питающей шины НН трансформаторной подстанции.

30 На Фиг. 9 представлена Таблица 8, в которой приведены данные измеренные для фазы L3 для гармонических составляющих нагрузки от 1-ой до 40-ой с помощью анализатора качества электрической энергии, установленного во вводной ячейке, питающей шины НН трансформаторной подстанции.

Рассмотрим пример реализации способа.

35 На основании паспортных данных силового трехфазного двухобмоточного трансформатора: потери XX (ΔP_{XX} , кВт), потери короткого замыкания (КЗ) ($\Delta P_{КЗ}$, кВт), номинальная мощность (S_H , кВ·А), напряжение КЗ ($u_{КЗ}$, %), ток XX (I_{XX} , %), номинальное напряжение обмотки ВН ($U_{ВН}$, кВ), номинальное напряжение обмотки НН ($U_{НН}$, кВ), входящего в состав системы электроснабжения, выполняют расчет номинального тока в обмотке ВН:

$$I_{1В} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}}, \text{ А. (1)}$$

45 Далее вычисляют активное сопротивление обмоток силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$r_{\Gamma} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot 10^3}{3 \cdot I_{1\text{н}}^2}, \text{ Ом, (2)}$$

5 полное сопротивление обмоток силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$Z_{\Gamma} = \frac{u_{\text{кз}} \cdot U_{\text{ВН}} \cdot 10^3}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{1\text{н}}}, \text{ Ом, (3)}$$

10 и индуктивное сопротивление обмоток силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$x_{\Gamma} = \sqrt{Z_{\Gamma}^2 - r_{\Gamma}^2}, \text{ Ом. (4)}$$

Для реализации способа применяется Т-образная схема замещения силового трехфазного двухобмоточного трансформатора (Фиг. 1), которая принимается
15 симметричной, полагая комплексное значение полного сопротивления обмотки ВН, равным приведенному комплексному значению полного сопротивления обмотки НН. Это допущение близко к действительности и не вносит ощутимых погрешностей в расчеты [Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины: В 2-х ч. Ч. 1: Учеб. для электротехн. спец. вузов. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1987, стр. 78].

Далее вычисляют активное сопротивление рассеяния обмотки ВН и приведенное активное сопротивление рассеяния обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$25 \quad r_1 = r_2' = \frac{r_{\Gamma}}{2}, \text{ Ом, (5)}$$

индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ВН и приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$30 \quad x_1 = x_2' = \frac{x_{\Gamma}}{2}, \text{ Ом. (6)}$$

После этого выполняют расчет номинального тока XX силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$35 \quad I_{0\text{н}} = \frac{I_{\text{XX}}}{100} \cdot I_{1\text{н}}, \text{ А. (7)}$$

Далее, используя полученное значение номинального тока XX, рассчитывают совокупное активное сопротивление ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки ВН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$40 \quad r_0 = \frac{\Delta P_{\text{XX}} \cdot 10^3}{3 \cdot I_{0\text{н}}^2}, \text{ Ом, (8)}$$

совокупное полное сопротивление ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки ВН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$45 \quad Z_0 = \frac{U_{\text{ВН}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot I_{0\text{н}}}, \text{ Ом, (9)}$$

и совокупное индуктивное сопротивление ветви намагничивания и ветви рассеяния

обмотки ВН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}, \text{ Ом. (10)}$$

Зная величины активного и индуктивного сопротивлений ветви рассеяния обмотки ВН находят активное сопротивление ветви намагничивания силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$r_\mu = r_0 - r_1, \text{ Ом, (11)}$$

и индуктивное сопротивление ветви намагничивания силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$x_\mu = x_0 - x_1, \text{ Ом. (12)}$$

На основании данных (активная мощность, потребляемая нагрузкой, подключенной к силовому трехфазному двухобмоточному трансформатору (P_{Hv} , Вт), сила тока в обмотке НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузке (I_{Hv} , А); напряжение на зажимах обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузке (U_{Hv} , В), где v - порядковый номер гармонической составляющей) измеряемых для каждой из трех фаз и для каждой гармонической составляющей начиная от 1-ой до 40-ой с помощью измерительных приборов (анализаторы качества электрической энергии, измерители параметров электрической сети), установленных во вводной ячейке, питающей шины НН трансформаторной подстанции (ТП), к которой подключен конечный потребитель электрической энергии (нагрузка), вычисляют активное сопротивление основной ($v = 1$) гармонической составляющей нагрузки для одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$r_{H1} = \frac{P_{H1}}{I_{H1}^2}, \text{ Ом, (13)}$$

полное сопротивление основной гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$Z_{H1} = \frac{U_{H1}}{I_{H1}}, \text{ Ом, (14)}$$

и реактивное (индуктивное) сопротивление основной гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$x_{H1} = \sqrt{Z_{H1}^2 - r_{H1}^2}, \text{ Ом. (15)}$$

Вычисления активного, полного и реактивного сопротивлений, аналогичные выполненным ранее для основной гармонической составляющей нагрузки одной фазы, проводят для остальных гармонических составляющих нагрузки этой фазы от 2-й до 40-й, получая значения $r_{H2...40}$, $Z_{H2...40}$ и $x_{H2...40}$.

Зная коэффициент трансформации силового трехфазного двухобмоточного трансформатора равный

$$k_T = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}}, \text{ о.е., (16)}$$

находят приведенное активное сопротивление для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$5 \quad r'_{\text{Hv}} = r_{\text{Hv}} \cdot k_{\text{T}}^2, \text{ Ом, (17)}$$

и приведенное реактивное сопротивление для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$10 \quad x'_{\text{Hv}} = x_{\text{Hv}} \cdot k_{\text{T}}^2, \text{ Ом, (18)}$$

а также приведенное комплексное полное сопротивление для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$15 \quad Z'_{\text{Hv}} = r'_{\text{Hv}} + jx'_{\text{Hv}}. \text{ (19)}$$

Зная вычисленные ранее параметры Т-образной схемы замещения одной фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора (Фиг. 1), для каждой гармонической составляющей рассчитывают следующие значения:

$$20 \quad \alpha_{\text{v}} = 2(r_{\mu}r'_2 + v^2 \cdot x_{\mu}x'_2); \beta_{\text{v}} = (r_{\mu}^2 + v^2 \cdot x_{\mu}^2); \gamma_{\text{v}} = (r'_2)^2 + v^2 \cdot (x'_2)^2;$$

$$\delta_{\text{v}} = (r_1^2 + v^2 \cdot x_1^2); \theta_{\text{v}} = 2 \cdot (r_1r_{\mu} + v^2 \cdot x_1x_{\mu}); \varepsilon_{\text{v}} = v \cdot (x_1 + x'_2);$$

$$\tau_{\text{v}} = 2 \cdot (r_1r'_2 + v^2 \cdot x_1x'_2); \mu_{\text{v}} = r_1 + r'_2.$$

С использованием вычисленных значений (α_{v} , β_{v} , γ_{v} , δ_{v} , θ_{v} , ε_{v} , τ_{v} и μ_{v}) для каждой гармонической составляющей, с целью расчета потерь в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, вычисляют условно постоянные коэффициенты для каждой гармонической составляющей:

$$30 \quad A_{1\text{v}} = \beta_{\text{v}} \cdot \mu_{\text{v}} + \gamma_{\text{v}} \cdot B_{1\text{v}} + \alpha_{\text{v}} \cdot r_1;$$

$$B_{1\text{v}} = (r_1 + r_{\mu}); B_{2\text{v}} = 2(B_{1\text{v}} \cdot r'_2 + r_{\mu} \cdot r_1); B_{3\text{v}} = 2(B_{1\text{v}} \cdot v \cdot x'_2 + v \cdot x_{\mu} \cdot r_1);$$

$$A_{2\text{v}} = \beta_{\text{v}} \cdot \varepsilon_{\text{v}} + \gamma_{\text{v}} \cdot D_{1\text{v}} + \alpha_{\text{v}} \cdot v \cdot x_1;$$

$$35 \quad D_{1\text{v}} = v \cdot (x_1 + x_{\mu}); D_{2\text{v}} = 2(D_{1\text{v}} \cdot r'_2 + v \cdot r_{\mu} \cdot x_1);$$

$$D_{3\text{v}} = 2(D_{1\text{v}} \cdot v \cdot x'_2 + v^2 \cdot x_{\mu} \cdot x_1);$$

$$40 \quad A_{3\text{v}} = \beta_{\text{v}}(\delta_{\text{v}} + \gamma_{\text{v}} + \tau_{\text{v}}) + \gamma_{\text{v}}(\delta_{\text{v}} + \theta_{\text{v}}) + \delta_{\text{v}} \cdot \alpha_{\text{v}};$$

$$C_{1\text{v}} = \beta_{\text{v}} + \delta_{\text{v}} + \theta_{\text{v}}; C_{2\text{v}} = 2 \cdot [\delta_{\text{v}}(r_{\mu} + r'_2) + \beta_{\text{v}} \cdot \mu_{\text{v}} + \theta_{\text{v}} \cdot r'_2];$$

$$C_{3\text{v}} = 2 \cdot [\delta_{\text{v}} \cdot v \cdot (x_{\mu} + x'_2) + \beta_{\text{v}} \cdot \varepsilon_{\text{v}} + \theta_{\text{v}} \cdot v \cdot x'_2].$$

Используя рассчитанные условно-постоянные коэффициенты для каждой гармонической составляющей, а так же величины приведенных активного, полного и реактивного сопротивлений для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, вычисляют комплексные значения потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора для каждой гармонической

составляющей:

$$\Delta S_{\tau v}^{\&} = (U_{Hv} \cdot k_{\tau})^2 \cdot \left[\frac{A_{1v} + B_{1v} (Z'_{Hv})^2 + B_{2v} r'_{Hv} + B_{3v} x'_{Hv} + j(A_{2v} + D_{1v} (Z'_{Hv})^2 + D_{2v} r'_{Hv} + D_{3v} x'_{Hv})}{A_{3v} + C_{1v} (Z'_{Hv})^2 + C_{2v} r'_{Hv} + C_{3v} x'_{Hv}} \right]. \quad (20)$$

Суммируя комплексные значения потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе, рассчитанные для каждой гармонической составляющей, находят комплексное значение суммарных потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих

$$\Delta S_{\tau \Sigma L1}^{\&} = \sum_{v=1}^{40} \Delta S_{\tau v}^{\&}. \quad (21)$$

Для оставшихся двух фаз ($L2$ и $L3$), используя в качестве исходных данных измеренные активную мощность, потребляемую нагрузкой, подключенной к силовому двухобмоточному трансформатору, силу тока в обмотке НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузку и напряжение на зажимах обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузке, для каждой гармонической составляющей начиная от 1-ой до 40-ой, проводят аналогичные описанным ранее для фазы $L1$ расчетные действия, с целью получить значения $\Delta S_{\tau \Sigma L2}^{\&}$

и $\Delta S_{\tau \Sigma L3}^{\&}$.

Сложив комплексные значения суммарных потерь полной мощности рассчитанные для каждой фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, рассчитывают комплексное значение технических потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих:

$$\Delta S_{\tau \Sigma}^{\&} = \Delta S_{\tau \Sigma L1}^{\&} + \Delta S_{\tau \Sigma L2}^{\&} + \Delta S_{\tau \Sigma L3}^{\&}$$

Параметры (P_{Hv} , I_{Hv} , U_{Hv}), измеряемые с помощью измерительных приборов для каждой фазы, могут быть заданы произвольно, что позволит рассчитать потери полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе, с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, для произвольного момента времени при различных величинах нагрузки.

Рассмотрим пример реализации способа определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, эксплуатируемых в городских и промышленных системах электроснабжения, на примере системы электроснабжения, для которой приняты:

- силовой трехфазный двухобмоточный трансформатор марки ТМЗ номинальной мощностью 1000 кВА, с номинальными напряжениями обмоток ВН - 10 кВ и НН - 0,4 кВ;

- несинусоидальная нагрузка.

Однолинейная принципиальная электрическая схема рассматриваемой системы электроснабжения приведена на (фиг. 1), а номинальные параметры силового

трехфазного двухобмоточного трансформатора, используемого для транспортировки электрической энергии конечному потребителю, эксплуатируемого в рассматриваемой системе электроснабжения, приведены в табл. 1

Используя номинальные параметры силового трехфазного двухобмоточного трансформатора приведенные в табл. 1 в соответствии с выражением (1) рассчитывается значение номинального тока в обмотке ВН. Используя формулы (2-4) вычисляют активное, полное и индуктивное сопротивления обмоток силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. По формулам (5) и (6) вычисляют активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки ВН и приведенные активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. Используя выражение (7) выполняют расчет номинального тока ХХ силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. Используя формулы (8 - 10) рассчитывают совокупные активное, полное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки ВН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. По формулам (11) и (12), зная величины активного и индуктивного сопротивлений ветви рассеяния обмотки ВН, вычисляют активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания силового трехфазного двухобмоточного трансформатора.

Расчетные параметры схемы замещения для одной фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, представленной на Фиг. 1 приведены в табл. 2.

Измеренные данные, полученные с помощью анализатора качества электрической энергии, установленного во вводной ячейке, питающей шины НН трансформаторной подстанции, для фазы L1 для гармонических составляющих нагрузки от 1-ой до 40-ой приведены в табл. 3.

Используя измеренные данные, приведенные в табл. 3, в соответствии с выражениями (13-15) рассчитываются активное, полное и реактивное сопротивления основной гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. Аналогично, используя выражения (13-15) и результаты измерений для остальных гармонических составляющих, приведенные в табл. 3, выполняют расчет активных, полных и реактивных сопротивлений гармонических составляющих нагрузки от 2-й до 40-й одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора.

Используя значения номинальных напряжений обмоток ВН и НН, приведенные в табл. 1, вычисляют значение коэффициента трансформации силового трехфазного двухобмоточного трансформатора по формуле (16), которое составит 25. Используя значение коэффициента трансформации и выражения (17) - (19) рассчитывают приведенные активное, реактивное и полное сопротивления для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора.

Расчетные значения приведенного активного и реактивного сопротивлений для фазы L1 для гармонических составляющих нагрузки от 1-ой до 40-ой, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора приведены в табл. 4.

Зная вычисленные ранее параметры схемы замещения одной фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, представленные в табл. 2, для каждой гармонической составляющей рассчитывают значения $(\alpha_v, \beta_v, \gamma_v, \delta_v, \theta_v, \varepsilon_v, \tau_v \text{ и } \mu_v)$, и, используя эти значения, вычисляют условно постоянные коэффициенты для каждой

гармонической составляющей ($A_{1v}, A_{2v}, A_{3v}, B_{1v}, B_{2v}, B_{3v}, C_{1v}, C_{2v}, C_{3v}, D_{1v}, D_{2v}, D_{3v}$). Расчетные значения условно постоянных коэффициентов для каждой гармонической составляющей от 1-ой до 40-ой, рассчитанные для фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, приведены в табл. 5.

Используя рассчитанные условно-постоянные коэффициенты для каждой гармонической составляющей, приведенные в табл. 5, а так же величины приведенных активного, полного и реактивного сопротивлений для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, приведенные в табл. 4, в соответствии с формулой (20) вычисляют комплексные значения потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора для каждой гармонической составляющей. Комплексные значения потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора для каждой гармонической составляющей от 1-ой до 40-ой приведены в табл. 6.

Суммируя комплексные значения потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе, рассчитанные для каждой гармонической составляющей от 1-ой до 40-ой, приведенные в табл. 6, в соответствии с формулой (21) находят комплексное значение суммарных потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих которые составят:

$$\Delta S_{\tau \Sigma L1}^* = 850,7063 + 4202,663i \text{ В}\cdot\text{А.}$$

Для оставшихся двух фаз ($L2$ и $L3$), используя в качестве исходных данных измеренные активную мощность, потребляемую нагрузкой, подключенной к силовому двухобмоточному трансформатору, силу тока в обмотке НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузку и напряжение на зажимах обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузку, для каждой гармонической составляющей начиная от 1-ой до 40-ой, приведенные в табл. 7 и табл. 8, проводят аналогичные описанным ранее для фазы $L1$ расчетные действия. По итогам выполненных расчетов

$$\Delta S_{\tau \Sigma L2}^* = 899,532 + 4457,926i \text{ В}\cdot\text{А.}$$

$$\Delta S_{\tau \Sigma L3}^* = 869,2211 + 4310,247i \text{ В}\cdot\text{А.}$$

Сложив комплексные значения суммарных потерь полной мощности рассчитанные для каждой фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, рассчитывают комплексное значение технических потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих:

$$\begin{aligned} \Delta S_{\tau \Sigma}^* &= (850,7063 + 4202,663i) + (899,532 + 4457,926i) + (869,2211 + 4310,247i) = \\ &= 2619,459 + 12970,84i \text{ В}\cdot\text{А.} \end{aligned}$$

Приведенное описание реализации подтверждает достижение технического результата - возможность применять указанный способ в частности для произвольного момента времени при различных величинах нагрузки и выделить технические потери в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе, а так же повысить точность определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, эксплуатируемых в городских и промышленных

системах электроснабжения, за счет учета дополнительных потерь, связанных с наличием высших гармонических составляющих в системе электроснабжения, обусловленных наличием нелинейной электрической нагрузки, потребляющей ток несинусоидальной формы.

5

(57) Формула изобретения

Способ определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, эксплуатируемых в городских и промышленных системах электроснабжения, заключающийся в том, что на основании паспортных данных силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, входящего в состав системы электроснабжения, выполняют расчет номинального тока в обмотке высшего напряжения, далее вычисляют активное, полное и индуктивное сопротивление обмоток, после чего вычисляют активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки высшего напряжения и приведенные активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки низшего напряжения, после чего выполняют расчет номинального тока холостого хода и, используя его значение, рассчитывают совокупные активное, полное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки высшего напряжения, далее, зная величины активного и индуктивного сопротивлений ветви рассеяния обмотки высшего напряжения, находят активное и индуктивное сопротивление ветви намагничивания, после чего, используя измеряемые с помощью измерительных приборов, установленных во вводной ячейке, питающей шины низшего напряжения трансформаторной подстанции, к которой подключен конечный потребитель электрической энергии - нагрузка, для каждой из трех фаз и для каждой гармонической составляющей, начиная от 1-й до 40-й, значения активной мощности, потребляемой нагрузкой, подключенной к силовому трехфазному двухобмоточному трансформатору, силы тока в обмотке низшего напряжения и нагрузке и напряжения на зажимах обмотки низшего напряжения и нагрузке, вычисляют активное, полное и реактивное индуктивное сопротивление основной гармонической составляющей нагрузки для одной фазы, подключенной к выводам обмотки низшего напряжения, затем вычисляют активные, реактивные и полные сопротивления для остальных гармонических составляющих нагрузки этой фазы от 2-й до 40-й, зная коэффициент трансформации силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, находят приведенные активное, реактивное и комплексное полное сопротивления для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки низшего напряжения, и, зная вычисленные ранее параметры T-образной схемы замещения одной фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, для каждой гармонической составляющей рассчитывают значения: α_v , β_v , γ_v , δ_v , θ_v , ε_v , τ_v и μ_v , используемые затем для расчета условно-постоянных коэффициентов A_{1v} , A_{2v} , A_{3v} , B_{1v} , B_{2v} , B_{3v} , C_{1v} , C_{2v} , C_{3v} , D_{1v} , D_{2v} , D_{3v} для каждой гармонической составляющей, используя их значения, а также величины приведенного активного, полного и реактивного сопротивлений для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, вычисляют комплексные значения потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора для каждой гармонической составляющей, и затем, суммируя их, находят комплексное значение суммарных потерь полной мощности в одной фазе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, затем для оставшихся двух фаз, используя измеряемые с помощью измерительных приборов, установленных во вводной ячейке, питающей шины низшего напряжения трансформаторной подстанции, значения активной

мощности, потребляемой нагрузкой, подключенной к силовому двухобмоточному трансформатору, силы тока в обмотке низшего напряжения и нагрузке и напряжения на зажимах обмотки низшего напряжения и нагрузке, для каждой гармонической составляющей начиная от 1-й до 40-й, проводят аналогичные описанным ранее для одной фазы расчеты для получения комплексных значений суммарных потерь полной мощности в каждой из этих фаз с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, после чего, сложив комплексные значения суммарных потерь полной мощности, рассчитанные для каждой фазы с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, рассчитывают комплексное значение технических потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих.

15

20

25

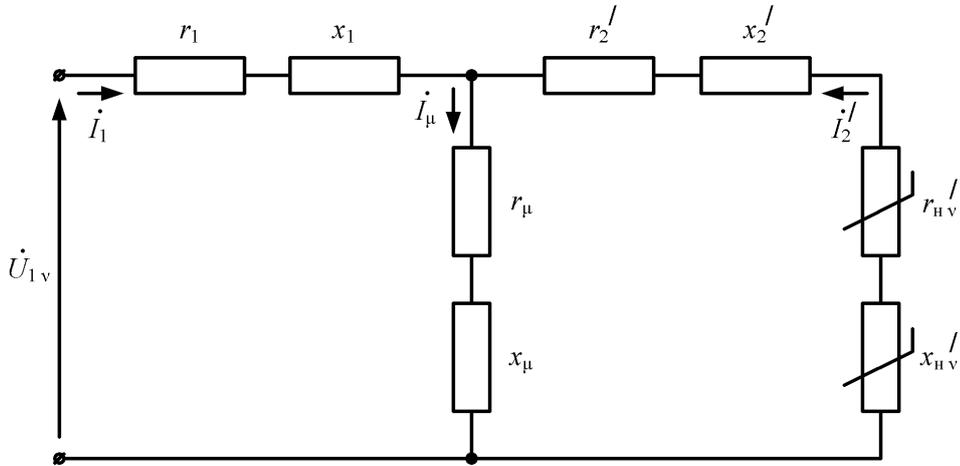
30

35

40

45

1



Фиг. 1

Таблица 1

Номинальная мощность (S_n)	1000 кВ·А
Потери короткого замыкания ($\Delta P_{кз}$)	10,8 кВт
Потери холостого хода ($\Delta P_{хх}$)	1,6 кВт
Ток холостого хода ($I_{хх}$)	0,75 %
Напряжение короткого замыкания ($u_{кз}$)	5,83 %
Номинальное напряжение обмотки ВН ($U_{ВН}$)	10 кВ
Номинальное напряжение обмотки НН ($U_{НН}$)	400 В

Фиг. 2

Таблица 2

Наименование	Величина
Активное сопротивление рассеяния обмотки ВН (r_1)	0,54 Ом
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ВН (x_1)	2,86 Ом
Активное сопротивление ветви намагничивания (r_μ)	2,84 кОм
Индуктивное сопротивление ветви намагничивания (x_μ)	13,02 кОм
Приведенное активное сопротивление рассеяния обмотки НН (r_2')	0,54 Ом
Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки НН (x_2')	2,86 Ом

Фиг. 3

2

Таблица 3

v	Измеренные значения			v	Измеренные значения		
	$P_{н.в.}$ Вт	$I_{н.в.}$ А	$U_{н.в.}$ В		$P_{н.в.}$ Вт	$I_{н.в.}$ А	$U_{н.в.}$ В
1	86076	438,000	229,290	21	0	0,088	0,092
2	0	1,445	0,023	22	0	0,350	0,092
3	9	14,936	0,825	23	6	6,176	1,376
4	0	1,007	0,023	24	0	0	0
5	6	49,275	2,362	25	6	4,730	1,215
6	0	0,482	0,023	26	0	0,745	0,183
7	3	29,609	2,132	27	0	0,657	0,183
8	0	1,358	0,115	28	0	0,394	0,115
9	0	3,241	0,504	29	6	4,687	1,146
10	0	0,745	0,092	30	0	0	0,023
11	6	15,023	1,605	31	3	3,679	0,963
12	0	0,088	0,023	32	0	0,569	0,183
13	15	11,695	2,018	33	0	0,964	0,298
14	0	1,226	0,161	34	0	0,394	0,138
15	0	1,445	0,206	35	3	3,197	0,917
16	0	0,394	0,069	36	0	0	0,023
17	9	9,286	1,376	37	3	2,497	0,803
18	0	0	0,023	38	0	0,438	0,161
19	3	6,132	1,055	39	0	0,701	0,252
20	0	1,007	0,183	40	0	0,307	0,138

Фиг. 4

Таблица 4

v	Расчетные значения		v	Расчетные значения	
	$r_{н.в.}$, Ом	$x_{н.в.}$, Ом		$r_{н.в.}$, Ом	$x_{н.в.}$, Ом
1	280,4232	168,5577	21	0	654,3664
2	0	9,9146	22	0	163,5916
3	25,2154	23,6070	23	98,3207	98,5757
4	0	14,2254	24	0	0
5	1,5445	29,9156	25	167,5852	0
6	0	29,7439	26	0	153,9686
7	2,1387	44,9611	27	0	174,4977
8	0	52,7715	28	0	181,7685
9	0	97,2707	29	170,7322	0
10	0	76,9843	30	0	0
11	16,6148	64,6719	31	138,5143	87,0403
12	0	163,5916	32	0	201,3435
13	68,5489	83,2441	33	0	193,3355
14	0	81,7958	34	0	218,1221
15	0	89,2318	35	183,4034	0
16	0	109,0611	36	0	0
17	65,2383	65,7156	37	300,8177	0
18	0	0	38	0	229,0283
19	49,8651	95,2385	39	0	224,9385
20	0	113,8029	40	0	280,4428

Фиг. 5

Таблица 5

ν	$A_{1\nu_2}$ Ом ²	$A_{2\nu_2}$ Ом ²	$A_{3\nu_2}$ Ом ⁴	$B_{1\nu_2}$ Ом	$B_{2\nu_2}$ Ом ²	$B_{3\nu_2}$ Ом ²	$C_{1\nu_2}$ Ом ²	$C_{2\nu_2}$ Ом ²	$C_{3\nu_2}$ Ом ²	$D_{1\nu_2}$ Ом	$D_{2\nu_2}$ Ом ²	$D_{3\nu_2}$ Ом ²
1	1,92·10 ⁸	1,02·10 ⁹	6,04·10 ⁹	2844,444	6143,417	30361,5	1,78·10 ⁸	3,84·10 ⁸	2,04·10 ⁹	13026,39	30361,5	149242,4
2	7,42·10 ⁸	7,87·10 ⁹	9,10·10 ¹⁰			60722,99	6,87·10 ⁸	1,48·10 ⁹	1,57·10 ¹⁰	26052,79	60722,99	596969,6
3	1,66·10 ⁹	2,64·10 ¹⁰	4,55·10 ¹¹			91084,49	1,54·10 ⁹	3,32·10 ⁹	5,28·10 ¹⁰	39079,18	91084,49	1,34·10 ⁹
4	2,94·10 ⁹	6,24·10 ¹⁰	1,43·10 ¹²			121446	2,72·10 ⁹	5,88·10 ⁹	1,25·10 ¹¹	52105,57	121446	2,39·10 ⁹
5	4,59·10 ⁹	1,22·10 ¹¹	3,49·10 ¹²			151807,5	4,25·10 ⁹	9,18·10 ⁹	2,43·10 ¹¹	65131,96	151807,5	3,73·10 ⁹
6	6,61·10 ⁹	2,10·10 ¹¹	7,23·10 ¹²			182169	6,12·10 ⁹	1,32·10 ¹⁰	4,20·10 ¹¹	78158,36	182169	5,37·10 ⁹
7	8,99·10 ⁹	3,34·10 ¹¹	1,34·10 ¹³			212530,5	8,32·10 ⁹	1,80·10 ¹⁰	6,67·10 ¹¹	91184,75	212530,5	7,31·10 ⁹
8	1,17·10 ¹⁰	4,98·10 ¹¹	2,28·10 ¹³			242892	1,09·10 ¹⁰	2,35·10 ¹⁰	9,96·10 ¹¹	104211,1	242892	9,55·10 ⁹
9	1,49·10 ¹⁰	7,09·10 ¹¹	3,66·10 ¹³			273253,5	1,38·10 ¹⁰	2,97·10 ¹⁰	1,42·10 ¹²	117237,5	273253,5	1,21·10 ¹⁰
10	1,83·10 ¹⁰	9,73·10 ¹¹	5,57·10 ¹³			303615	1,70·10 ¹⁰	3,67·10 ¹⁰	1,95·10 ¹²	130263,9	303615	1,49·10 ¹⁰
11	2,22·10 ¹⁰	1,29·10 ¹²	8,16·10 ¹³			333976,5	2,05·10 ¹⁰	4,44·10 ¹⁰	2,59·10 ¹²	143290,3	333976,5	1,81·10 ¹⁰
12	2,64·10 ¹⁰	1,68·10 ¹²	1,16·10 ¹⁴			364337,9	2,44·10 ¹⁰	5,28·10 ¹⁰	3,36·10 ¹²	156316,7	364337,9	2,15·10 ¹⁰
13	3,10·10 ¹⁰	2,14·10 ¹²	1,59·10 ¹⁴			394699,4	2,87·10 ¹⁰	6,20·10 ¹⁰	4,27·10 ¹²	169343,1	394699,4	2,52·10 ¹⁰
14	3,59·10 ¹⁰	2,67·10 ¹²	2,14·10 ¹⁴			425060,9	3,33·10 ¹⁰	7,18·10 ¹⁰	5,34·10 ¹²	182369,5	425060,9	2,93·10 ¹⁰
15	4,12·10 ¹⁰	3,28·10 ¹²	2,82·10 ¹⁴			455422,4	3,82·10 ¹⁰	8,25·10 ¹⁰	6,56·10 ¹²	195395,9	455422,4	3,36·10 ¹⁰
16	4,69·10 ¹⁰	3,98·10 ¹²	3,65·10 ¹⁴			485783,9	4,34·10 ¹⁰	9,38·10 ¹⁰	7,96·10 ¹²	208422,3	485783,9	3,82·10 ¹⁰
17	5,30·10 ¹⁰	4,78·10 ¹²	4,65·10 ¹⁴			516145,4	4,90·10 ¹⁰	1,06·10 ¹¹	9,55·10 ¹²	221448,7	516145,4	4,31·10 ¹⁰
18	5,94·10 ¹⁰	5,67·10 ¹²	5,85·10 ¹⁴			546506,9	5,50·10 ¹⁰	1,19·10 ¹¹	1,13·10 ¹³	234475,1	546506,9	4,84·10 ¹⁰
19	6,62·10 ¹⁰	6,67·10 ¹²	7,26·10 ¹⁴			576868,4	6,13·10 ¹⁰	1,32·10 ¹¹	1,33·10 ¹³	247501,5	576868,4	5,39·10 ¹⁰
20	7,33·10 ¹⁰	7,78·10 ¹²	8,91·10 ¹⁴			607229,9	6,79·10 ¹⁰	1,47·10 ¹¹	1,56·10 ¹³	260527,9	607229,9	5,97·10 ¹⁰
21	8,08·10 ¹⁰	9,00·10 ¹²	1,08·10 ¹⁵			637591,4	7,48·10 ¹⁰	1,62·10 ¹¹	1,80·10 ¹³	273554,3	637591,4	6,58·10 ¹⁰
22	8,87·10 ¹⁰	1,04·10 ¹³	1,30·10 ¹⁵			667952,9	8,21·10 ¹⁰	1,77·10 ¹¹	2,07·10 ¹³	286580,6	667952,9	7,22·10 ¹⁰
23	9,69·10 ¹⁰	1,18·10 ¹³	1,56·10 ¹⁵			698314,4	8,98·10 ¹⁰	1,94·10 ¹¹	2,37·10 ¹³	299607	698314,4	7,89·10 ¹⁰
24	1,06·10 ¹¹	1,34·10 ¹³	1,85·10 ¹⁵			728675,9	9,77·10 ¹⁰	2,11·10 ¹¹	2,69·10 ¹³	312633,4	728675,9	8,60·10 ¹⁰
25	1,15·10 ¹¹	1,52·10 ¹³	2,18·10 ¹⁵			759037,4	1,06·10 ¹¹	2,29·10 ¹¹	3,04·10 ¹³	325659,8	759037,4	9,33·10 ¹⁰
26	1,24·10 ¹¹	1,71·10 ¹³	2,54·10 ¹⁵			789398,9	1,15·10 ¹¹	2,48·10 ¹¹	3,42·10 ¹³	338686,2	789398,9	1,01·10 ¹¹
27	1,34·10 ¹¹	1,91·10 ¹³	2,96·10 ¹⁵			819760,4	1,24·10 ¹¹	2,67·10 ¹¹	3,83·10 ¹³	351712,6	819760,4	1,09·10 ¹¹
28	1,44·10 ¹¹	2,13·10 ¹³	3,42·10 ¹⁵			850121,9	1,33·10 ¹¹	2,87·10 ¹¹	4,27·10 ¹³	364739	850121,9	1,17·10 ¹¹
29	1,54·10 ¹¹	2,37·10 ¹³	3,94·10 ¹⁵			880483,4	1,43·10 ¹¹	3,08·10 ¹¹	4,74·10 ¹³	377765,4	880483,4	1,26·10 ¹¹
30	1,65·10 ¹¹	2,62·10 ¹³	4,51·10 ¹⁵			910844,9	1,53·10 ¹¹	3,30·10 ¹¹	5,25·10 ¹³	390791,8	910844,9	1,34·10 ¹¹
31	1,76·10 ¹¹	2,90·10 ¹³	5,14·10 ¹⁵			941206,4	1,63·10 ¹¹	3,52·10 ¹¹	5,79·10 ¹³	403818,2	941206,4	1,43·10 ¹¹
32	1,88·10 ¹¹	3,19·10 ¹³	5,84·10 ¹⁵			971567,9	1,74·10 ¹¹	3,75·10 ¹¹	6,37·10 ¹³	416844,6	971567,9	1,53·10 ¹¹
33	2,00·10 ¹¹	3,49·10 ¹³	6,60·10 ¹⁵			1,00·10 ¹⁶	1,85·10 ¹¹	3,99·10 ¹¹	6,99·10 ¹³	429871	1,00·10 ¹⁶	1,63·10 ¹¹
34	2,12·10 ¹¹	3,82·10 ¹³	7,44·10 ¹⁵			1,03·10 ¹⁶	1,96·10 ¹¹	4,24·10 ¹¹	7,64·10 ¹³	442897,4	1,03·10 ¹⁶	1,73·10 ¹¹
35	2,24·10 ¹¹	4,17·10 ¹³	8,36·10 ¹⁵			1,06·10 ¹⁶	2,08·10 ¹¹	4,49·10 ¹¹	8,34·10 ¹³	455923,8	1,06·10 ¹⁶	1,83·10 ¹¹
36	2,37·10 ¹¹	4,54·10 ¹³	9,35·10 ¹⁵			1,09·10 ¹⁶	2,20·10 ¹¹	4,75·10 ¹¹	9,07·10 ¹³	468950,1	1,09·10 ¹⁶	1,93·10 ¹¹
37	2,51·10 ¹¹	4,92·10 ¹³	1,04·10 ¹⁶			1,12·10 ¹⁶	2,32·10 ¹¹	5,02·10 ¹¹	9,85·10 ¹³	481976,5	1,12·10 ¹⁶	2,04·10 ¹¹
38	2,65·10 ¹¹	5,33·10 ¹³	1,16·10 ¹⁶			1,15·10 ¹⁶	2,45·10 ¹¹	5,29·10 ¹¹	1,07·10 ¹⁴	495002,9	1,15·10 ¹⁶	2,16·10 ¹¹
39	2,79·10 ¹¹	5,77·10 ¹³	1,29·10 ¹⁶			1,18·10 ¹⁶	2,58·10 ¹¹	5,57·10 ¹¹	1,15·10 ¹⁴	508029,3	1,18·10 ¹⁶	2,27·10 ¹¹
40	2,93·10 ¹¹	6,22·10 ¹³	1,43·10 ¹⁶			1,21·10 ¹⁶	2,72·10 ¹¹	5,86·10 ¹¹	1,24·10 ¹⁴	521055,7	1,21·10 ¹⁶	2,39·10 ¹¹

Фиг. 6

Таблица 6

ν	$\Delta \dot{S}_{T\nu}, \text{B}\cdot\text{A}$	ν	$\Delta \dot{S}_{T\nu}, \text{B}\cdot\text{A}$
1	848,645076+4125,093794i	21	9,652176e-6+0,001073i
2	0,000776+0,00823i	22	0,000068+0,007914i
3	0,195909+3,116481i	23	0,020324+2,479388i
4	0,000257+0,005458i	24	0
5	1,09733+29,100288i	25	0,020374+2,701633i
6	0,000086+0,00275i	26	0,000248+0,034183i
7	0,424292+15,752355i	27	0,00021+0,030066i
8	0,000914+0,03878i	28	0,000076+0,011272i
9	0,007781+0,371354i	29	0,01554+2,390369i
10	0,000316+0,016737i	30	0,000012+0,001912i
11	0,1048+6,114253i	31	0,006999+1,150853i
12	6,607382e-6+0,00042i	32	0,000154+0,026093i
13	0,092651+6,387813i	33	0,000411+0,071895i
14	0,000664+0,04927i	34	0,000075+0,013535i
15	0,000938+0,074643i	35	0,007651+1,420503i
16	0,000079+0,006739i	36	8,343356e-6+0,001593i
17	0,041254+3,719783i	37	0,003198+0,627571i
18	0,000033+0,003186i	38	0,000087+0,017588i
19	0,016993+1,712488i	39	0,000214+0,044247i
20	0,000436+0,046256i	40	0,000049+0,010456i

Фиг. 7

Таблица 7

ν	Измеренные значения			ν	Измеренные значения		
	$P_{H\nu}, \text{Вт}$	$I_{H\nu}, \text{A}$	$U_{H\nu}, \text{В}$		$P_{H\nu}, \text{Вт}$	$I_{H\nu}, \text{A}$	$U_{H\nu}, \text{В}$
1	95949	468,000	229,940	21	0	1,919	0,414
2	0	7,488	0,161	22	0	0,562	0,138
3	0	0,234	0,253	23	12	7,909	1,725
4	0	1,076	0,023	24	0	0	0,023
5	30	48,017	2,460	25	3	3,463	0,920
6	0	0,655	0,046	26	0	0,889	0,207
7	6	24,710	2,069	27	0	1,591	0,437
8	0	1,170	0,092	28	0	0,328	0,138
9	0	2,246	0,161	29	9	5,990	1,564
10	0	0,749	0,092	30	0	0,047	0,069
11	12	15,772	1,817	31	3	2,714	0,759
12	0	0,187	0,046	32	0	0,796	0,253
13	6	9,781	1,633	33	0	1,451	0,483
14	0	1,123	0,161	34	0	0,187	0,115
15	0	1,638	0,253	35	6	4,259	1,357
16	0	0,749	0,115	36	0	0,047	0,092
17	12	10,530	1,656	37	0	1,778	0,644
18	0	0	0,023	38	0	0,655	0,230
19	3	4,914	0,966	39	0	1,217	0,437
20	0	0,889	0,184	40	0	0,047	0,092

Фиг. 8

Таблица 8

v	Измеренные значения			v	Измеренные значения		
	$P_{нв}$, Вт	$I_{нв}$, А	$U_{нв}$, В		$P_{нв}$, Вт	$I_{нв}$, А	$U_{нв}$, В
1	90480	450,000	229,340	21	0	1,395	0,298
2	0	7,380	0,161	22	0	0,585	0,138
3	0	3,825	0,436	23	12	7,785	1,766
4	0	0,315	0,023	24	0	0,135	0,069
5	6	49,365	3,027	25	3	4,365	1,147
6	0	0	0,023	26	0	0,990	0,252
7	6	27,360	1,995	27	0	1,080	0,344
8	0	1,170	0,092	28	0	0,585	0,161
9	0	1,485	0,229	29	9	5,850	1,468
10	0	0	0,023	30	0	0,045	0,092
11	9	16,965	1,904	31	3	3,375	0,894
12	0	0,045	0,046	32	0	0,855	0,275
13	12	10,800	1,904	33	0	1,215	0,482
14	0	1,260	0,183	34	0	0,495	0,183
15	0	1,980	0,275	35	6	4,365	1,307
16	0	0,450	0,069	36	0	0	0,069
17	12	11,025	1,720	37	3	2,475	0,826
18	0	0,045	0,069	38	0	0,630	0,229
19	6	6,120	1,147	39	0	1,125	0,505
20	0	1,125	0,229	40	0	0,405	0,183

Фиг. 9