

Совершенствование методов расчета изоляции силовых трансформаторов

МЕЛЬНИКОВА О.С.
ИГЭУ, г. Иваново, Россия

Одной из основных причин отказа высоковольтных маслонаполненных трансформаторов является снижение электрической прочности внутренней изоляции. В определенной степени это обусловлено конструктивными недоработками, заложенными на стадии проектирования. Правильный расчет главной изоляции трансформаторов позволит обеспечить их надежную эксплуатацию в рамках нормативного срока службы. Накопленный опыт проектирования, изготовления и эксплуатации высоковольтных маслонаполненных трансформаторов, а также новые современные технологии изготовления требуют разработки новых методов и подходов к расчёту их изоляционных конструкций. Предложен подход к расчету и проектированию изоляции трансформаторов, учитывающий влияние объема масляного канала на пробивную напряженность в различных точках изоляции, а также статистических характеристик электрической прочности при воздействии различных форм напряжения в условиях эксплуатации. С использованием программного комплекса ANSYS MAXWELL проведен расчет изоляционных конструкций силовых трансформаторов. В двух проекциях 2D построена модель главной изоляции двухобмоточного трёхфазного трансформатора класса напряжения 110 кВ. Модель учитывает особенности конструкции главной изоляции силовых трансформаторов маслобарьерного типа: расстояние между обмотками, расстояние от обмоток до барьеров и емкостных колец. Предложенный подход позволяет повысить точность расчетов, учесть при проектировании изоляции особенности конструкции трансформатора и значительно большее число влияющих факторов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: силовые трансформаторы, изоляционные конструкции, методы расчета главной изоляции, электрическая прочность изоляции, напряженность электрического поля

Силовые трансформаторы представляют собой сложную систему, состоящую из различных элементов и узлов. Результаты испытаний маслонаполненных силовых трансформаторов, а также опыт их эксплуатации свидетельствуют о том, что одним из основных факторов, влияющих на надежность такого оборудования, является снижение электрической прочности внутренней изоляции [1, 2].

Анализ эксплуатационных данных по повреждаемости внутренней изоляции маслонаполненных трансформаторов [3] показывает, что 12–13% повреждений приходится на главную изоляцию. Главная изоляция маслонаполненных трансформаторов (изоляция между обмотками разных напряжений и между обмотками и заземленными частями) в зарубежной и отечественной практике выполняется маслобарьерного типа и представляет собой чередование масляных каналов и цилиндрических барьеров из электротехнического картона. Количество и толщина барьеров выбирается исходя из номинального напряжения трансформатора. Электрическая прочность прослоек масла в 3–4 раза меньше, чем у пропитанного электрокартона, поэтому нарушение электрической прочности имеет место в масляном канале. Результаты исследований [4–6] показывают, что наиболее повреждаемым является первый

масляный канал между обмоткой высшего напряжения и цилиндрическим барьером.

При протекании тока в месте пробоя масла последовательно соединенные масляные каналы ограничены неповрежденной частью изоляции и полных потерь изоляции не происходит. Такой пробой является частичным разрядом интенсивностью $10^{-7} - 10^{-6}$ Кл, в результате воздействия которого могут происходить необратимые повреждения твердой изоляции трансформаторов [7]. Дальнейшее образование частичных разрядов в масле в зависимости от времени существования и их интенсивности приводит к возникновению разрядов вдоль поверхности твердой изоляции, выполненной из электрокартона. В свою очередь, повреждение электрокартона по поверхности может привести к полному пробоям маслобарьерной изоляции между обмотками высшего и низшего напряжений, а также между соседними фазами. В эксплуатации и при испытаниях маслонаполненных трансформаторов возникновение повреждений изоляции недопустимо. Для обеспечения надежного функционирования электрооборудования изоляция силовых трансформаторов должна быть правильно рассчитана на стадии проектирования.

Методы расчета главной маслобарьерной изоляции трансформаторов [4–6, 8] основаны на определении

пробивной напряженности трансформаторного масла с учетом расстояния между обмотками на экспериментальных образцах (моделях, макетах), характерных для эксплуатационных маслonaполненных трансформаторов. При испытаниях моделей пробой масляного канала определяют регистрацией частичных разрядов акустическими методами. Расчетные значения пробивной напряженности масляного канала в действующих отечественных и зарубежных методиках [4–6, 8] для всех видов воздействующих напряжений определяют в виде зависимости минимальной пробивной напряженности от ширины масляного канала с использованием постоянных поправочных коэффициентов, учитывающих различные влияющие факторы:

$$E_{\text{м.к.пр}} = A / S_{\text{м.к}}^{-0,37}; \quad (1)$$

$$E_{\text{м.к.пр}} = B + C / S_{\text{м.к}}^{0,5}, \quad (2)$$

где $E_{\text{м.к.пр}}$ – минимальная пробивная напряженность трансформаторного масла; $S_{\text{м.к}}$ – ширина масляного канала (расстояние между выбранными точками изоляции); A, B, C – эмпирические коэффициенты, учитывающие конструкцию и различные воздействующие напряжения.

Размеры главной изоляции между обмотками силовых трансформаторов существенно увеличиваются с ростом класса напряжения трансформатора. Это приводит к увеличению массы и габаритов магнитной системы, обмоток и изоляционных конструкций и, соответственно, к возрастанию требований к изоляции. Так при испытаниях масла на электрическую прочность в стандартном разряднике значения пробивного напряжения устанавливаются с учетом класса номинального напряжения оборудования [9], и чем выше класс напряжения, тем выше его значение. Также стоит отметить изменение конструкции с увеличением номинальной мощности в пределах одного класса напряжения [10, 11]. При относительном изменении габаритов трансформатора с учетом номинального напряжения происходит усложнение схем электроизоляционных маслoбарьерных конструкций, при этом возрастают изоляционные расстояния между обмотками.

Увеличение габаритов силового трансформатора ведет к увеличению объема масла в баке трансформатора, а следовательно, и в масляных каналах главной изоляции. Развитие пробоя в трансформаторном масле, всегда содержащем различные примеси, подчиняется теории экстремальных значений (теории слабых мест). С ростом объема масла, находящегося в электрическом поле, вероятность возникновения пробоя увеличивается [12–14]. Поэтому с увеличением объема масла происходит снижение его качества. Этот факт отражается в используемых методиках расчета главной изоляции введением эмпирических постоянных коэффициентов, полученных ориентировочно.

Одним из факторов, влияющих на электрическую прочность главной изоляции высоковольтных транс-

форматоров, является воздействие различных видов напряжений: рабочего напряжения, внутренних и внешних перенапряжений. При проектировании изоляции для обеспечения требуемой электрической прочности расчеты необходимо выполнять при всех этих воздействиях.

Следует отметить, что методики расчета электрической прочности изоляции не менялись более 40 лет и в них не отражено влияние объема масляного канала, а также качества трансформаторного масла, которое может быть оценено с помощью статистических характеристик электрической прочности масла. Накопленный опыт проектирования и эксплуатации силовых маслonaполненных трансформаторов и совершенствование технологии изготовления их изоляции позволяют разработать более эффективные подходы к расчёту изоляционных конструкций и методы, позволяющие учесть влияние всех отмеченных выше факторов.

Уточнение методов расчета главной изоляции силовых трансформаторов. Объем масляного канала между обмоткой высшего напряжения и барьером из электрокартона с учетом минимальной пробивной напряженности определяется выражением [10]:

$$V_{\text{м.к.ВН}} = \pi H S_{\text{м.к.ВН}} \times \left(1,02 \cdot 10^{-2} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{н}}}{3 U_{\text{р}}}} \left(\frac{k_{\text{из}} U_{\text{исп}}}{k_{\text{П}} E_{\text{м.к.пр мин}}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{н}}}{3}} \right) + 2 S_{\text{с-НН}} + 2,42 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{н}}}{3}} + \frac{2 k_{\text{из}} U_{\text{исп}}}{k_{\text{П}} E_{\text{м.к.пр мин}}} - S_{\text{м.к.ВН}} \right), \quad (3)$$

где $S_{\text{м.к.ВН}}$ – ширина первого масляного канала (толщина изоляции между обмоткой высшего напряжения и ближайшим барьером); $S_{\text{н}}$ – номинальная мощность трансформатора; $U_{\text{исп}}$ – воздействующее испытательное напряжение; $k_{\text{из}} = 1,1–1,2$ – коэффициент, учитывающий влияние наличия барьеров и цилиндричности конструкции изоляции; $S_{\text{с-НН}}$ – толщина изоляции между обмоткой низшего напряжения и стержнем.

Применительно к главной изоляции силовых трансформаторов минимальная пробивная напряжённость масла $E_{\text{м.к.пр мин}}$ [11]:

$$E_{\text{м.к.пр мин}} = E_{\text{н}} + (E_{0,1} - E_{\text{н}}) \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha}, \quad (4)$$

где $E_{0,1}$ – пробивная напряжённость в масляном канале; $E_{\text{н}}$ – нижний предел пробивной напряжённости масляного канала; α – безразмерный параметр; P_3 – заданная вероятность пробоя масла (при выборе изоляции принимается 0,05).

В (4) неизвестным параметром является пробивная напряженность масла. Существующие методики расчета рекомендуют это значение определять на физических моделях главной изоляции. Современные программные комплексы (ПК) позволяют создавать

имитационные компьютерные модели и точно рассчитать значение пробивной напряженности масла.

Для создания модели и расчетов электрофизических характеристик изоляционных конструкций силового трансформатора применяется ПК *ANSYS MAXWEL*, который позволяет с высокой точностью рассчитать распределение электрического поля внутри бака трансформатора. В основе ПК лежит метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий найти единственно возможное распределение электромагнитного поля в заданной расчетной области при указанных граничных условиях. Требуемая область расчета разбивается на конечные элементы, в которых и выполняется расчет напряженностей электрического поля [15, 16].

Модель главной маслобарьерной изоляции высоковольтного трансформатора создается в ПК *AutoCAD*.

На первом этапе моделирования создается расчетная модель трансформатора. За основу взят двухобмоточный масляный трансформатор 110/10 кВ, широко применяемый в системах электроснабжения общего назначения. В расчетной модели будет использована одна обмотка низшего напряжения (НН) и одна обмотка высшего напряжения (ВН). Обмотки состоят из прямоугольных катушек. Толщина витка катушки с изоляцией равна 2 мм, длина катушки ВН – 170 мм, длина катушки НН – 70 мм, толщина изоляции на одну сторону – 0,5 мм [17]. Аналогично моделируется катушка НН. Расстояние между обмотками принимается равным 50 мм. Далее моделируются остальная часть изоляции, а также бак трансформатора.

Для дальнейших расчетов необходимы графики распределения напряженности в каналах между обмотками, для чего строятся полилинии в верхней, средней и нижней частях обмоток. Готовая модель трансформатора представлена на рис. 1.

На следующем этапе задаются электрофизические свойства элементам модели главной изоляции трансформатора, необходимые для расчета напряженности электрического поля. Обмоткам трансформаторов, состоящим из катушек, присваивается материал – медь. Продольная изоляция обмоток выполняется из кабельной бумаги. Электрофизические свойства кабельной бумаги задаются удельной проводимостью 9 нСм/м и диэлектрической проницаемостью 3,5. Цилиндрическим барьерам, угловым шайбам, емкостным кольцам присваивается материал – электротехнический картон с электрофизическими характеристиками: удельной проводимостью 1 пСм/м и диэлектрической проницаемостью 4. В баке трансформатора находится трансформаторное масло. Электрофизические характеристики масла задаются проводимостью 1 пСм/м для технически чистого и сухого масла и диэлектрической проницаемостью 2,2.

Расчет распределения электрического поля в главной изоляции выполняется в ограниченной области.

Граничным условиям соответствуют на модели стенки бака и стержень трансформатора. Линии, соответствующие баку трансформатора и стержню, являются расчетной областью. Так как эти части заземлены, потенциал на их поверхностях задается нулевым.

Для определения расстояний между обмотками силового трансформатора исходными величинами служат испытательные напряжения [4, 17]. Изоляция силовых трансформаторов согласно [18, 19] испытывается:

наибольшим рабочим напряжением;

одноминутным испытательным напряжением промышленной частоты;

стандартным грозвым импульсом 1,2/50.

Для исследования распределения электрического поля внутри бака трансформатора и расчетов необходимых параметров в первом масляном канале с помощью *ANSYS MAXWEL 2D* для принятой конструкции рассматриваемых трансформаторов класса 110 кВ определяется напряженность в масляном канале при соответствующих напряжениях, в качестве которых принимаются нормативные значения длительно допустимого напряжения 126 кВ, испытательного одноминутного напряжения промышленной частоты 200 кВ и испытаний грозвым импульсом 550 кВ [18, 19]. При этом в расчетах изоляции высоковольтных трансформаторов принимается, что электрическая прочность канала между обмоткой и барьером определяется средней напряженностью вдоль силовых линий от угла катушки до изоляционного барьера.

При воздействии рабочего напряжения принимается линейное распределение напряжения по обмоткам трансформатора. Это означает, что между соседними катушками разность потенциала составляет 0%. Таким образом, все катушки обмотки находятся под одним по-

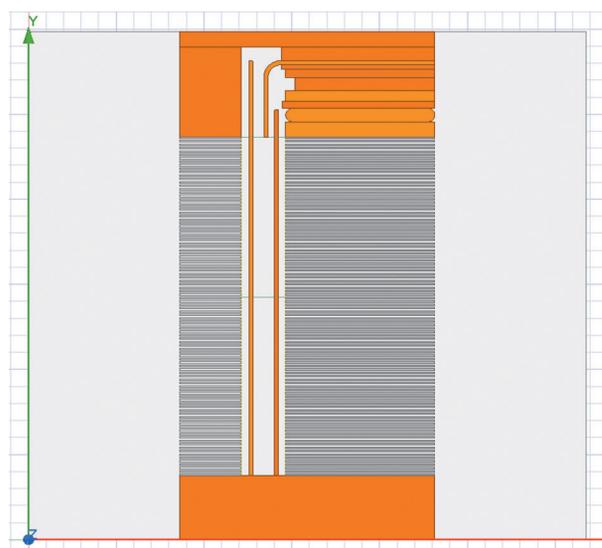


Рис. 1. Модель для расчета изоляции силового двухобмоточного трансформатора 110/10 кВ

Fig. 1. Model for calculating the insulation of a two-winding power 110/10 kV transformer

тенциалом. Для трансформаторов 110/10 кВ длительно допустимое напряжение равно 126 кВ. Это напряжение будет подаваться на обмотку ВН.

Для заданной ширины масляного канала определяется расчетная напряженность в масляном канале при соответствующем нормативном испытательном напряжении, в качестве которого принимается испытательное одноминутное напряжение промышленной частоты.

На рис. 2 показано распределение электрического поля в трансформаторе при воздействии одноминутного испытательного напряжения промышленной частоты.

При испытании изоляции одноминутным напряжением напряжение по обмотке трансформатора распределяется практически линейно, как и в случае с длительно допустимым напряжением промышленной частоты. Поэтому потенциал катушек по всей длине обмоток был задан одинаковым.

В результате компьютерных расчетов были получены значения пробивной напряженности: в верхней части обмотки ВН в первом масляном канале $E_{\text{мк}} = 7,75$ кВ/мм; в середине обмотки ВН в первом масляном канале $E_{\text{мк}} = 4,83$ кВ/мм; в нижней части обмотки в первом масляном канале $E_{\text{мк}} = 11,43$ кВ/мм. В [4] приведены ориентировочно полученные допустимые средние рабочие напряженности в первом масляном канале $E_{\text{раб}} = 2,5-5$ кВ/мм.

При воздействии грозвым импульсом напряжение по обмоткам трансформатора, как и в случае испытания изоляции одноминутным напряжением, распределяется нелинейно. Здесь имеет место сложный электромагнитный переходный процесс. В 1970–1980 гг. эти значения были получены также при испытаниях на моделях и макетах. Напряжение в середине обмотки ВН для шести катушек будет равно 550 кВ, далее оно будет уменьшаться симметрично вверх и вниз на 2%, в концах обмоток на крайних трех катушках оно будет уменьшаться на 10 % на каждой катушке [15, 16].

Распределение напряженности внутри бака трансформатора и графики распределения напряженности вверху, в середине и внизу обмоток представлены на рис. 3–5.

Выводы. В основе используемых методов расчета главной изоляции трансформаторов лежит зависимость пробивной напряженности от ширины масляного канала, а влияющие факторы учитываются введением эмпирических постоянных. Такое положение обусловлено старением парка силовых трансформаторов, медленной заменой устаревшего оборудования, что не стимулирует разработку новых методов и подходов к расчету изоляционных конструкций высоковольтного оборудования.

Проведен компьютерный расчет изоляционных конструкций силовых трансформаторов и построена

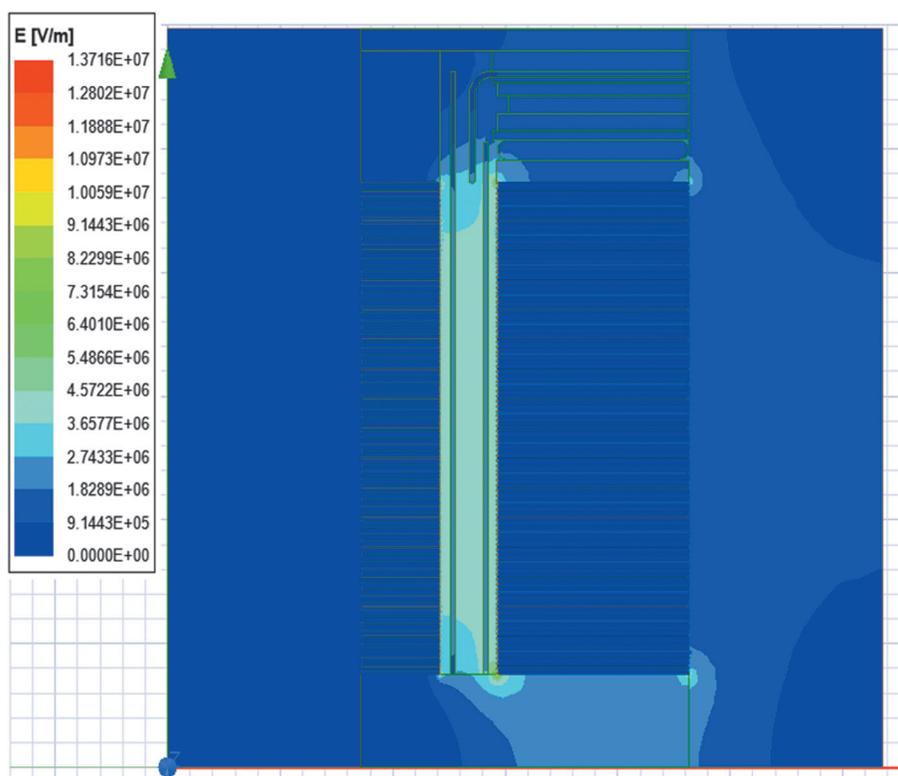


Рис. 2. Распределение напряженности внутри трансформатора при одноминутном испытательном напряжении промышленной частоты

Fig. 2. Distribution of tension inside the transformer at one-minute test voltage of power frequency

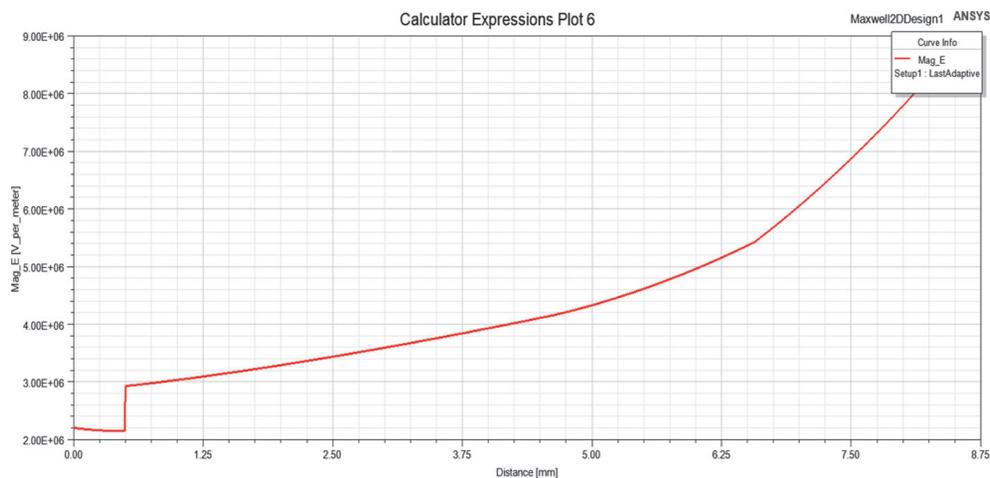


Рис. 3. Распределение напряженности в нижнем крае обмоток в первом масляном канале при воздействии длительно допустимого напряжения

Fig. 3. Tension distribution in the lower edge of the windings in the first oil channel when exposed to long-term allowable voltage

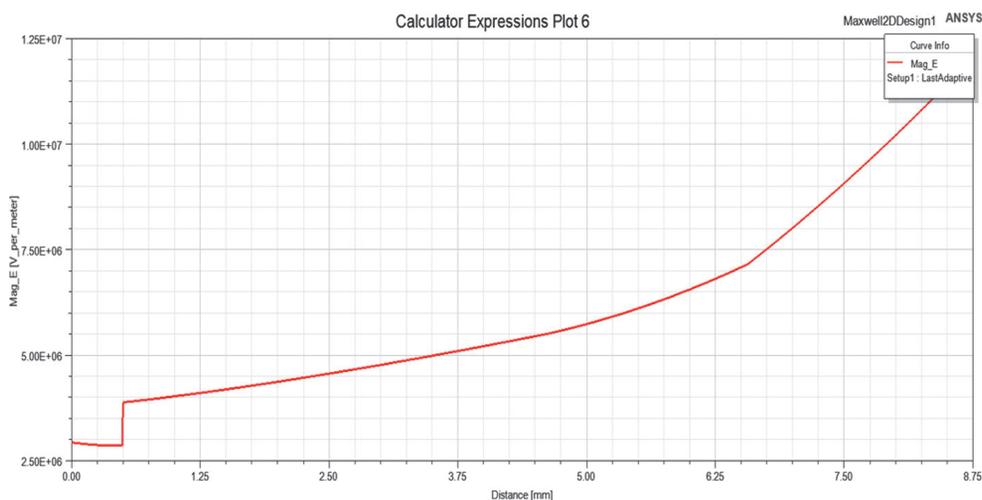


Рис. 4. Распределение напряженности в нижнем крае обмоток в первом масляном канале при воздействии одноминутного испытательного напряжения промышленной частоты

Fig. 4. Tension distribution in the lower edge of the windings in the first oil channel when exposed to a one-minute test voltage of power frequency

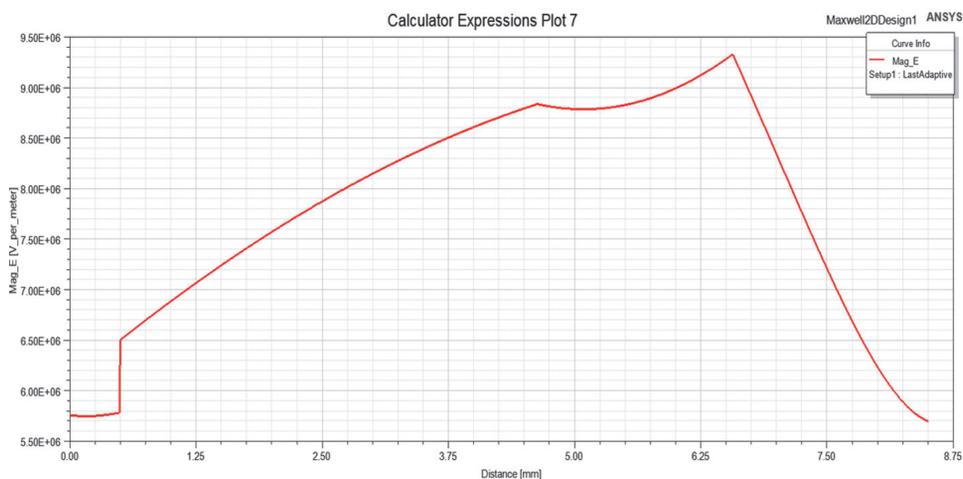


Рис. 5. Распределение напряженности в нижнем крае обмоток в первом масляном канале при испытании грозвым импульсом

Fig. 5. Distribution of tension in the lower edge of the windings in the first oil channel during lightning impulse testing

модель главной изоляции двухобмоточного трёхфазного трансформатора класса напряжения 110 кВ. Для оценки реального распределения напряженности электрического поля внутри бака трансформатора с учетом различных электрических воздействий на обмотки трансформатора смоделированы влияющие факторы: рабочее длительно допустимое напряжение, одноминутное напряжение, грозовой импульс. Для двух последних факторов учтено нелинейное распределение напряжения по обмоткам.

На основе полученных значений влияющих факторов рассчитана минимальная пробивная напряженность в различных точках маслосборной изоляции трансформатора, что особенно важно для первого масляного канала из-за его высокой повреждаемости при эксплуатации трансформатора.

Результаты расчета электрического поля могут быть использованы для определения основных электрических характеристик между обмотками, в том числе распределения напряженности между обмотками в середине, а также на краях обмоток и распределения напряженности между обмотками высшего и низшего напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Львов М.Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше. – Электричество, 2010, № 2, с. 27–31.
2. Львов М.Ю. и др. Методологические аспекты развития частичных разрядов и контроля изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации. – Энергетик, 2017, № 9, с. 16–20.
3. Серебряков А.С. Семёнов Д.А. Определение оставшегося ресурса главной изоляции распределительных трансформаторов. – Электротехника, 2013, № 6, с. 2–8.
4. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1987, 368 с.
5. Черноготский В.М., Джунь Л.П. Методология выбора изоляции трансформаторного оборудования УВН переменного тока. – Электро, 2009, № 4, с. 19–25.
6. Морозова Т.И. Исследования электрической прочности и разработка метода расчета главной изоляции высоковольтных трансформаторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВЭИ им. В.И. Ленина, 1970, 22с.
7. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979, 224 с.
8. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконяца. Изд. 6-е. М.: НЦ ЭНАС, 2004, 355 с.
9. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004, 616 с.
10. Nelson J.K., Salvage B., Sharpely W.A. Electrical strength of transformer oil for large electrode areas. – Proc. IEE, 1971, vol. 118, No. 2. pp.388–390, DOI:10.1049/PIEE.1971.0071.
11. Ушаков В.Я., Лопатин В.В., Багин В.В. Эффект площади электродов при пробое трансформаторного масла. – Известия вузов. Физика, 1964, № 4, с. 147–149.
12. Weber K.H., Endicott H.S. Extremal area effect for large electrodes for electric breakdown of transformer oil. – AIEE Trans., Power App. And Syst., 1957, vol.76 pt.3, pp.1091–1096.
13. Мельникова О.С. Выбор и расчёт статистических характеристик электрической прочности масляных каналов главной изоляции трансформаторов для повышения эффективности её диагностики. – Вестник ИГЭУ, 2014, вып. 3, с. 38–44.
14. Митькин Ю.А., Мельникова О.С. Определение статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла с учётом его объёма в трансформаторах. – Вестник ИГЭУ, 2012, вып. 2, с. 21–25.
15. Мельникова О.С., Кузнецов В.С. Метод расчета электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов. – Вестник ИГЭУ, 2020, вып. 5, с. 48–55.
16. Кузнецов В.С., Мельникова О.С. Исследование электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов. – 27 МНТК «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2021, с. 1053.
17. Тихомиров П.М. Расчёт трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986, 528 с.
18. ГОСТ Р 55195-2012. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. М.: Стандартинформ, 2014, 48 с.
19. ГОСТ Р 56738-2015. Трансформаторы и силовые реакторы. Требования и методы испытаний электрической прочности изоляции. М.: Стандартинформ, 2016, 78 с.

[31.08.2021]



Автор: Мельникова Ольга Сергеевна – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» Ивановского государственного энергетического университета, г. Иваново, Россия.

Improvement of Power Transformer Insulation Calculation Methods

MEL'NIKOVA Olga S. (Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia) – Docent of the High-voltage Electric power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Dept., Cand. Sci. (Eng.).

Degradation of the internal insulation electrical strength is one of the main factors leading to failures of high-voltage oil-filled transformers. To a certain extent, this is due to structural shortcomings laid down at the design stage. Correct calculation of the transformer main insulation will help ensure their reliable

operation within the standard service life. The experience gained with design, manufacture and operation of high-voltage oil-filled transformers, as well as new modern manufacturing technologies generate the need to develop new methods and approaches to the calculation of their insulation structures. An approach to calculation and design of transformer insulation is proposed, which takes into account the influence of the oil channel volume on the breakdown field strength at various points of insulation, as well as electrical strength statistical characteristics when exposed to various voltage waveforms under operating conditions. Using the ANSYS MAXWELL software package, the insulation structures of power transformers were calculated. A model of a 110 kV two-winding three-phase transformer's main insulation is constructed in two 2D projections. The model takes into account the design features of the main insulation of oil-barrier type power transformers: the distance between the windings and the distance from the windings to barriers and capacitive rings. By using the proposed approach it becomes possible to achieve better calculation accuracy and take into account the transformer design features and significantly larger number of influencing factors in designing the transformer insulation.

Key words: power transformers, insulation structures, power transformer main insulation calculation methods, insulation dielectric strength, electric field strength

REFERENCES

1. L'vov M.Yu. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2010, No. 2, pp. 27–31.
2. L'vov M.Yu., et al. *Energetik – in Russ. (Power Engineer)*, 2017, No. 9, pp. 16–20.
3. Serebryakov A.S. Semyonov D.A. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2013, No. 6, pp. 2–8.
4. Kuchinskiy G.S., Kizevetter V.E., Pinal' Yu.S. *Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya (Isolation of High Voltage Installations)*. M.: Energoatomizdat, 1987, 368 p.
5. Chornogotskiy V.M., Dzhun' L.P. *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2009, No. 4, pp. 19–25.
6. Morozova T.I. *Issledovaniya elektricheskoy prochnosti i razrabotka metoda rascheta glavnoy izolyatsii vysokovol'tnykh transformatorov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk (Studies of Electrical Strength and Development of a Method for Calculating the Main Insulation of HV Transformers: Abstract of the Dis. ... Cand. Sci. (Eng.))*. M.: VEI im. V.I. Lenina, 1970, 22 p.
7. Kuchinskiy G.S. *Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruktivnykh (Partial discharges in high-voltage structures)*. L.: Energiya, 1979, 224 p.
8. RD 34.45-51.300-97. *Ob'em i normy ispytaniy elektrooborudovaniya (Scope and Standards of Testing of Electrical Equipment)/ Under Ed. B.A. Alekseev, F.L. Kogan, L.G. Mamikonyants*. M.: NTs ENAS, 2004, 355 p.
9. *Silovye transformatory. Spravochnaya kniga (Power Transformers. Reference Book) / Under Ed. S.D. Lizunov, A.K. Lokhanin*. M.: Energoizdat, 2004, 616 p.
10. Nelson J.K., Salvage B., Sharpley W.A. Electrical strength of transformer oil for large electrode areas. – Proc. IEE, 1971, vol. 118, No. 2. pp.388–390, DOI:10.1049/PIEE.1971.0071.
11. Ushakov V.Ya., Lopatin V.V., Bagin V.V. *Izvestiya vuzov. Fizika – in Russ. (News of Universities. Physics)*, 1964, No. 4, pp. 147–149.
12. Weber K.H., Endicott H.S. Extremal area effect for large electrodes for electric breakdown of transformer oil. – AIEE Trans., Power App. And Syst., 1957, vol.76 pt.3, pp.1091–1096.
13. Mel'nikova O.S. *Vestnik IGEU – in Russ. (Vestnik of ISPEU)*, 2014, iss. 3, pp. 38–44.
14. Mit'kin Yu.A., Mel'nikova O.S. *Vestnik IGEU – in Russ. (Vestnik of ISPEU)*, 2012, iss. 2, pp. 21–25.
15. Mel'nikova O.S., Kuznetsov V.S. *Vestnik IGEU – in Russ. (Vestnik of ISPEU)*, 2020, iss. 5, pp. 48–55.
16. Kuznetsov V.S., Mel'nikova O.S. *27 MNTK «Radioelektronika, elektrotehnika i energetika» – in Russ. (27 ISTC "Radio Electronics, Electrical Engineering and Power Engineering")*, 2021, p. 1053.
17. Tikhomirov P.M. *Raschyot transformatorov (Calculation of Transformers)*. M.: Energoatomizdat, 1986, 528 p.
18. GOST R 55195-2012. *Elektrooborudovanie peremennogo toka na napryazheniya ot 1 do 750 kV. Trebovaniya k elektricheskoy prochnosti izolyatsii (Electrical Equipment for A.C. Voltages from 1 to 750 kV. Requirements for Dielectric Strength of Insulation)*. M.: Standartinform, 2014, 48 p.
19. GOST R 56738–2015. *Transformatory i silovye reaktory. Trebovaniya i metody ispytaniy elektricheskoy prochnosti izolyatsii (Power Transformer and Reactors. Requirements and Methods for Dielectric Tests)*. M.: Standartinform, 2016, 78 p.

[31.08.2021]