ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ

DOI: 10.15593/2224-9923/2014.10.13

УДК 621.3.048.1

© Чалов И.А., 2014

МЕТОД ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ДИАГНОСТИКЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НЕФТЕПРОМЫСЛОВ

И.А. Чалов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Цель работы – выбор эффективного метода диагностики вводов, который позволит обеспечить снижение аварийности трансформаторов, возникающий из-за выхода из строя высоковольтных вводов. Отмечается важная роль силовых трансформаторов в обеспечении непрерывности технологического процесса добычи нефти. Рассматриваются условия работы и классы напряжения трансформаторов нефтепромыслов, типы вводов трансформаторов и их дефекты. Характеризуются и сравниваются между собой методы диагностики вводов. Делается вывод о перспективности метода частичных разрядов для выявления дефектов на ранней стадии. Предлагается использовать в целях диагностики спектральный анализ импульсов частичных разрядов.

Раскрываются особенности спектрального анализа импульсов частичных разрядов. Отмечается важная роль фазового спектра для полноты и информативности гармонического анализа. Приводится способ расширения области значений начальных фаз гармоник. Описывается выбор числа гармоник и частоты основной гармоники и его влияние на результат анализа. Демонстрируется сходство формы импульсов частичных разрядов во вводах трансформаторов и в концевых кабельных муфтах. Представлены выводы о возможности определения места дефекта по форме спектров импульсов частичных разрядов.

Ключевые слова: распределительные сети нефтепромыслов, силовые трансформаторы, высоковольтные вводы, периодическая диагностика, метод частичных разрядов, анализ формы импульса, гармонический анализ, ряд Фурье, амплитудный спектр, фазовый спектр, синтез сигнала, коэффициент затухания, коэффициент фазы, частотный диапазон импульса.

METHOD OF PARTIAL DISCHARGE IN THE DIAGNOSIS OF POWER DISTRIBUTION TRANSFORMERS ON OILFIELDS

I.A. Chalov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Purpose of work – selection of an efficient inputs diagnosis method, which would allow to reduce transformers accidents arising due to high voltage inputs failure. The important role of power transformers to ensure continuity of the oil production process is noted. Conditions of work and classes of oilfields voltage transformer, transformers inputs and their defects are considered. Inputs diagnostic methods are characterized and compared with each other. It is concluded that the partial discharge method is promising for detecting defects at early stages. It is proposed to use for diagnostic purposes spectral analysis of partial discharge pulses.

The peculiarities of the spectral analysis of partial discharge pulses are described. The important role of the phase spectrum for completeness and informative harmonic analysis is noted. A way to extend the range of the initial phases of the harmonics is provided. The selection of the harmonics number and the fundamental frequency and its impact on the analysis is described. The similarity form of partial discharge pulses in transformer inputs and cable terminations is demonstrated. The conclusions about the possibility of determining the place of the defect in the spectra form of partial discharge pulses are presented.

Keywords: oilfields distribution networks, power transformers, high voltage inputs, periodic maintenance, the method of partial discharge, pulse shape analysis, harmonic analysis, Fourier series, amplitude spectrum, phase spectrum, signal synthesis, attenuation coefficient, phase coefficient, frequency range of the pulse.

Введение

Технологическое оборудование нефтепромыслов получает питание от распределительных сетей напряжением 6–35 кВ. Наиболее ответственным элементом распределительных сетей нефтепромыслов являются силовые трансформаторы. Выход трансформатора из строя влечет за собой остановку технологического процесса добычи нефти и значительные убытки, поэтому важной задачей является периодическая диагностика силовых трансформаторов с целью определения их реального технического состояния и предотвращения выхода оборудования из строя. Для этого необходимо выявить распространенные виды дефектов трансформаторов и выбрать эффективные методы обнаружения этих дефектов.

Условия работы и классы напряжения трансформаторов в распределительных сетях нефтепромыслов

В распределительных сетях нефтепромыслов применяются силовые трансформаторы на напряжение 6–35 кВ. Наибольшее число отказов трансформаторов связано с выходом из строя вводов [1].

Современная технология добычи нефти предусматривает использование специального технологического оборудования и частотно-регулируемого электропривода. Преобразователи частотно-регулируемого электропривода являются источником высших гармоник и искажают напряжение питающей сети [2]. Искажение питающего напряжения и наличие в сети гармоник высоких частот приводит к повышенному нагреву трансформатора и вводов.

Для электроустановок нефтепромыслов характерны частые коммутации и тяжелые режимы работы. Кроме того, применение элегазовых выключателей приводит к возникновению опасных коммутационных перенапряжений.

Перечисленные условия работы предъявляют повышенные требования к надежности электрооборудования и приводят к его преждевременному износу.

Типы вводов трансформаторов распределительных сетей и их дефекты

На номинальное напряжение 6–35 кВ используются вводы следующих конструкций [1]:

- вводы с масляной изоляцией;
- маслоподпорные вводы;
- вводы с твердой изоляцией конденсаторного типа.

Большинство высоковольтных вводов, находящихся в эксплуатации в распределительных сетях нефтепромыслов, имеют твердую изоляцию конденсаторного типа.

К основным причинам ухудшения состояния внутренней изоляции вводов относятся электрическое старение, тепловое старение, окисление изоляции и увлажнение [1]. Развитие дефектов определяется совокупностью этих процессов. Основной причиной электрического старения изоляции вводов являются частичные разряды (ЧР).

Методы контроля состояния изоляции вводов

В настоящее время существует и применяется большое количество методов контроля технического состояния вводов [1]. Традиционно используемыми методами являются измерение сопротивления изоляции измерительного конденсатора и последних слоев изоляции, измерение диэлектрических характеристик изоляции (значения тангенса угла диэлектрических потерь, комплексной проводимости и емкости различных зон изоляции), а также анализ масла (физико-химический, хроматографический анализ, анализ производных фурана).

Большинство методов (измерение диэлектрических характеристик, анализ масла и т.д.) являются интегральными –

не позволяют локализовать дефект в изоляции. Дифференциальными методами (позволяющими локализовать дефект) являются тепловизионное обследование и измерение ЧР.

Наиболее информативными (позволяющими выявить большинство дефектов) методами являются анализ масла и регистрация ЧР.

Наиболее перспективным методом контроля изоляционной конструкции вводов на ранней стадии развития дефекта является регистрация частичных разрядов. Этот метод обладает следующими преимуществами:

- позволяет обнаружить большинство дефектов во вводе;
- позволяет выявить дефект на первоначальной стадии (остальные методы обнаруживают только последствия разрядов – изменение диэлектрических характеристик, продукты разрушения изоляции);
- позволяет локализовать место дефекта в оборудовании;
- не требует вывода оборудования из работы;
- несет обширную диагностическую информацию.

Подходы к повышению эффективности диагностики изоляции вводов по характеристикам частичных разрядов

Основной проблемой при использовании метода регистрации ЧР является отсутствие нормирования разрядов в изоляции. Это связано с существенным различием сигналов разрядов различной физической природы, что не позволяет руководствоваться единичными нормами для выявления всех видов разрядов. На практике в основном применяется оценка только по величине кажущегося заряда ЧР, что недостаточно объективно [3]. Для повышения информативности и достоверности данного метода требуется использование критериев оценки и по другим параметрам ЧР.

В настоящее время применяются следующие подходы к повышению эффективности диагностики по характеристикам ЧР [3–5]:

- оценка неоднократности возникновения ЧР при помощи коэффициента регулярности;
 - определение интенсивности процесса с учетом распределения числа ЧР по их кажущемуся заряду;
 - использование значения мощности ЧР в качестве характеристики интенсивности разрядов и степени развития дефекта;
 - определение вида разрядов с учетом распределения сигналов ЧР в виде кажущегося заряда по фазе периода переменного напряжения;
 - анализ зависимости длительности фронта импульса ЧР от степени развития дефекта;
 - частотный анализ импульса ЧР (вейвлет-анализ и спектральный анализ).
- Перспективным направлением является анализ формы импульса ЧР, в частности спектральный анализ.

Особенности спектрального анализа импульсов ЧР

Существует две тождественные формы записи ряда Фурье: через коэффициенты косинусов и синусов [6]:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^N (a_k \cos \omega_1 t + b_k \sin \omega_1 t), \quad (1)$$

и через амплитуды и начальные фазы гармоник:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^N A_k \cos(k\omega_1 t - \varphi_k), \quad (2)$$

где $f(t)$ – функция времени; c_0 – среднее значение функции на заданном интервале; k – номер гармоники; ω_1 – круговая частота первой гармоники; t – время; A_k – амплитуда гармоники с номером k ; φ_k – начальная фаза гармоники с номером k .

Если экспериментальные данные представлены в форме таблицы значений ис-

ходной функции времени, то численное разложение в ряд Фурье заключается в нахождении коэффициентов ряда (1) по формулам [6, 7]

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} f_i \cos \omega_i k i \Delta t;$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} f_i \sin \omega_i k i \Delta t,$$

где i – номер точки; N – число точек на заданном интервале; f_i – значение функции в точке с номером i ; Δt – временной интервал между точками.

При этом амплитуды и фазы определяются по аналитическим формулам [8]

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2};$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}.$$

Поскольку временное и спектральное представление сигнала равноправно и взаимозаменяемо, спектр сигнала несет в себе полную информацию о сигнале. Тем не менее это справедливо, только если учитываются оба параметра (либо a и b , либо A и φ). Это означает, что при использовании для анализа сигнала только

его амплитудного спектра часть информации, содержащейся в сигнале, будет потеряна.

Критерием верности анализа является сопоставление исходного сигнала и функции, полученной при синтезе по найденным коэффициентам. Часто при анализе находят коэффициенты a и b , а потом строят амплитудный спектр $A(f)$.

Покажем, как меняется синтезированный (при использовании выражения (2)) сигнал по сравнению с исходным импульсом, если не учитывать фазовый спектр (рис. 1, 2). Сплошной линией показана исходная функция, штриховой линией – синтезированная. Очевидно, что во втором случае форма сигнала существенно искажается. Это подтверждает потерю части информации о сигнале.

При построении фазового спектра импульса ЧР существенным является вопрос определения начальных фаз гармоник. Для расширения области значений фазы необходимо учитывать не только значения $\varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}$, но и знаки коэф-

фициентов a и b , а также использовать тригонометрические формулы приведения:

Рис. 1. Синтез импульса ЧР по выражению (2) с учетом фазового спектра

если $a \geq 0$,

$$\varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}; \quad (3)$$

если $a < 0$, $\varphi_k = \pi - \arctg \frac{b_k}{a_k}$;

если $\varphi_k < 0$, $\varphi_k = 2\pi + \varphi_k$ (если нужен диапазон от 0° до $+360^\circ$).

Без учета выражений (3) форма сигнала искажается, и информация теряется (рис. 3).

Важными параметрами при гармоническом анализе являются частота основной гармоники и число гармоник. Значения

этих параметров существенно влияют как на внешний вид спектра, так и на точность метода. Теоретически чем больше число гармоник, тем выше точность анализа.

Однако на практике (при хорошей сходимости ряда Фурье) может оказаться достаточным вычисление сравнительно небольшого числа гармоник [8, 9]. Существует единственное ограничение по числу гармоник. Оно определяется частотой дискретизации при измерении сигнала. При превышении этой частоты возникают методические погрешности и искажения сигнала [10].

Рис. 2. Синтез импульса ЧР по выражению (2) без учета фазового спектра

Рис. 3. Синтез импульса ЧР по выражению (2) без учета знаков коэффициентов a и b при определении начальных фаз

Рис. 4. Амплитудные искажения импульса ЧР при уменьшении частоты основной гармоники

Рис. 5. Увеличение периода исходного импульса ЧР добавлением нулевых значений

В общем случае частота основной гармоники определяется как величина, обратная периоду функции. При уменьшении периода теряется низкочастотная часть исходной информации. При увеличении периода происходит амплитудное искажение сигнала (рис. 4). Чтобы избежать искажений сигнала, нужно увеличить интервал задания импульса ЧР за счет добавления нулевых значений (рис. 5) [11, 12].

Использование спектрального анализа в целях диагностики

При электрическом измерении ЧР в трансформаторах применяется два способа подключения измерительного устройства – к измерительным выводам высоковольтных вводов и в цепь заземления бака трансформатора. В обоих случаях важным является определение источника сигнала (т.е. места дефекта).

Это позволит отделить разряды во вводах от разрядов внутри трансформатора и разрядов из внешней цепи [13]. Особенно сложно сделать это при подключении измерительного устройства в цепь заземления.

Проведенные исследования с использованием спектрального анализа позволили определить ширину частотного спектра для импульсов ЧР в кабельной линии и в трансформаторе (рис. 6).

Для импульсов ЧР во вводах трансформаторов и в концевых кабельных муфтах (форма и спектры этих импульсов показаны на рис. 7) характерно минимальное затухание: они имеют максимальную верхнюю границу полосы частот по сравнению с остальными импульсами ЧР.

Это объясняется тем, что расстояние, пройденное импульсом ЧР из ввода, минимально по сравнению с импульсами ЧР изнутри трансформатора. При этом высокие частоты затухают интенсивнее,

так как коэффициент затухания пропорционален частоте. Таким образом, разряды во вводах от разрядов внутри трансформатора можно отличить по ширине частотного спектра импульса [14, 15].

Рис. 6. Зависимость ширины частотного диапазона импульса от пройденного им расстояния: 1 – импульсы в концевой кабельной муфте; 2 – импульсы во вводах трансформатора; 3 – прямые импульсы в кабеле и импульсы внутри трансформатора; 4 – отраженные импульсы в кабеле

Рис. 7. Форма импульсов ЧР во вводе трансформатора (сплошная линия) и в концевой кабельной муфте (штриховая линия) и их спектры

Заключение

Применение спектрального анализа импульсов частичных разрядов существенно повышает эффективность диагностики трансформаторов. Данный метод позволяет своевременно выявить дефекты в изоляции и определить мес-

тоположение (во вводе или внутри трансформатора) этих дефектов. Предлагаемая методика способствует снижению аварийности трансформаторов, повышению надежности электроснабжения установок добычи нефти, снижению простоя технологического оборудования.

Список литературы

1. Седунин А.М., Чалов И.А., Сидельников Л.Г. Классификация высоковольтных вводов силовых трансформаторов и проблемы их эксплуатации на предприятиях горной промышленности // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 12. – С. 24–28.
2. Левин В.М., Кузьмина Д.В. Особенности эксплуатации силовых трансформаторов в распределительных сетях 6–35 кВ нефтепромыслов // Сб. науч. тр. Новосиб. гос. техн. ун-та. – 2009. – № 4 (58). – С. 65–70.
3. Вдовико В.П. Повышение эффективности диагностирования высоковольтного оборудования с использованием характеристик частичных разрядов // ЭЛЕКТРО. – 2008. – № 6. – С. 7–12.
4. Диагностические признаки для отбраковки вводов высокого напряжения с бумажно-масляной изоляцией / М.А. Анисеева, Р.С. Арбузов, С.В. Живодерников, Е.А. Лазарева, А.Г. Овсянников, М.А. Панов // ЭЛЕКТРО. – 2009. – № 1. – С. 22–25.
5. Ермаков Е.Г., Монастырский А.Е. О проблемах применения электрического метода регистрации частичных разрядов для диагностики высоковольтных силовых трансформаторов // Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы. – Екатеринбург: Автограф, 2010. – С. 39–48.
6. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. Справочное руководство: пер. с англ. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. – 524 с.
7. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1952. – 192 с.
8. Федюков Ю.А., Фошкина С.В. Особенности применения рядов Фурье в экспериментальных исследованиях // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006. – № 5. – С. 75–79.
9. Гольдштейн Е.И., Радаев Е.В. Гармонический анализ токов (напряжений) при наличии в них интергармоник и неизвестном периоде результирующего сигнала // Электричество. – 2009. – № 12. – С. 86–88.
10. Седунин А.М., Чалов И.А., Сидельников Л.Г. Амплитудно-частотные характеристики частичных разрядов во вводах силовых трансформаторов и вопросы метрологии // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2011. – № 1. – С. 152–161.
11. Boashash B. Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference. – Oxford: Elsevier Science, 2003.
12. Bracewell R.N. The Fourier Transform and Its Applications. – 3rd ed. – Boston: McGraw-Hill, 2000. – 236 p.
13. Grafakos L. Classical and Modern Fourier Analysis. – Prentice-Hall, 2004. – 359 p.
14. Yitzhak Katznelson. An introduction to harmonic analysis. – 3rd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 255 p.
15. Zygmund A. Trigonometric series. – 3rd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2002. – 276 p.

References

1. Sedunin A.M., Chalov I.A., Sidel'nikov L.G. Klassifikatsiia vysokovol'tnykh vvodov silovykh transformatorov i problemy ikh ekspluatatsii na predpriiatiakh gornoj promyshlennosti [Classification of high-voltage bushings of power transformers and the problems of their exploitation of mining industry]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2011, no. 12, pp. 24–28.
2. Levin V.M., Kuz'mina D.V. Osobennosti ekspluatatsii silovykh transformatorov v raspredelitel'nykh setiakh 6–35 kV neftepromyslov [Features of operation of power transformers in distribution networks]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 4 (58), pp. 65–70.

3. Vdoviko V.P. Povyshenie effektivnosti diagnostirovaniia vysokovol'nogo oborudovaniia s ispol'zovaniem kharakteristik chastichnykh razriadov [Improving the efficiency of diagnosis of high voltage equipment using partial discharge]. *Elektro*, 2008, no. 6, pp. 7–12.

4. Anikeeva M.A., Arbuzov R.S., Zhivodernikov S.V., Lazareva E.A., Ovsiannikov A.G., Panov M.A. Diagnosticheskie priznaki dlia otrakovki vvodov vysokogo napriazheniia s bumazhno-maslianoi izoliatsiei [Diagnostic features for rejection of high voltage bushings with paper-oil insulation]. *Elektro*, 2009, no. 1, pp. 22–25.

5. Ermakov E.G., Monastyrskii A.E. O problemakh primeneniia elektricheskogo metoda registratsii chastichnykh razriadov dlia diagnostiki vysokovol'nykh silovykh transformatorov [On the problems of the application of the electrical method for registration of partial discharge diagnostics of high power transformers]. *Transformatory: ekspluatatsiia, diagnostirovanie, remont i prodlenie sroka sluzhby*. Ekaterinburg: Avtograf, 2010. pp. 39–48.

6. Lantosh K. Prakticheskie metody prikladnogo analiza. Spravochnoe rukovodstvo [Practical Methods of Applied Analysis. reference manual]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 1961. 524 p.

7. Kharkevich A.A. Spektry i analiz [Spectra and analysis]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 1952. 192 p.

8. Fediukov Iu.A., Foshkina S.V. Osobennosti primeneniia riadov Fur'e v eksperimental'nykh issledovaniiah [Features of the application of Fourier series in experimental studies]. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika*, 2006, no. 5, pp. 75–79.

9. Gol'dshtein E.I., Radaev E.V. Garmonicheskii analiz tokov (napriazhenii) pri nalichii v nikh intergarmonik i neizvestnom periode rezul'tiruiushchego signala [Harmonic analysis of currents (voltages) in the presence of interharmonics them and an unknown period of the resulting signal]. *Elektrichestvo*, 2009, no. 12, pp. 86–88.

10. Sedunin A.M., Chalov I.A., Sidel'nikov L.G. Amplitudno-chastotnye kharakteristiki chastichnykh razriadov vo vvodakh silovykh transformatorov i voprosy metrologii [Amplitude-frequency characteristics of partial discharges in power transformers and bushings metrology issues]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2011, no. 1, pp. 152–161.

11. Boashash B. Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference. Oxford: Elsevier Science, 2003.

12. Bracewell R.N. The Fourier Transform and Its Applications. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 2000. 236 p.

13. Grafakos L. Classical and Modern Fourier Analysis. Prentice-Hall, 2004. 359 p.

14. Yitzhak Katznelson. An introduction to harmonic analysis. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 255 p.

15. Zygmund A. Trigonometric series. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 276 p.

Об авторе

Чалов Игорь Алексеевич (Пермь, Россия) – ассистент кафедры электрификации и автоматизации горных предприятий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: igorchalov@mail.ru).

About the author

Igor' A. Chalov (Perm, Russian Federation) – assistant lecturer of electrification and automation of mining companies department of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolskiy ave., 29; e-mail: igorchalov@mail.ru).

Получено 05.02.2014