

А.В. Беспрозванных, С.В. Лактионов

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРОВ НИЗКИХ ЧАСТОТ

Сучасні високовольтні системи діагностики об'єктів ємнісного типу за характеристиками часткових розрядів – складні комплекси з маслонаповненим обладнанням. Часткові розряди (ЧР) з уявною амплітудою 1000 пКл вважаються для них припустимими. Керований реактор традиційного виконання з ізоляцією класу 110 кВ неможливо безпосередньо підключити до силового кабелю зі щільною ізоляцією, який випробовується, адже рівень ЧР в ньому не повинен перевищувати 2 пКл. З використанням високовольтного фільтру низьких частот виконується подавлення можливої імпульсної завади. В статті наводяться результати розрахунку частотних характеристик високовольтного фільтру в області частот спектру сигналів ЧР.

Современные высоковольтные системы диагностики объектов емкостного типа по характеристикам частичных разрядов представляют собой сложные комплексы, содержащие маслонаполненное оборудование. Частичные разряды (ЧР) с кажущейся амплитудой 1000 пКл считаются для них вполне допустимыми. Управляемый реактор традиционного исполнения с изоляцией класса 110 кВ нельзя непосредственно подключить к испытываемому силовому кабелю со щитой изоляцией, нормируемый уровень ЧР которого не должен превышать 2 пКл. Подавление возможной импульсной помехи выполняется с использованием высоковольтного фильтра низких частот. В статье приводятся результаты расчета частотных характеристик высоковольтного фильтра в области частот спектра сигналов ЧР.

ВВЕДЕНИЕ

Современные высоковольтные системы диагностики для контроля отсутствия частичных разрядов (ЧР) в кабелях с полимерной изоляцией выполнены по последовательной резонансной схеме, в которой наиболее сложным и дорогим устройством является управляемый реактор [1-4].

В качестве основного варианта силовой части установки выбрана схема с компенсирующим трансформатором и регулируемым реактором, включенным последовательно с объектом испытаний [3]. При высокой добротности емкостного объекта испытаний и соответствующей высокой добротности цепи регулируемого реактора (включая вторичную обмотку компенсирующего трансформатора и индуктивность фильтра низких частот) такая схема позволяет получить существенный выигрыш по суммарной мощности, потребляемой от сети. В момент резонанса мощность компенсирующего трансформатора расходуется только на покрытие тепловых потерь в колебательном контуре. При нештатной ситуации (в случае пробоя объекта испытаний или перекрытия по поверхности муфты) схема выходит из резонанса и ток резко снижается.

Однако управляемые реакторы для компенсации реактивной мощности, трансформаторы возбуждения, изолирующие трансформаторы являются высоковольтным маслонаполненным оборудованием. Традиционные нормы выполнения внешней и внутренней изоляции, принятые практикой конструирования и эксплуатации трансформаторов и реакторов, таковы, что частичные разряды с кажущейся амплитудой около 1000 пКл считаются вполне допустимыми для маслонаполненного высоковольтного оборудования (рис. 1). Нормированные значения амплитуды кажущегося заряда при испытании измерительных и силовых трансформаторов, реакторов, опорных изоляторов и вводов должно находиться в интервале от 10 до 300 пКл [5-6].

На приведенной зависимости амплитуды кажущихся зарядов в изоляции трех фаз автотрансформатора 110/220 кВ от коэффициента регулярности ЧР,

представляющем отношение числа периодов, в которых возникают ЧР определенной амплитуды кажущихся зарядов, к общему числу периодов измерения ЧР, видно, что в изоляции возможно превышение нормируемых значений в 100 раз [5]. Поэтому реактор традиционного исполнения с изоляцией класса 110 кВ нельзя непосредственно подключить к испытываемому кабелю, нормируемый уровень ЧР которого не должен превышать 5 пКл (таблица 1) [7].

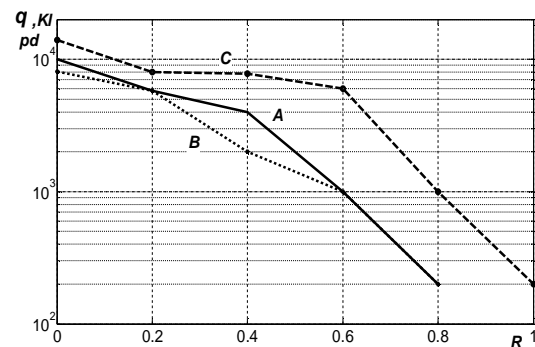


Рис. 1

Таблица 1

Технические требования к кабелям высокого и сверхвысокого напряжения с изоляцией на основе сшитого полиэтилена.

Нормы заводских испытаний

Вид испытаний	ТУ 16-705-495-2006	МЭК 60840	МЭК 62067
	Напряжение измерения (U_0 – рабочее напряжение)		
ЧР, сплошной контроль	$1,5 \cdot U_0$ < 5 пКл	$1,5 \cdot U_0$ < 5 пКл	$1,5 \cdot U_0$ < 10 пКл
Испытание напряжением, сплошной контроль	$2,5 \cdot U_0$ 30 мин	$2,5 \cdot U_0$ 30 мин	$(2-2,5) \cdot U_0$ (30 - 60) мин

Для уменьшения влияния помех, возникающих в управляемом реакторе при развитии в изоляции собственных частичных разрядов, между реактором и объектом контроля необходимо обязательно устанавливать **высоковольтный фильтр низких частот (ВВФНЧ)**. Фильтр должен пропускать гармонику испыта-

тельного напряжения частоты 50 Гц и ослаблять все высокочастотные гармоники, возникающие в реакторе за счет коронирования отдельных элементов его внутренней и внешней изоляции, а также за счет искажений кривой тока вследствие нелинейных свойств ферромагнитного сердечника.

Цель статьи – повышение чувствительности систем диагностики твердой изоляции по характеристикам частичных разрядов с использованием высоковольтных фильтров низкой частоты.

Рекомендации по выбору и расчету ВВ ФНЧ

Разные фирмы – производители высоковольтных установок для испытаний силовых кабелей в качестве ВВ ФНЧ используют реактивные фильтры на основе емкостей и индуктивностей. Так, фирмой High Volt для этой цели использован П-образный С-L-С фильтр третьего порядка, фирмой Hipotronics - фильтр пятого порядка. По-видимому, реактор фирмы Hipotronics отличается более высоким уровнем собственных ЧР, раз для него понадобился фильтр более высокого порядка. Реактор фирмы Siemens имеет более низкий собственный уровень ЧР, поскольку для ВВ ФНЧ понадобился всего простой LCL- фильтр.

На рис. 2 приведена принципиальная схема основной силовой части установки и измерительной цепи системы диагностики: Т1 – регулятор напряжения однофазный (РНО); Т2 – трансформатор, компенсирующий потери энергии в последовательном колебательном контуре, образованном емкостью С3 объекта испытаний и индуктивностью L1 реактора; R1 – эквивалентное активное сопротивление реактора (с учетом потерь в магнитопроводе), С1, С0 – емкостной делитель напряжения; L2, R2 – параметры индуктивности высоковольтного фильтра, уменьшающего сигнал помехи (А) от коронирующей высоковольтной части реактора; R3 – эквивалентное сопротивление потерь в объекте испытаний и соединительных муфтах; Z4 – измерительный импеданс.

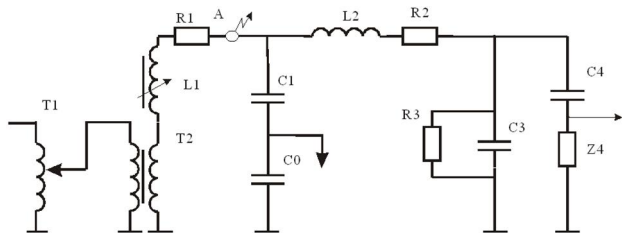


Рис. 2

Однофазные регуляторы напряжения (типа РНО), выполненные по автотрансформаторной схеме со скользящим контактом, также могут быть причиной возникновения искрения при регулировании напряжения.

В высоковольтном фильтре низкой частоты величины емкости и индуктивности могут варьироваться в достаточно широких пределах. При этом обеспечивается подавление возможной импульсной помехи на входе фильтра с зарядом до 1000 пКл при одновременном прохождении на измерительное сопротивление полезного сигнала от заряда величиной 2 пКл. Величина амплитуды кажущегося заряда в 2 пКл принята в качестве нормируемой при испытаниях высоковольтных силовых

кабелей напряжением 110 и 220 кВ со сшитой полиэтиленовой изоляцией ПАТ "Южкабель" [8].

Фильтрация сигнала помехи осуществляется С-L-С фильтром, образованным высоковольтной емкостью С1, индуктивностью L2 и емкостью С3 самого объекта испытаний

Надо отметить, что как со стороны источника сигнала помехи - со стороны реактора, так и со стороны нагрузки фильтра – объекта испытаний и измерительной цепочки – фильтр нагружен на несогласованные частотно-зависимые сопротивления. Поэтому стандартные формулы для расчета полосы пропускания фильтров, нагруженных на согласованные сопротивления, в данном случае не применимы.

Емкость объекта испытаний – бухты кабеля – также можно считать элементом низкочастотного фильтра, учитывая, что собственная индуктивность цепи с кабелем – мала. Для этого кабель должен подключаться "бифилярно" – т.е. так, чтобы цепи прямого и обратного токов пролегали наиболее близко друг от друга. Жила испытываемого кабеля подключается к источнику высокого напряжения, а экран – с этого же края – к заземлению. Аналогично подключается и второй конец кабеля. Подключение кабеля к установке одновременно с двух концов повышает чувствительность измерений ЧР, ведь сигнал последнего сильно затухает при движении по кабелю к соединительной муфте. Недопустимо подключение, при котором емкостной ток кабеля протекает по бухте только в одном направлении, т.е. когда жила подключается с одного края кабеля, а экран – с другого.

Расчет частотных характеристик силовых цепей в области частот до 1 МГц (область спектра сигналов ЧР) связан с проблемами учета паразитных индуктивностей и паразитных емкостей. Поскольку эти величины обычно не нормируются, то точность подобных расчетов может быть относительно невысокой. Поэтому характеристики фильтра следует проектировать с определенным запасом. При этом следует учитывать, например, что чем выше емкость элемента фильтра, тем больше будет ее паразитная индуктивность. Для фильтров требуются малоиндуктивные конденсаторы. Аналогичные предостережения касаются и индуктивностей ВВ ФНЧ: чем больше индуктивность, тем выше ее паразитная емкость. Последняя может свести на нет весь эффект фильтрации высокочастотного сигнала помехи фильтром низких частот.

Для уменьшения паразитных индуктивностей емкостных элементов часто используют параллельное соединение двух емкостей: одна – малоиндуктивная – сравнительно небольшой величины, другая – обычная с требуемой емкостью. Такая комбинация, применяемая в низковольтной технике, не всегда применима на высоком напряжении, так как высоковольтные емкости представляют собой сложные конструктивные элементы.

Для уменьшения паразитных емкостей индуктивных элементов каркасы индуктивностей ВВ ФНЧ следует выполнять из неполярного диэлектрика, а намотку вести с принудительным шагом. Увеличение расстояния между витками приводит к снижению межвитковой емкости.

Анализ результатов расчета ВВ ФНЧ

Представим упрощенную схему резонансной установки в виде последовательно включенного источника ЭДС, индуктивности реактора с потерями, емкости кабеля (рис. 3). Между источником ЭДС и кабелем включен L, C фильтр низких частот.

Зададимся параметрами фильтра по аналогии с известными прототипами [9]. Выполним расчет прохождения через фильтр калибровочного сигнала, который имитирует сигнал помехи.

Для этого источник импульсной ЭДС E_g подключим ко входу ВВ ФНЧ через небольшую емкость $C_g = 100$ пФ. Тогда в цепь вводится калибровочный заряд величиной

$$Q_g = E_g \cdot C_g.$$

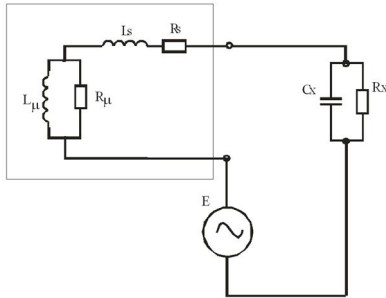


Рис. 3

При калибровочном сигнале помехи в 1000 пКл ЭДС генератора помехи составляет 10 В.

Рассчитаем отклик на измерительном сопротивлении Z4 от полезного сигнала, который имитируем, подключая генератор E_g непосредственно к измерительной цепочке.

Уровень информационного калибровочного сигнала выберем равным 2 пКл, т.е. ЭДС генератора полезного сигнала равна 20 мВ.

Качество фильтрации будем считать удовлетворительным, если соотношение сигнал/помеха будет значительно выше 1.

На рис. 3 показана форма калибровочного сигнала треугольной формы, вводимого в начало ВВ ФНЧ и используемого для имитации помехи амплитудой 10 В длительностью 0,5 мкс. Сигнал смещен на 1 мкс по отношению к моменту начала отсчета. Период следования калибровочного сигнала равен 5 мкс.

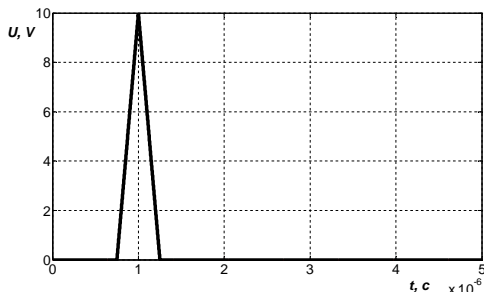


Рис. 4

Амплитудный и фазовый спектры калибровочного сигнала приведены на рис. 5 и рис. 6 соответственно. По горизонтали – номер k -й гармоники, по вертикали – амплитуда k -й гармоники для сигнала, приве-

денного на рис. 4. Частота первой гармоники равна 200 кГц при длительности сигнала 5 мкс. Для фазового спектра калибровочного сигнала: по горизонтали – номер гармоники, по вертикали – ее начальная фаза.

Как видно из рис. 5., энергия данного калибровочного сигнала сосредоточена, в основном, в первых 20 гармониках: в полосе частот от 200 кГц до 4 МГц.

Искажения фазовых спектров сигналов помех при прохождении их через ВВ ФНЧ незначительны для оценки помехоподавляющих свойств фильтра.

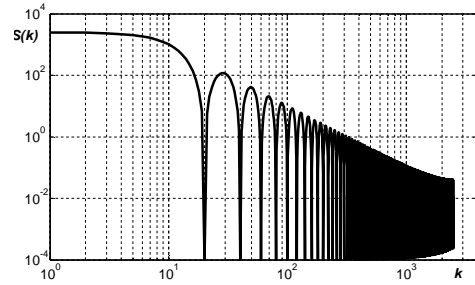


Рис. 5

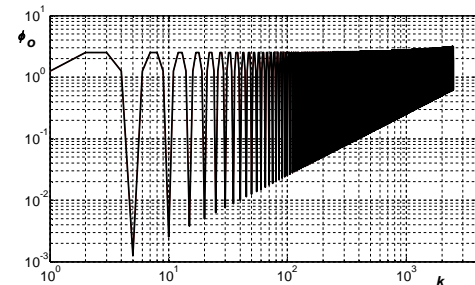


Рис. 6

Фазовая характеристика идеальной линии связи (без потерь электромагнитной энергии) – прямая линия: фазовые сдвиги должны быть пропорциональны номеру гармоники, чтобы соотношение между начальными фазами гармоник сохранилось неизменным.

Как видно из рис. 6, фазовый спектр сигнала – неубывающая функция частоты, в отличие от амплитудного спектра рис. 5. Любой ВВ ФНЧ вызовет сильные фазовые искажения зондирующего сигнала, из-за чего его форма на выходе фильтра может сильно отличаться от исходной.

На рис. 7 в логарифмическом масштабе по вертикали приведены сигналы на измерительном импедансе Z4 от действия импульса помехи (2) и полезного сигнала (1). Из-за этого они мало похожи по форме на зондирующий сигнал, приведенный в равномерном масштабе по вертикали на рис. 4.

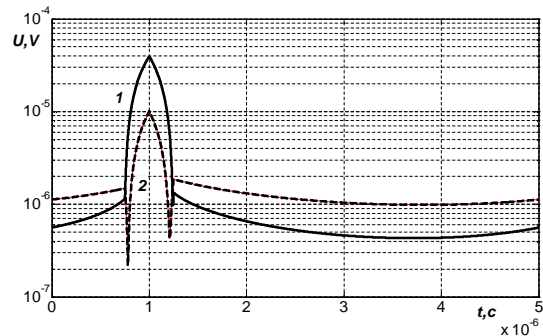


Рис. 7

Как видно из рис. 7, уровень полезного сигнала превышает уровень помехи в 4 раза. Следовательно, рассмотренный ВВ ФНЧ удовлетворяет поставленной задаче, т.е. обеспечивает фильтрацию помехи от работающего высоковольтного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка защитных свойств ФНЧ с учетом действия несогласованных нагрузок на входе и на выходе его проводится путем имитации реальных процессов калибровки. При этом погрешности расчетов, которые могут проявляться из-за высокого порядка реактивности рассматриваемых схем (в данном расчете число реактивных элементов равно 5), компенсируются: рассматривается не абсолютный уровень выходного сигнала, а по отношению к аналогичному сигналу (рис. 7), но поданному в другую точку схемы.

Таким образом, высоковольтный фильтр низких частот в системе диагностики твердой изоляции по характеристикам частичных разрядов должен иметь уровень собственных ЧР – не более 2 пКл, ослабление – не менее 40 дБ в диапазоне частот от 15 до 500 кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурин А.Г., Беспровзванных А.В., Набока Г.Б., Набока Б.Г. Возбуждение резонансных колебаний в бухтах кабелей для оценки состояния изоляции // Сборник научных трудов ХГПУ "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". – Харьков: ХГПУ. – 2001.
2. Набока Б.Г., Нечаус А.А., Лактионов С.В. Оценка уровня частичных разрядов в системе емкостей трехфазного трансформатора // Вісник НТУ "ХПИ". – 2003. – № 9. – Т.2. – С. 124-129.
3. Резонансний пристрій контролю часткових розрядів. Деклараційний патент України № u 2007 11370 від 15.10.2007 / Набока Б.Г., Гурин А.Г., Кононов Б.Т., Нечаус А.А., Лактионов С.В.
4. Набока Б.Г., Гурин А.Г., Лактионов С.В., Золотарев В.М., Нечаус А.А. Обоснование допустимых режимов эксплуатации резонансных установок для диагностики кабелей // Вісник НТУ "ХПИ". – 2005. – № 42. – С. 86-93.
5. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск, "Наука". – 2008. – 150 с.
6. Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – 6-е изд., с изм. и доп. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2004.
7. Мещанов Г.И., Кабели на напряжение 10-500 кВ: состояние и перспективы развития (анализ, прогноз, исследование) / Шувалов М.Ю., Каменский М.К., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л. // Кабели и провода. – № 5 (312). – 2008.
8. Силовые кабели среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена / Каталог. Закрытое акционерное общество "Завод Южкабель".
9. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. – М.: Мир, 1990. – 256 с.

Bibliography (transliterated): 1. Gurin A.G., Besprozvannyh A.V., Naboka G.B., Naboka B.G. Vozbuzhdenie rezonansnyh kolebanij v buhtah kabelej dlya ocenki sostoyaniya izolyacii // Sbornik nauchnyh trudov HGPU "Informacionnye tehnologii: nauka, tehnika, tehnologiya, obrazovanie, zdorov'e". - Harkov: HGPU. - 2001. 2. Naboka B.G., Nechaus A.A., Laktionov S.V. Ocenka urovnya chastichnyh razryadov v sisteme emkostej trehfaznogo transformatora // Visnik NTU "HPI". - 2003. - № 9. - Т.2. - С. 124-129. 3. Rezonansnij pristrrij kontrolyu chastkovih rozryadiv. Deklaracijnij patent Ukraini № u 2007 11370 vid 15.10.2007 / Naboka B.G., Gurin A.G., Kononov B.T., Nechaus A.A., Laktionov S.V. 4. Naboka B.G., Gurin A.G., Laktionov S.V., Zolotarev V.M., Nechaus A.A. Obosnovanie dopustimyh rezhimov `ekspluatacii rezonansnyh ustanovok dlya diagnostiki kabelej // Visnik NTU "HPI". - 2005. - № 42. - С. 86-93. 5. Vdoviko V.P. Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniya. - Novosibirsk, "Nauka". - 2008. - 150 s. 6. Ob`em i normy ispytaniy `elektrooborudovaniya / Pod obsch. red. B.A. Alekseeva, F.L. Kogana, L.G. Mamikon-yanca. - 6-e izd., s izm. i dop. - M.: Izd-vo NC `ENAS, 2004. 7. Meshchanov G.I., Kabeli na napryazhenie 10-500 kV: sostoyanie i perspektivy razvitiya (analiz, prognoz, issledovaniya) / Shuvалov M.Yu., Kamenskij M.K., Obrazcov Yu.V., Ovsienko V.L. // Kabeli i provoda. - № 5 (312). - 2008. 8. Silovye kabeli srednego i vysokogo napryazheniya s izolyaciej iz sshitogo poli`etilena / Katalog. Zakrytoe akcioner-noe obschestvo "Zavod Yuzhkabel". 9. Red `E. Spravochnoe posobie po vysokochastotnoj shemotehnike. - M.: Mir, 1990. - 256 s.

Поступила 25.09.2012

Безпровзванных Ганна Вікторова, д.т.н., проф.,
Лактионов С.В.

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
кафедра електроізоляційної та кабельної техніки
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
тел. (057) 70-76-10, e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

Bezprozvannyh A.V., Laktionov S.V.

Sensitivity enhancement of a high-voltage power cables partial-discharge-characteristics-based diagnostics system by means of low-pass filters.

Modern high-voltage systems of capacitive objects diagnostics through partial discharge characteristics are sophisticated complexes containing oil-filled equipment. For them, partial discharges (PD) with apparent amplitude of 1000 pC are considered quite admissible. A controlled conventional-configuration reactor with 110 kV-class insulation cannot be directly connected to a tested power cable with cross-linked insulation and rated PD level not exceeding 2 pC. Suppression of probable pulse noise is carried out by means of a high-voltage low-pass filter application. In the article, results of a high-voltage filter frequency characteristics calculation in the frequency range of the PD signal spectrum are presented.

Key words – controlled reactor, partial discharges, power cable with the cross-linked insulation, high-voltage low-pass filter, signal spectrum.