

05.26.01
К 716

Контрольный
экземпляр
На правах рукописи

Косф

Косорова Юлия Викторовна

**ПАРАМЕТРЫ ИЗОЛЯЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6, 10 кВ
И ОРГАНИЗАЦИЯ ИХ КОНТРОЛЯ**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

кл

Челябинск

2005

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Сидоров А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кузнецов К.Б.,
доктор технических наук
Кравчук И.Л.


Ведущее предприятие – ОАО «Челябэнерго»

Защита состоится 29 сентября 2005 г., в 10 часов, в ауд. 1001 на заседании
диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском государственном
университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.
Факс (3512) 67-94-49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан 22 августа 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.С.Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Надежность и безопасность эксплуатации распределительных электрических сетей во многом определяются состоянием изоляции этих сетей. Одним из способов поддержания изоляции на должном уровне является ее непрерывный контроль, обеспечивающий предотвращение электроопасных ситуаций путем исключения появления напряжения на металлических нетоковедущих частях.

Анализ аварийных ситуаций показывает, что около 60 % всех отключений и связанных с этим перерывов в электроснабжении вызывается снижением уровня сопротивления изоляции, приводящим, в конечном счете, к ее пробую.

Большинство известных методов непрерывного контроля изоляции обладают серьезными недостатками, ограничивающими их применение:

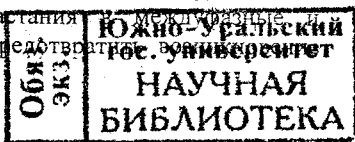
- ряд используемых в настоящее время методов не определяют величину сопротивления изоляции, а лишь фиксируют ее резкое снижение (метод трех вольтметров);
- все известные методы не обладают селективностью действия;
- для реализации каждого из этих методов требуется установка дополнительного высоковольтного оборудования;
- использование в некоторых методах оперативного тока ухудшает качество электроэнергии, поставляемой потребителям.

Кроме того, все существующие методы и средства непрерывного контроля изоляции практически четко фиксируют и контролируют лишь замыкания фазы на землю. Они не позволяют выявлять намечившиеся процессы электрического старения изоляции и, тем самым, прогнозировать возможность возникновения аварийной ситуации (пробоя изоляции), приводящей к появлению опасных напряжений прикосновения и шага и нарушающей бесперебойность электроснабжения.

Следует отметить, что, в определенной степени, такое положение обусловлено отсутствием систематизированных данных о параметрах изоляции сети относительно земли. Это, а также невозможность регламентирования параметров изоляции сети относительно земли, например, на единицу длины, привели к тому, что для сетей 6, 10 кВ в настоящее время нет методики расчета уставок для систем контроля изоляции.

Разработанный в Южно-Уральском государственном университете способ контроля изоляции, основанный на измерении режимных параметров сети, во многом свободен от отмеченных выше недостатков. Однако его реализация в виде отдельной системы затруднительна по причинам экономического характера. Кроме того, установленные ранее зависимости нуждаются в корректировке при наличии в сети отпайки.

Поэтому обеспечение непрерывного контроля состояния изоляции остается актуальной задачей и сегодня. Своевременное обнаружение и устранение дефектов изоляции до их перерастания в многоместные замыкания на землю позволит предотвратить



электроопасных ситуаций и обеспечит бесперебойное питание потребителей электроэнергией.

Работа поддержана грантом по программе научного творчества молодежи в вузах Челябинской области, осуществляемой Министерством образования и науки РФ и Администрацией Челябинской области.

Работа выполнена в соответствии с перечнем приоритетных направлений развития науки, технологий и техники на период до 2010 года.

Цель работы – улучшение условий электробезопасности в распределительных электрических сетях напряжением 6, 10 кВ.

Идея работы – на основании исследования параметров изоляции фаз сети относительно земли разработать методику определения уставки для систем контроля изоляции, что позволит реализовать способ контроля изоляции по режимным параметрам в одном из блоков, входящих в систему управления электроснабжением любого объекта.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. В сетях напряжением 6, 10 кВ распределение параметров изоляции фаз сети относительно земли подчиняется логнормальному закону независимо от конфигурации и принадлежности сети.

2. Для определения проводимости сети относительно земли при наличии в ней отпаек достаточно измерить режимные параметры в начале и конце главной линии, а также в конце отпаечной линии.

3. Методика, позволяющая определять уставку для любой системы контроля изоляции в любой распределительной электрической сети напряжением 6, 10 кВ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ электротехники, корректным использованием аппарата математической статистики и теории нечетких множеств, удовлетворительным совпадением результатов аналитических исследований со статистическими данными.

Значение работы. **Научное значение работы** заключается в том, что:
– установлены уровни сопротивления изоляции фаз относительно земли в распределительных электрических сетях разной принадлежности (промышленных предприятий, городских, сельских, карьерных);
– показано, что любые схемы электроснабжения, не имеющие отпаек, могут быть развиты на более простые радиальные участки, что позволит осуществлять контроль изоляции по результатам измерения режимных параметров отдельных участков;
– получены и исследованы аналитические зависимости, позволяющие определять проводимости изоляции относительно земли по результатам измерения режимных параметров в распределительных электрических сетях 6, 10 кВ, содержащих отпаек;
– впервые обосновано, что в системах контроля изоляции для сетей 6, 10 кВ уставка должна быть адаптивной.

Практическое значение работы заключается в следующем:

- разработана методика, позволяющая определять уставку для любой системы контроля изоляции в любой распределительной электрической сети напряжением 6, 10 кВ;
- показана возможность реализации способа контроля изоляции по режимным параметрам на основе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии, которые обладают всеми необходимыми для этого элементами (датчики тока и напряжения, устройства сбора и передачи данных, каналы связи, центр сбора и обработки информации и т.д.).

Реализация выводов и рекомендаций работы:

- полученные аналитические зависимости для определения проводимости изоляции фаз сети относительно земли по режимным параметрам и методика выбора уставки для систем контроля изоляции переданы компании «Эльстер Метроника» для применения в разрабатываемых ими различных автоматизированных системах контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ);
- результаты работы использованы Южно-Уральским государственным университетом в лекционном курсе «Основы электробезопасности» при подготовке студентов электротехнических специальностей, а также специальности 330100 («Безопасность жизнедеятельности в техносфере»).

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы были доложены, рассмотрены и одобрены:

- на восьмой Российской научно-технической конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность» (Санкт-Петербург, 2004 г.);
- на IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии, 2003» (Томск, 2003 г.);
- на трех Всероссийских ежегодных научно-технических конференциях «Наука – Производство – Технологии – Экология» (ВятГУ, Киров, 2002, 2004, 2005 гг.);
- на второй Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (Челябинск, 2003 г.);
- на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (2002...2005 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 172 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков, 20 таблиц, список используемой литературы из 94 наименований и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, основная идея и научные положения, выносимые на защиту, отмечена научная значимость и практическая ценность работы.

Значительный вклад в теоретические и экспериментальные исследования в области контроля изоляции внесли такие ученые, как Белых Б.П., Гладилин Л.В., Колосюк В.П., Лейбов Р.М., Соболев В.Г., Цапенко Е.Ф., Щуцкий В.И., Бендяк Н.А., Заславец Б.И. и др. Однако до настоящего времени проблема контроля изоляции в распределительных электрических сетях 6, 10 кВ не решена в полном объеме.

Электрическая изоляция, являясь одним из основных конструкционных материалов, обеспечивает как надежность и долговечность электрооборудования, так и безопасное потребление электроэнергии. Вместе с тем, статистические исследования надежности изоляции показывают, что она, как элемент изделия, обладает невысокой надежностью.

Одним из способов своевременного обнаружения процесса стойкого ухудшения изоляции с целью предотвращения пробоя и последующих однофазных замыканий на землю, переходящих в междуфазные и многоместные замыкания на землю, является контроль изоляции.

В работе были подробно рассмотрены все виды контроля изоляции. На основе анализа литературных источников была составлена классификация способов дискретного контроля изоляции без снятия рабочего напряжения с оценкой их достоинств и недостатков.

Основным недостатком всех известных дискретных способов контроля изоляции, перекрывающим все их достоинства, является периодичность контроля, т.е. в промежутках между измерениями сопротивление изоляции может снизиться ниже допустимого уровня, что, в ряде случаев, приводит к пробоям. Такого недостатка лишены способы непрерывного контроля изоляции, которые также были рассмотрены в работе.

Проведенный анализ существующих способов непрерывного контроля изоляции показал, что наиболее перспективным методом определения параметров изоляции является метод, основанный на измерении режимных параметров сети, который не требует подключения дополнительного высоковольтного оборудования, не оказывает влияния на режим работы сети и может использоваться в системах непрерывного контроля состояния изоляции.

Однако отсутствие систематизированных данных о параметрах изоляции фаз сети относительно земли в распределительных электрических сетях 6, 10 кВ, а также методики выбора уставки не позволяло реализовать эффективную систему контроля изоляции, основанную на данном методе, как, впрочем, и на любом другом.

Таким образом, возникает необходимость определения минимально возможного уровня сопротивления изоляции сети относительно земли. В Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) не нормируется величина минимального сопротивления изоляции для распределительных сетей

напряжением 6, 10 кВ. Эта величина зависит от конкретных условий эксплуатации какой-либо сети, от ее протяженности, разветвленности и т.д. Нормативными актами распределительные сети не разделяются по принадлежности к различным отраслям промышленности, но, в силу специфических особенностей, можно выделить следующие виды распределительных электрических сетей: карьерные, городские, сельские и электрические сети промышленных предприятий.

На основе собранных статистических данных по токам однофазного замыкания на землю и протяженности воздушных и кабельных линий в различных сетях, а также результатов собственных исследований был определен уровень изоляции в распределительных электрических сетях разной принадлежности. Под уровнем изоляции понимается полное сопротивление изоляции фаз сети относительно земли. При этом следует заметить, что составляющие полного сопротивления (активная и емкостная) также представляют интерес.

Уровень сопротивления изоляции в городских распределительных электрических сетях был исследован на примере городов разного масштаба: мегаполисов – Москвы и Ленинграда, крупного города – Челябинска и небольшого города – Ханты-Мансийска.

Емкостное сопротивление изоляции фаз сети относительно земли определяли с помощью известных формул.

Активное сопротивление изоляции фаз сети относительно земли определяли при разных значениях коэффициента успокоения d , характерных для выбранных видов сетей. Для сетей, состоящих преимущественно из кабельных линий, коэффициент успокоения d принимается равным 0,03-0,05. Для сетей, состоящих преимущественно из воздушных линий, коэффициент успокоения d принимается равным 0,3-0,5.

На основе полученных данных были построены гистограммы распределения полного сопротивления изоляции фазы сети относительно земли, которые позволили определить вероятностные характеристики полного сопротивления изоляции фазы сети относительно земли, такие как закон распределения и математическое ожидание случайной величины. Одна из построенных гистограмм для городских распределительных сетей Челябинска, Ленинграда и Москвы (при $d=0,03$) приведена на рис. 1. Вид гистограмм свидетельствует о том, что полное сопротивление изоляции фазы сети относительно земли распределяется по логнормальному закону, описываемому плотностью распределения

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp \frac{(\ln x - m)^2}{2\sigma^2}, \quad (1)$$

где m – медиана;

σ – среднее квадратическое отклонение.

Согласие теоретического распределения и статистического было подтверждено с помощью «критерия χ^2 » Пирсона с применением пакета STATISTICA 6.0.

Для указанного закона распределения математическое ожидание M случайной величины $\ln \chi$:

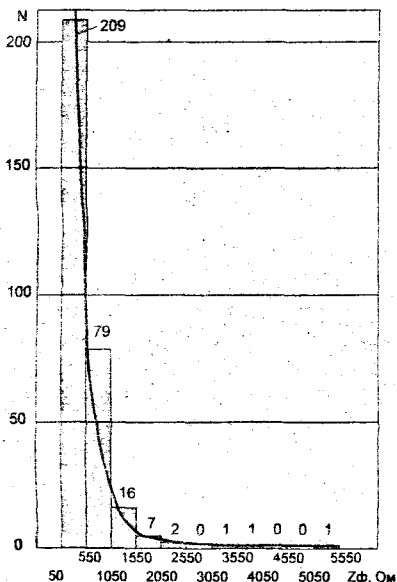


Рис. 1. Гистограмма распределения полного сопротивления изоляции фазы сети относительно земли в городских распределительных сетях Челябинска, Ленинграда и Москвы (при $d=0,03$)

$$M = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \chi_i. \quad (2)$$

Аналогичным образом были определены параметры изоляции и их закон распределения в карьерных, сельских электрических сетях и сетях промышленных предприятий.

Результаты расчета граничных значений параметров изоляции фазы сети относительно земли в распределительных электрических сетях разной принадлежности представлены в табл. 1-7.

Таким образом, при обработке статистического материала было установлено, что полное сопротивление изоляции фазы сети относительно земли в распределительных электрических сетях различной принадлежности подчиняется логнормальному закону распределения случайной величины.

Как показал анализ существующих способов контроля изоляции в распределительных электрических сетях 6, 10 кВ,

наиболее перспективным является метод непрерывного контроля изоляции, основанный на измерении режимных параметров сети, т.е. текущего значения тока, напряжения и угла сдвига между ними. На кафедре «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета были заложены основы данного способа контроля, т.е. разработаны расчетные формулы для определения активной и реактивной составляющих поперечной проводимости изоляции для радиальной схемы линии электропередачи и для участка сети с двусторонним питанием. Кроме того, в указанные формулы были внесены уточнения в случае наличия в сети конденсаторных батарей и синхронных двигателей. Для осуществления измерений в начале и в конце контролируемых участков должны устанавливаться датчики токов и напряжений.

Анализ схем электроснабжения показал, что, несмотря на то, что все виды схем (радиальные, магистральные, смешанные) имеют множество разновидностей и модификаций, любая из них может быть разбита на более простые радиальные участки. В этом случае осуществление контроля изоляции

Результаты расчета граничных значений параметров изоляции фазы сети относительно земли в городских распределительных электрических сетях

Принадлежность городских электрических сетей	Количество исследуемых сетей	Значения параметров изоляции фазы сети относительно земли в рассматриваемых сетях												
		$R_{фmin} / R_{фmax}$ Ом, при d, равном					$Z_{фmin} / Z_{фmax}$ Ом, при d, равном							
		0,03	0,04	0,05	0,3	0,4	0,5	$X_{фmin} / X_{фmax}$ Ом	0,03	0,04	0,05	0,3	0,4	0,5
Москва	219	3620	2720	2170	—	—	—	108,7	108,66	108,62	108,57	—	—	—
Ленинград	51	173210	129900	103920	—	—	—	5196,2	5193,8	5192	5189,7	—	—	—
Челябинск	46	2180	1630	1300	—	—	—	65,4	65,33	65,31	65,28	—	—	—
Ханты-Мансийск	10	28560	25140	20140	—	—	—	1000	999,5	999,2	998,8	—	—	—
		3640	2730	2200	—	—	—	109,4	109,35	109,31	109,26	—	—	—
		125900	94400	75500	—	—	—	3791,3	3789,6	3788,3	3786,6	—	—	—
		—	—	—	8920	5000	5350	2680	—	—	—	2566,7	2487,8	2396,2
		—	—	—	241270	180930	144760	72380	—	—	—	69327,6	67202,1	64738,6

Таблица 2

Результаты расчета параметров изоляции фазы сети относительно земли в карьерных распределительных электрических сетях предприятий Минуглепрома

Горнопромышленный район (сети угольных разрезов)	U_m кВ	I_n , А	$R_{ф}$ Ом, при d, равном			$C_{ф}$ мкФ	$X_{ф}$ Ом	$Z_{ф}$ Ом, при d, равном		
			0,3	0,4	0,5			0,3	0,4	0,5
Восточная Сибирь	6	До 12	2869,1-4246,3	2151,8-3184,7	1721,5-2547,8	2,5-3,7	860,7-1273,9	824,4-1220,2	799,1-1182,8	769,8-1139,4
Урал	6	До 6-8	4246,3	3184,7	2547,8	2,5	1273,9	1220,2	1182,8	1139,4
Забайкалье	6	До 1	1415,4-5897,6	1061,6-4423,2	849,3-3538,6	1,8-7,5	424,6-1769,3	406,7-1694,7	394,2-1642,8	379,8-1582,5
Казахстан (Экибастуз)	6	5,5-14	2468,8-6244,5	1851,6-4683,4	1481,3-3746,7	1,7-4,3	740,6-1873,4	709,4-1794,4	687,6-1739,4	662,4-1675,6
Кузбасс	6	До 15	2307,8	1730,8	1384,7	4,6	692,3	663,1	642,8	619,2

Результаты расчета параметров изоляции фазы сети относительно земли
в карьерных распределительных электрических сетях предприятий Минцметмета

Горнопромышленный район (карьеры)	U _н , кВ	I _с , А	R _ф , Ом, при d, равном			C _ф , мкФ	X _ф , Ом	Z _ф , Ом, при d, равном		
			0,3	0,4	0,5			0,3	0,4	0,5
Ждановский ГОК	6	0,65-2,4	15165,3-53078,6	11374-39808,9	9099,2-31847,1	0,2-0,7	4549,6-1923,6	4357,7-15252	4224,2-14784,7	4069,3-14242,5
Джезказганский ГМК	6	2,7-8,2	5055,1-16850,3	3791,3-12637,8	3033,1-10110,2	0,63-2,1	1516,5-5035,1	1452,5-4841,9	1408-4693,5	1356,4-4521,4
Балхашский ГМК	6	0,3-2,9	6761,6-18624,1	5071,2-13968	4057-11174,4	0,57-1,37	2028,5-5587,2	1942,9-5351,6	1883,4-5187,6	1814,3-4997,3

Результаты расчета параметров изоляции фазы сети относительно земли
в карьерных распределительных электрических сетях предприятий Минчермета

Горнопромышленный район	U _н , кВ	I _с , А	R _ф , Ом, при d, равном			C _ф , мкФ	X _ф , Ом	Z _ф , Ом, при d, равном		
			0,3	0,4	0,5			0,3	0,4	0,5
Михайловский ГОК	6	Более 2,0	17402,8	13052,1	10441,7	0,61	3220,8	5000,6	4847,4	4669,6
Икпүүлүк ГОК	6	До 17	2041,5	1531,1	1224,9	5,2	612,4	586,6	568,6	547,8
Южный ГОК	6	2,5-5,8	5963,9-13786,6	4472,9-10340	3578,3-8272	0,77-1,78	1789,2-4136	1713,7-3961,6	1661,2-3840,2	1600,3-3699,4
Северный ГОК	6	1,5-7,5	4615,5-23077,6	3461,6-17308,2	2769,3-13846,6	0,46-2,3	1384,7-6923,3	1326,3-6631,3	1285,7-6428,1	1238,5-6192,4
Центральный ГОК	6	3-5	6938,4-11538,8	5203,8-8654,1	4163-6923,3	0,92-1,53	2081,5-3461,6	1993,7-3315,6	1932,6-3214	1861,8-3096,2
Маргалакский бассейн	6	0,9-11,5	3015,8-37913,3	2261,9-28434,9	1809,5-22748	0,28-3,32	904,7-11374	866,5-10894,3	840-10560,5	809,2-10173,2
Камыш-Бурунский ЖРК	6	12,1-23,8	1450-1700			3,7-7,3	436,3-860,7		417,8-767,9	

Результаты расчета параметров изоляции фазы сети относительно земли
в карьерных распределительных электрических сетях объединения «Южуралнеруд»

Предприятие	U _н , кВ	I _с , А	C _ф , мкФ	R _ф , Ом, при d, равном			X _ф , Ом	Z _ф , Ом, при d, равном		
				0,2	0,3	0,4		0,2	0,3	0,4
Южуралнеруд	6	0,22-4,5	0,07-1,38	2309,4-47237,7	11547-236188,8	7698-157459,2	5773,5-118094,4	2264,6-46320,4	2212-45245,6	2144,2-43859,2

Таблица 6

Результаты расчета граничных значений параметров изоляции фазы сети относительно земли
в сельских распределительных электрических сетях

Принадлежность сельских электрических сетей	Количество исследованных сетей	Значения параметров изоляции фаз сети относительно земли в рассматриваемых сетях						
		$R_{\text{фmin}} / R_{\text{фmax}}$ Ом, при d, равном			$\frac{X_{\text{фmin}}}{X_{\text{фmax}}}$ Ом	$Z_{\text{фmin}} / Z_{\text{фmax}}$ Ом, при d, равном		
		0,3	0,4	0,5		0,3	0,4	0,5
Златоустовские	16	8617,2	6462,9	5170,3	2585,2	2476,1	2400,3	2312,2
		577350,3	433012,7	346410,2	173205,1	165900,4	160816,9	154919,3
Курганские	75	8617,2	6462,9	5170,3	2585,2	2476,1	2400,3	2312,2
		88823,1	66617,3	53293,9	26646,9	25523,1	24741,1	23833,7
Магнитогорские	31	2771,3	2078,5	1662,8	831,4	796,3	771,9	743,6
		131216	98412	78729,6	39364,8	37704,6	36549,3	35208,9
Троицкие	37	9140,1	6855,1	5484,1	2742	2626,4	2545,9	2452,6
		70408,6	52806,4	42245,1	21122,6	20231,8	19611,8	18892,6
Шадринские	42	8108,9	6081,6	4865,3	2432,7	2330,1	2258,7	2175,8
		288675,1	216506,4	173205,1	86602,5	82950,2	80408,4	77459,7

Таблица 7

Результаты расчета граничных значений параметров изоляции фазы сети относительно земли
в распределительных электрических сетях промышленных предприятий

Принадлежность электрических сетей	Количество исследованных сетей	Значения параметров изоляции фаз сети относительно земли в рассматриваемых сетях						
		$R_{\text{фmin}} / R_{\text{фmax}}$ Ом, при d, равном			$\frac{X_{\text{фmin}}}{X_{\text{фmax}}}$ Ом	$Z_{\text{фmin}} / Z_{\text{фmax}}$ Ом, при d, равном		
		0,03	0,04	0,05		0,03	0,04	0,05
Металлургические предприятия	46	5551,4	4163,6	3330,9	166,5	166,5	166,4	166,3
		4330127	3247595	2598076	129903,8	129845,4	129800	129741,7
Машиностроительные предприятия	32	19245	14433,8	11547	577,4	577,1	576,9	576,6
		192450,1	144337,6	115470,1	5773,5	5770,9	5768,9	5766,3

путем измерения режимных параметров отдельных участков не вызывает затруднений.

Сложности возникают при использовании данного способа в линиях с отпайками, которые распространены, как правило, в сельских и встречаются в городских сетях. Возникает вопрос о местах установки измерительных приборов. В месте присоединения отпайки невозможно подключить датчики по причине недоступности их для посторонних лиц и подверженности атмосферным воздействиям. Поэтому в данном случае необходимо искать другой подход. Для определения параметров изоляции в таких сетях недостаточно измерять параметры режима только в начале и в конце главной линии. Предлагается дополнительно измерять параметры режима в конце отпаечной линии. Таким образом, возникла необходимость модификации полученных ранее формул для определения параметров изоляции в распределительных электрических сетях, имеющих отпайки.

Для расчета выделяли одну фазу, П-образная схема замещения которой представлена на рис. 2.

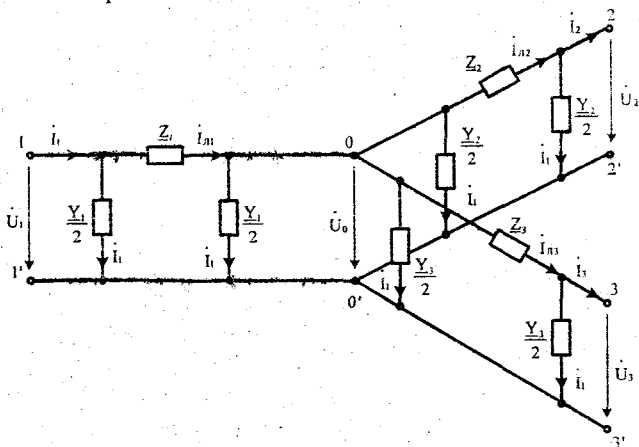


Рис. 2. П-образная схема замещения участка сети с отпайкой для одной фазы

Для участка сети с отпайкой считали заданными следующие параметры:

- 1) продольное комплексное сопротивление \underline{Z} главной линии;
- 2) продольное комплексное сопротивление \underline{Z}_2 отпаечной линии;
- 3) относительная длина k первого (головного) участка главной линии.

Главная линия длиной l делится местом присоединения отпайки на две части: l_1 и $(l-l_1)$. Относительная длина $k=l_1/l$. Соответственно, сопротивление \underline{Z} линии делится на две части: сопротивление первого участка линии $\underline{Z}_1=k\underline{Z}$ и сопротивление второго участка $\underline{Z}_2=(1-k)\underline{Z}$. Аналогично и проводимость \underline{Y} линии по отношению к земле делится на две части: $\underline{Y}_1=k\underline{Y}$ и $\underline{Y}_2=(1-k)\underline{Y}$.

Измеряемыми параметрами режима в данном случае являются:

- 1) линейные (U_{ab2} , U_{bc2} , U_{ca2}) и фазные (U_{a2} , U_{b2} , U_{c2}) напряжения в конце

главной линии;

2) линейные ($U_{ab3}, U_{bc3}, U_{ca3}$) и фазные (U_{a3}, U_{b3}, U_{c3}) напряжения в конце отпаечной линии;

3) фазные напряжения (U_A, U_B, U_C) и токи фаз (I_A, I_B, I_C) в начале главной линии;

4) токи фаз (I_{a2}, I_{b2}, I_{c2}) в конце главной линии;

5) токи фаз (I_{a3}, I_{b3}, I_{c3}) в конце отпаечной линии;

6) углы сдвига фаз между напряжением и током в начале главной линии (φ_1), в конце главной линии (φ_2) и в конце отпаечной линии (φ_3).

Начальную фазу напряжения в начале линии \dot{U}_1 принимали равной нулю, поэтому $\dot{U}_1 = U_1$, напряжение в конце главной линии $\dot{U}_2 = U_2 \cdot e^{j\psi_2}$, напряжение в конце отпаечной линии $\dot{U}_3 = U_3 \cdot e^{j\psi_3}$, где ψ_2 и ψ_3 – углы сдвига между напряжением в начале главной линии и, соответственно, в концах главной и отпаечной линий. Углы ψ_2 и ψ_3 также подлежали определению.

В результате аналитического исследования были получены следующие зависимости для определения проводимостей изоляции относительно земли главной \underline{Y} и отпаечной \underline{Y}_3 линий в распределительных электрических сетях 6, 10 кВ, содержащих отпайки:

$$\underline{Y} = 2 \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2 e^{j\psi_2}}{\dot{W}_2 e^{j\psi_2} - \dot{W}_1}; \quad (3) \quad \underline{Y}_3 = 2 \frac{\dot{W}_1 \left(\dot{V}_1 - \dot{V}_2 e^{j\psi_2} \right)}{\dot{W}_3 e^{j\psi_3} \left(\dot{W}_2 e^{j\psi_2} - \dot{W}_1 \right)} + 2 \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_3 e^{j\psi_3}}{\dot{W}_3 e^{j\psi_3}} \quad (4)$$

Вспомогательные величины $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3, \dot{W}_1, \dot{W}_2, \dot{W}_3$ определяются следующим образом:

$$\dot{V}_1 = U_1 - \underline{Z}_1 \dot{I}_1; \quad (5) \quad \dot{W}_1 = k \underline{Z}_1 U_1; \quad (8)$$

$$\dot{V}_2 = U_2 + \underline{Z}_2 \dot{I}_2; \quad (6) \quad \dot{W}_2 = (1 - k) \underline{Z}_2 U_2; \quad (9)$$

$$\dot{V}_3 = U_3 + \underline{Z}_3 \dot{I}_3; \quad (7) \quad \dot{W}_3 = \underline{Z}_3 U_3. \quad (10)$$

$$\text{где } \dot{I}_2 = I_2 e^{-j\varphi_2}, \quad \dot{I}_3 = I_3 e^{-j\varphi_3}.$$

Для нахождения углов ψ_2 и ψ_3 необходимо решить следующую систему уравнений (например, в пакете Mathcad методом минимизации среднеквадратичной погрешности):

$$\operatorname{Re}[\underline{M}_1 \cdot e^{j(2\psi_2)} + \underline{M}_2 \cdot e^{j(\psi_2 + \psi_3)} + \underline{M}_3 \cdot e^{j\psi_2} + \underline{M}_4 \cdot e^{j\psi_3} + \underline{M}_5 \cdot e^{j(\psi_2 - \psi_3)} + \underline{M}_6 + \underline{M}_7 \cdot e^{j(\psi_3 - \psi_2)} + \underline{M}_8 \cdot e^{-j\psi_2}] = 0; \quad (11)$$

$$\operatorname{Im}[\underline{M}_1 \cdot e^{j(2\psi_2)} + \underline{M}_2 \cdot e^{j(\psi_2 + \psi_3)} + \underline{M}_3 \cdot e^{j\psi_2} + \underline{M}_4 \cdot e^{j\psi_3} + \underline{M}_5 \cdot e^{j(\psi_2 - \psi_3)} + \underline{M}_6 + \underline{M}_7 \cdot e^{j(\psi_3 - \psi_2)} + \underline{M}_8 \cdot e^{-j\psi_2}] = 0, \quad (12)$$

где $\underline{M}_1, \underline{M}_2, \underline{M}_3, \underline{M}_4, \underline{M}_5, \underline{M}_6, \underline{M}_7, \underline{M}_8$ – коэффициенты, определяемые следующим

образом:

$$\underline{M}_1 = -\frac{\dot{W}_2^2 \dot{W}_3 U_2}{(1-k)\underline{Z}}; \quad (13) \quad \underline{M}_5 = \left(\dot{V}_2 \dot{W}_1 - \dot{V}_1 \dot{W}_2 \right)^2; \quad (16)$$

$$\underline{M}_2 = -\dot{W}_2^2 \dot{W}_3 \frac{U_3}{\underline{Z}_3}; \quad (14) \quad \underline{M}_7 = -\dot{W}_1^2 \dot{W}_3 \frac{U_3}{\underline{Z}_3}; \quad (17)$$

$$\underline{M}_4 = 2 \dot{W}_1 \dot{W}_2 \dot{W}_3 \frac{U_3}{\underline{Z}_3}; \quad (15) \quad \underline{M}_8 = -\dot{W}_1^2 \dot{W}_3 \frac{U_1}{k\underline{Z}}; \quad (18)$$

$$\underline{M}_3 = \left(\dot{V}_3 \dot{W}_2 + \dot{V}_2 \dot{W}_3 - \dot{W}_2 \dot{W}_3 \underline{Y}_\Sigma \right) \left(\dot{V}_2 \dot{W}_1 - \dot{V}_1 \dot{W}_2 \right) - \frac{\dot{W}_2 \dot{W}_3}{\underline{Z}} \left(\frac{2 \dot{W}_1 U_2}{1-k} - \frac{\dot{W}_2 U_1}{k} \right); \quad (19)$$

$$\underline{M}_6 = 2 \dot{W}_1 \dot{W}_2 \dot{W}_3 \frac{U_1}{k\underline{Z}} - \dot{W}_3 \dot{W}_1^2 \frac{U_2}{(1-k)\underline{Z}} - \left(\dot{V}_1 \dot{W}_3 + \dot{V}_3 \dot{W}_1 - \dot{W}_1 \dot{W}_3 \underline{Y}_\Sigma \right) \left(\dot{V}_2 \dot{W}_1 - \dot{V}_1 \dot{W}_2 \right). \quad (20)$$

Таким образом, для определения параметров изоляции по результатам измерений вычисляются по формулам вспомогательные величины $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3, \dot{W}_1, \dot{W}_2, \dot{W}_3$ и коэффициенты $\underline{M}_1, \underline{M}_2, \dots, \underline{M}_8$. После чего решается система уравнений (11) и (12) с целью определения углов ψ_2 и ψ_3 . Затем по формулам (3) и (4) находятся параметры изоляции.

Погрешности определения параметров изоляции по формулам (3) и (4) могут достигать 100 и более процентов. Это связано с тем, что формулы для определения углов ψ_2 и ψ_3 (11, 12) очень сложные и дают существенное увеличение погрешностей при определении параметров изоляции по формулам (3) и (4). В результате по ним можно определить с достаточной точностью параметры лишь ухудшенной изоляции. Поэтому, если необходимо установить только факт ухудшения изоляции или порядок величины проводимости, то формулы (3) и (4) могут быть использованы для этих целей.

Для получения более точных результатов принимается следующее допущение: на распределение токов утечки в сети оказывает влияние, в основном, суммарная проводимость изоляции, и не влияет распределение этой проводимости по участкам линии. От величины проводимости каждого участка зависят лишь токи утечки через проводимость в конце основной и отпаечной линий.

Из вышесказанного следует, что неточность в распределении суммарной

проводимости \underline{Y}_s между участками линий, которое можно задать с помощью коэффициентов распределения $k_1 = \frac{Y_1}{Y_s}$, $k_2 = \frac{Y_2}{Y_s}$, $k_3 = \frac{Y_3}{Y_s}$, несущественно скажется на величине \underline{Y}_s , определяемой по режимным параметрам.

Преобразовав полученные выше формулы, получаем искомую формулу для определения суммарной проводимости изоляции линии с отпайкой:

$$\left(\frac{Y_s}{2} + \underline{Y}_s\right) \left(\frac{Y_s}{2} \cdot \dot{W}_1 + \dot{V}_1\right) - \frac{U_1}{Z_1} - \frac{U_2}{Z_2} \cdot \frac{\left(\frac{Y_s}{2} \cdot \dot{W}_1 + \dot{V}_1\right)}{\left(\frac{Y_s}{2} \cdot \dot{W}_2 + \dot{V}_2\right)} - \frac{U_3}{Z_3} \cdot \frac{\left(\frac{Y_s}{2} \cdot \dot{W}_1 + \dot{V}_1\right)}{\left(\frac{Y_s}{2} \cdot \dot{W}_3 + \dot{V}_3\right)} = 0. \quad (21)$$

Вспомогательные величины $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3, \dot{W}_1, \dot{W}_2, \dot{W}_3$ определяются следующим образом:

$$\dot{V}_1 = U_1 - Z_1 \dot{I}_1; \quad (22) \quad \dot{W}_1 = k_1 Z_1 U_1; \quad (25)$$

$$\dot{V}_2 = U_2 + Z_2 \dot{I}_2; \quad (23) \quad \dot{W}_2 = k_2 Z_2 U_2; \quad (26)$$

$$\dot{V}_3 = U_3 + Z_3 \dot{I}_3; \quad (24) \quad \dot{W}_3 = k_3 Z_3 U_3. \quad (27)$$

Для нахождения суммарной проводимости изоляции линии с отпайкой данное уравнение решается в пакете Mathcad методом минимизации среднеквадратичной погрешности.

Как видно, при использовании данной формулы нет необходимости определять углы ψ_2 и ψ_3 , в результате чего погрешности определения параметров изоляции значительно уменьшатся.

Для исследования эффективности предложенных расчетных формул, т.е. для определения погрешностей формул, были выполнены численные эксперименты на цифровой модели анализируемого участка сети в пакете Mathcad 2001 Professional.

Анализ погрешностей позволяет сделать следующие выводы:

1. Наиболее точно по предложенным формулам можно определить суммарную проводимость изоляции линии относительно земли, при этом погрешность не превысит 10 %.

2. Наибольшие погрешности наблюдаются при определении с помощью предложенных формул проводимости отпаечной линии, при этом погрешности могут быть более 10 %. Это объясняется тем, что в предложенных формулах не содержится информация о режимных параметрах в месте присоединения отпайки (т.е. в начале отпаечной линии), а используются данные лишь о параметрах режима в конце отпаечной линии.

3. На точность определения параметров изоляции относительно земли участков линии в значительной степени влияет точность определения коэффициентов распределения суммарной проводимости изоляции по участкам линии. Если задавать коэффициенты распределения пропорционально длинам

линий, то проводимости участков линий будут определены с приемлемой для СКИ точностью.

Успешное функционирование различных систем контроля, в т.ч. систем контроля изоляции (СКИ), определяется обоснованностью выбора уставки срабатывания. До настоящего времени наиболее полно выбор уставки был проработан для устройств защитного отключения (УЗО). Применительно к системам контроля изоляции в электрических сетях напряжением 6, 10 кВ этот вопрос практически не рассматривался.

До сих пор, подходы к выбору уставки зависели от режима нейтрали и класса напряжения сети, в которой планируется использовать УЗО.

Анализ отечественных и зарубежных устройств защитного отключения показывает, что на сегодня единая методика выбора уставки отсутствует. Для различных устройств ее значение рекомендуется от 5 до 1000 мА.

В ряде случаев эксплуатационные уровни изоляции сетей заведомо ниже, чем выбранная уставка срабатывания УЗО. Тогда определение уставки по сложившимся методикам приводит к тому, что эксплуатировать защиту и электрические сети оказывается практически невозможным.

Контроль изоляции осуществляется с помощью устройств, которые по своей структуре во многом подобны УЗО. Однако по контролируемым параметрам, методике их определения и защитным функциям они отличаются от УЗО. Следовательно, и принцип выбора уставки для системы контроля изоляции будет иным по сравнению с УЗО. Наиболее характерным для устройств контроля изоляции является то, что при построении их структурной схемы используется зависимость входного сигнала от параметров изоляции сети, а уставка определяется критическим ее значением. В ряде случаев одно и то же устройство может осуществлять и контроль изоляции, и защитное отключение.

Применительно к сетям 6, 10 кВ (в плане контроля изоляции) наиболее проработанным является вопрос выбора уставки для защит от однофазных замыканий на землю, однако для систем контроля изоляции такой подход неприменим.

Отсутствие обоснованной методики выбора уставок для систем контроля изоляции является, в определенной степени, сдерживающим фактором развития и внедрения таких систем. Поэтому обоснование и разработка методики выбора уставок для систем контроля изоляции в сетях напряжением 6, 10 кВ крайне целесообразны.

На основании анализа различных подходов определения уставки для УЗО были сформулированы дополнительные требования к алгоритму выбора уставки в системах контроля изоляции:

- алгоритм не должен содержать требование проведения предварительных измерений сопротивления изоляции сети относительно земли;
- алгоритм должен учитывать конфигурацию сети, т.е. уставка СКИ должна обладать адаптивностью.

При построении алгоритма выбора уставки следует также учитывать причины и характер снижения сопротивления изоляции как на ВЛ, так и в кабельных сетях.

В воздушных электрических сетях более сильно колеблется активная составляющая сопротивления изоляции фаз сети относительно земли, что вызвано прямым воздействием факторов окружающей среды на воздушные ЛЭП. При загрязнении изоляторов, падении провода на крюк изолятора уменьшается именно активная составляющая сопротивления изоляции фаз сети относительно земли. Емкостная составляющая сопротивления в таких сетях меняется незначительно, т.к. длина конкретной линии в процессе ее эксплуатации не изменяется, а стрела провеса проводов в сетях 6, 10 кВ мала из-за относительно небольшого расстояния между опорами ($\approx 50-60$ м) и малого веса самого провода. Однако в таких сетях бывают случаи крена опор, тогда существенно увеличивается стрела провеса проводов, что приводит к снижению емкостного сопротивления изоляции фаз сети относительно земли.

В кабельных электрических сетях более сильно изменяется емкостная составляющая сопротивления изоляции фаз сети относительно земли. Это связано, например, с увлажнением изоляции кабелей. Однако большинство сетей напряжением 6, 10 кВ являются смешанными, т.е. содержат и воздушные, и кабельные линии. Практически во всех распределительных электрических сетях ввод в трансформаторную подстанцию осуществляется через кабельную вставку для защиты трансформатора от грозových перенапряжений (импульсов). Применительно к смешанным электрическим сетям сложно сказать, какая составляющая сопротивления изоляции фаз сети относительно земли изменится более значительно. Всё вышеперечисленное свидетельствует в пользу контроля именно полного сопротивления изоляции фаз сети относительно земли (или полной проводимости изоляции фаз сети относительно земли). Тем самым, не будет необходимости перестраивать алгоритм выбора уставки в зависимости от исполнения сети (воздушная, кабельная, смешанная), что значительно облегчит процедуру выбора уставки персоналом. Кроме того, учет обеих составляющих сопротивления изоляции обеспечит полноту контроля в любой сети.

Следует заметить, что контроль изоляции будет осуществляться в целом для всей сети, а не для каждого присоединения в отдельности. Причина этого кроется в следующем. При идеальном состоянии изоляции токи в начале и конце линии будут равны. При ухудшении изоляции в линии появляется ток утечки, величина которого в случае малой длины линии (например, воздушной) мала. Применяемые в сети трансформаторы тока и приборы контроля имеют класс точности, не обеспечивающий приемлемую точность измерений небольшого тока утечки. Однако при значительном снижении сопротивления изоляции (ниже определенного уровня) можно будет выявить присоединение с поврежденной изоляцией путем последовательного перебора присоединений. Таким образом, в предлагаемом способе заложена возможность обеспечения селективности контроля изоляции.

Сделанные нами предварительные замечания позволили сформировать алгоритм, который включает следующие шаги.

1. Определение принадлежности исследуемой распределительной сети (карьерная, сельская, городская сеть, сеть промышленного предприятия) и типа ее исполнения (воздушная, кабельная, смешанная).

2. Расчет ожидаемого тока однофазного замыкания на землю на основе параметров контролируемой сети: линейного напряжения сети, длин кабельных и (или) воздушных линий, количества силовых трансформаторов, количества высоковольтных двигателей.

3. Расчет емкости сети относительно земли.

4. Расчет емкостной проводимости изоляции фаз сети относительно земли.

5. Расчет активного сопротивления изоляции фаз сети относительно земли с учетом коэффициента успокоения сети d .

6. Расчет активной проводимости изоляции фаз сети относительно земли.

7. Расчет ожидаемой полной проводимости изоляции фаз сети относительно земли.

8. Определение уставки с помощью аппарата теории нечетких множеств.

Данный алгоритм справедлив при нормальной схеме электроснабжения.

Для выполнения условия адаптивности уставки необходимо учитывать конфигурацию сети, т.е. количество присоединений на текущий момент контроля. Таким образом, уставка должна изменяться при подключении или отключении любого количества присоединений. При отключении части присоединений полное сопротивление изоляции сети относительно земли увеличится. Однако это не свидетельствует об улучшении состояния изоляции сети. Такое увеличение вызвано лишь отключением части линий. Прежняя уставка уже не будет являться ориентиром для уровня изоляции оставшихся присоединений.

Для упрощения процедуры выбора уставок на основе предложенного выше алгоритма составлена методика, позволяющая определять уставку для системы контроля изоляции в любой распределительной электрической сети напряжением 6, 10 кВ, и включающая в себя следующие этапы.

1. Определяется принадлежность исследуемой распределительной сети (карьерная, сельская, городская сеть, сеть промышленного предприятия) и тип ее исполнения (воздушная, кабельная, смешанная). От типа исполнения сети будет зависеть коэффициент успокоения сети d .

2. Рассчитывается ожидаемый емкостный ток однофазного замыкания на землю на основе следующей формулы:

$$I_c = U_n \left(\frac{L_k}{10} + \frac{L_g}{350} \right), \text{ A}, \quad (28)$$

где U_n – линейное напряжение сети, кВ;

L_k, L_g – суммарная длина электрически связанных кабельных и воздушных линий, км.

Данная формула дает приближенное значение ожидаемого емкостного тока. Для более точного определения его величины используется другая формула:

$$I_c = 3U_\phi \omega (C_\alpha L_\alpha + C_\kappa L_\kappa + C_\varepsilon N_\varepsilon + C_{mp} N_{mp}) \cdot 10^{-6}, \text{ А.} \quad (29)$$

где U_ϕ – фазное напряжение сети, кВ;

ω – круговая частота напряжения сети, с^{-1} ;

C_α, C_κ – емкость на фазу по отношению к земле 1 км соответственно воздушной и кабельной линий, мкФ;

C_ε, C_{mp} – емкость на фазу по отношению к земле соответственно высоковольтного электродвигателя и силового трансформатора, мкФ;

N_ε, N_{mp} – число подключенных к сети соответственно высоковольтных электродвигателей и силовых трансформаторов.

Учитывая, что в качестве исходных данных используются длины кабельных и воздушных линий, а для более точного определения значения тока желательно учесть емкости и количество трансформаторов и высоковольтных двигателей, ожидаемый емкостный ток однофазного замыкания на землю определяется по комбинированной формуле:

$$I_c = U_\phi \left(\frac{L_\alpha}{350} + \frac{L_\kappa}{10} + \sqrt{3} \omega (C_\varepsilon N_\varepsilon + C_{mp} N_{mp}) \right), \text{ А.} \quad (30)$$

3. Определяется емкость сети относительно земли:

$$C = \frac{\sqrt{3} I_c}{U_\phi \omega}, \text{ мкФ.} \quad (31)$$

4. Рассчитывается емкостная проводимость изоляции фаз сети относительно земли:

$$b_c = \omega C, \text{ См.} \quad (32)$$

5. Рассчитывается активное сопротивление изоляции сети относительно земли R с учетом коэффициента успокоения сети d . При этом для расчета используется верхняя граница (0,05 или 0,5) рекомендуемого выше диапазона d для данного вида сети. т.к. именно при большем значении d будет получено наименьшее значение активного сопротивления изоляции сети:

$$R = \frac{1}{d \cdot \omega \cdot C}, \text{ кОм.} \quad (33)$$

6. Рассчитывается активная проводимость изоляции фаз сети относительно земли:

$$g = \frac{1}{R}, \text{ См.} \quad (34)$$

7. Определяется ожидаемая полная проводимость изоляции фаз сети относительно земли:

$$Y = \sqrt{g^2 + b_c^2}, \text{ См.} \quad (35)$$

8. Расчетная ожидаемая полная проводимость изоляции фаз сети относительно земли является точечной оценкой полной проводимости изоляции фаз сети относительно земли. Представляем ее в виде нечеткого числа с треугольным заданием функции принадлежности $\mu_{\tilde{X}}(x): [0,1] \rightarrow [0,1]$ (рис. 3). Для нечеткого числа \tilde{X} определяем нижнюю X' и верхнюю X'' границы, удовлетворяющие условиям:

$$\begin{aligned} \forall \delta > 0 \quad \mu(X') = 0; \quad \mu(X' - \delta) = 0; \quad \mu(X' + \delta) \neq 0; \\ \forall \delta > 0 \quad \mu(X'') = 0; \quad \mu(X'' - \delta) \neq 0; \quad \mu(X'' + \delta) = 0. \end{aligned} \quad (36)$$

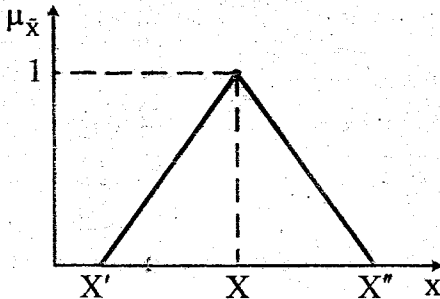


Рис.3. Нечеткое число с треугольным заданием функции принадлежности

X' и X'' рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} X' &= X - \beta(x); \\ X'' &= X + \beta(x), \end{aligned} \quad (37)$$

где $\beta(x)$ определяется в зависимости от разряда младшей значащей цифры числа X .

Пусть q — разряд младшей значащей цифры r_q числа X . Разбивая возможные значения q на классы вычетов по модулю 3, получим классы эквивалентности $M_d, d \in \{0,1,2\}$, где $d \equiv q \pmod{3}$ — остаток от деления q на 3.

На основании статистических исследований определено, что $\forall x \in Z$ из интервала $[0,99]$ значение $\beta(x)$ найдено так, как показано в табл.8.

$$\text{При } X \in M_0: \quad x = r_q \cdot 10; \quad \beta(X) = \beta(x) \cdot 10^{q-2}.$$

При $X \in M_1$:

$$a) r_{q+1} = 0: \quad x = r_q; \quad \beta(X) = \beta(x) \cdot 10^{q-1};$$

$$b) r_{q+1} \neq 0: \quad x = r_{q+1} \cdot 10 + r_q; \quad \beta(X) = \beta(x) \cdot 10^{q-1}.$$

Таблица 8

Значения $\beta(x)$ для двузначных чисел

x	$\beta(x)$
1,2,3,4,6,7,8,9	0,46x
10,20,30,40,60,70,80,90	$(0,357 - 0,00163x)x$
35,45,55,65,75,85,95	$(0,213 - 0,00067x)x$
5	2,8
15	6,45
25	6,75
50	24
Прочие двузначные числа	$\frac{1}{2} \left(\beta \left(\left[\frac{x}{10} \right] \cdot 10 + 5 \right) + \beta \left(x - \left[\frac{x}{10} \right] \cdot 10 \right) \right)$

[...] – целая часть числа.

При $X \in M_2$:

$$a) r_{q+1} = 0: \quad x = r_q \cdot 10; \quad \beta(X) = \beta(x) \cdot 10^{q-2};$$

$$б) r_{q+1} \neq 0: \quad x = r_{q+1} \cdot 10 + r_q; \quad \beta(X) = \beta(x) \cdot 10^{q-1}.$$

Когда X – десятичная дробь, данный алгоритм применяется к мантиссе дроби, а затем учитывается ее порядок.

9. В качестве уставки по проводимости $Y_{\text{уст}}$ принимается верхняя граница нечеткого числа. Если нужна уставка по сопротивлению, то, наоборот, необходимо выбирать нижнюю границу нечеткого числа.

Следует заметить, что чем больше значение точечной оценки, тем больше будет величина $\beta(x)$, т.е. на большую величину нижняя и верхняя границы будут отличаться от значения точечной оценки. Например:

$$- \text{при } K=10 \quad \beta(K) = 3,4;$$

$$- \text{при } K=100 \quad \beta(K) = 34;$$

$$- \text{при } K=1000 \quad \beta(K) = 460;$$

$$- \text{при } K=10000 \quad \beta(K) = 3400.$$

Приведенные выше аналитические выкладки, методика выбора уставок для СКИ предполагают в последующем реализацию подобных СКИ, при этом, на наш взгляд, ориентироваться надо на развитие уже апробированных на практике автоматизированных систем путем расширения их интеллектуальных возможностей.

Организация новой самостоятельной системы требует значительных материальных вложений и трудозатрат. Это связано с необходимостью приобретения и установки дополнительной аппаратуры (например, датчиков тока и напряжения на концах линий), разработки программного обеспечения, организации каналов передачи данных.

С целью исключения подобного недостатка при построении любой

новой системы, в т.ч. и системы контроля изоляции, желательно использовать возможности уже реализованных на практике систем. Применительно к рассматриваемому вопросу такими перспективными системами являются имеющиеся сегодня на рынке автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ).

Проведенный анализ систем АСКУЭ показал, что они обладают практически всеми необходимыми элементами (датчики тока и напряжения, устройства сбора и передачи данных, каналы связи, центр сбора и обработки информации и т.д.) для реализации на их основе способа контроля изоляции по режимным параметрам, т.е. предлагается ввести в системы АСКУЭ дополнительную функцию по контролю изоляции.

Это позволит расширить возможности системы АСКУЭ, полное использовать каналы связи, информировать персонал о состоянии изоляции сети относительно земли, сократить потери организации на выявление и ликвидацию замыканий на землю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, на основе статистических исследований параметров изоляции фаз сети относительно земли в распределительных электрических сетях напряжением 6, 10 кВ, дано новое решение актуальной научно-технической задачи – организации контроля изоляции в этих сетях на основании измерения режимных параметров в составе современных систем управления электроснабжением объектов.

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты и сделать выводы:

1. Установлено, что сопротивление изоляции фаз сети относительно земли в распределительных электрических сетях различной принадлежности (промышленных предприятий, городских, сельских, карьерных) подчиняется логнормальному закону распределения случайной величины.

2. Определены уровни сопротивления изоляции относительно земли в распределительных электрических сетях различной принадлежности. Для сетей промышленных предприятий этот уровень лежит в пределах 166,3-129 845,4 Ом; для городских – 65,28-69 327,6 Ом; для сельских – 743,6-165 900,4 Ом и для карьерных – 325,6-46 320,4 Ом.

3. На основании анализа схем электроснабжения различных объектов показано, что любые схемы электроснабжения, не имеющие отпаек, могут быть разбиты на более простые радиальные участки, что позволит осуществить контроль изоляции по результатам измерения режимных параметров отдельных участков.

4. Проведенные аналитические исследования позволили получить зависимости для определения параметров изоляции фаз сети относительно земли на основании измерения режимных параметров в распределительных электрических сетях 6, 10 кВ, содержащих отпайки.

5. В результате исследования возможностей предложенных формул

путем анализа погрешностей установлено следующее:

- наиболее точно по предложенным формулам можно определить суммарную проводимость изоляции линии относительно земли, при этом погрешность не превысит 10 %;

- наибольшие погрешности наблюдаются при определении с помощью предложенных формул проводимости отпаечной линии, при этом погрешности могут быть более 10 %. Это объясняется тем, что в предложенных формулах не содержится информация о режимных параметрах в месте присоединения отпайки (т.е. в начале отпаечной линии), а используются данные лишь о параметрах режима в конце отпаечной линии;

- на точность определения параметров изоляции относительно земли участков линии в значительной степени влияет точность определения коэффициентов распределения суммарной проводимости изоляции по участкам линии. Если задавать коэффициенты распределения пропорционально длинам линий, то проводимости участков линий будут определены с приемлемой для СКИ точностью.

6. Проанализированы существующие подходы к выбору уставки в сетях различного напряжения с разными режимами нейтрали, в результате чего сформулированы дополнительные требования к алгоритму выбора уставки в сетях 6, 10 кВ:

- методика выбора уставки не должна предусматривать проведение предварительных измерений сопротивления изоляции сети относительно земли;

- уставка СКИ должна быть адаптивной. Для выполнения условия адаптивности уставки необходимо учитывать конфигурацию сети, т.е. количество присоединений на текущий момент контроля. Таким образом, уставка должна изменяться при подключении или отключении любого количества присоединений.

7. С учетом указанных выше дополнительных требований впервые разработана методика, позволяющая определять уставку для любой системы контроля изоляции в любой распределительной электрической сети напряжением 6, 10 кВ.

8. Показана возможность реализации способа контроля изоляции по режимным параметрам на основе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии, которые обладают всеми необходимыми для этого элементами (датчики тока и напряжения, устройства сбора и передачи данных, каналы связи, центр сбора и обработки информации и т.д.).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

1. Сидоров А.И., Петуров В.И., Косорогова Ю.В. Непрерывный контроль изоляции в распределительных электрических сетях// Наука – Производство – Технологии – Экология: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2002. – Т.2. – С. 32.

2. Косоротова Ю.В. Разработка системы непрерывного контроля изоляции в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ// Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: Сборник рефератов научно-исследовательских работ студентов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – С.67–68.
3. Хусаинова Н.А., Косоротова Ю.В. Теоретические основы системы управления состоянием изоляции в распределительных сетях// Наука – Производство – Технологии – Экология: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2003. – Т.5. – С. 150.
4. Косоротова Ю.В. Анализ схем электроснабжения как объекта контроля изоляции// Современная техника и технологии: Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2003. – Т.1. – С. 24–25.
5. Хусаинова Н.А., Косоротова Ю.В. Метод диагностики состояния изоляции электрических распределительных сетей по результатам измерения режимных параметров// Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: Сборник материалов второй Всероссийской научно-практической конференции. – Челябинск: Изд-во ЗАО «Челябинская межрайонная типография», 2003. – С. 81–82.
6. Хусаинова Н.А., Косоротова Ю.В., Сидоров А.И. Определение параметров изоляции линии электропередачи с отпайкой в распределительных сетях по режимным параметрам// Электробезопасность. – 2001. – № 2–3. – С. 9–13.
7. Косоротова Ю.В. Характеристика параметров изоляции в городских распределительных электрических сетях// Электробезопасность. – 2003. – №1. – С. 40–45.
8. Косоротова Ю.В. Общая характеристика сопротивления изоляции относительно земли в распределительных электрических сетях// Электробезопасность. – 2003. – № 2–3. – С. 7–13.
9. Косоротова Ю.В., Хусаинова Н.А., Сидоров А.И. Определение параметров изоляции в разветвленных распределительных электрических сетях на основе измерения режимных параметров// Сборник докладов Восьмой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности ЭМС-2004. – Санкт-Петербург: Изд-во ВИТУ, 2004. – С. 108–111.
10. Косоротова Ю.В. Исследование способа контроля изоляции в разветвленных электрических сетях с помощью цифрового моделирования// Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: Сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – С. 128–129.
11. Косоротова Ю.В. Методика выбора уставок для систем контроля изоляции в электрических сетях 6–35 кВ// Электробезопасность. – 2004. – № 1–2. – С. 14–21.

12. Косоротова Ю.В., Хусаинова Н.А. Обоснование алгоритма выбора уставки для системы контроля изоляции в сетях 6–35 кВ// Наука – Производство – Технологии – Экология: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2005. – Т.6. – С. 63–65.
13. Косоротова Ю. В., Хусаинова Н. А. Анализ зависимостей для определения проводимости изоляции относительно земли в распределительных сетях 6, 10 кВ, содержащих линии с отпайкой, по результатам измерения режимных параметров// Электробезопасность. – 2004. – № 3. – С. 6–15.