

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ СЕТИ

СИВКОВ А.С., ЩЕГЛОВ Л.В., ВЕДЕРНИКОВ Г.А., ПЕТРОВА О.В., ООО «Эльмаш (УЭТМ)»

В связи с развитием топологии электрических сетей, применением современного оборудования, цифровизацией в энергетике и т. д. необходимо менять и подход к выбору трансформаторов тока, которые используются для защиты. При выборе трансформаторов тока для конкретной точки сети недостаточно руководствоваться требованиями действующей нормативно-технической документации, необходимо также учитывать параметры, влияющие на повышение надежности сети. Наиболее актуальная проблема – насыщение сердечников трансформаторов тока (ТТ), которое приводит к появлению тока небаланса дифференциальных защит между насыщенным сердечником и ненасыщенным. Ток небаланса, в свою очередь, может привести как к излишней работе релейной защиты, так и к увеличению времени отключения КЗ (вплоть до отказа релейной защиты). В статье рассматриваются причины и предлагаются решения для ограничения насыщения сердечников трансформаторов тока для защиты.

Основными причинами насыщения сердечников являются наличие:

- остаточной намагниченности;
- апериодической составляющей.

Рассмотрим эти причины подробнее.

НАЛИЧИЕ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ В СЕРДЕЧНИКАХ ОБМОТOK ДЛЯ ЗАЩИТЫ

Современные трансформаторы тока для защиты выполняются на тороидальных сердечниках из стали марки 3408 или ее аналогов. Сталь 3408 обладает малыми магнитными удельными потерями, высокой магнитной индукцией

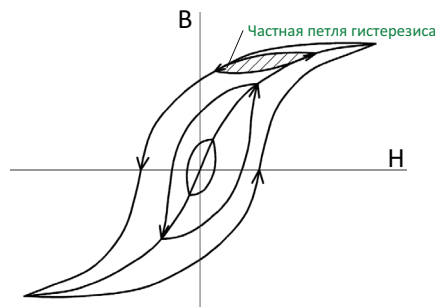


Рис. 1. Работа трансформатора на частной петле гистерезиса

насыщения, около 1,8 Тл и прямоугольной петлей гистерезиса. Такие стали, за счет высокой магнитной проницаемости позволяют достичь требуемых классов точности при оптимальных габаритных размерах, но с другой стороны, из-за

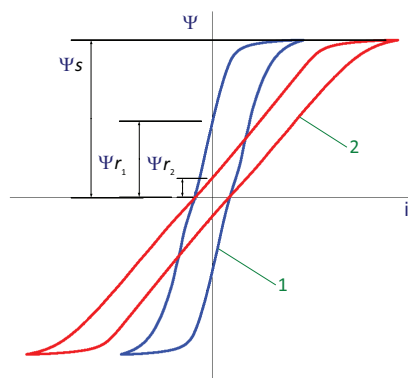


Рис. 2. Кривая намагничивания тороидального сердечника из стали 3408

1 – без ограничения остаточной намагниченности (без применения метода линейризации);

2 – с ограничением остаточной намагниченности (с применением метода линейризации);

Ψ_s – максимальный магнитный поток; Ψ_{r1} – остаточный магнитный поток сердечника без линейризации; Ψ_{r2} – остаточный магнитный поток сердечника с линейризацией

прямоугольности петли гистерезиса обладают высокой остаточной намагниченностью, вплоть до 84–86 % от индукции насыщения (рис. 1)

Применение современных магнитных материалов позволяет изготовителям закладывать в трансформаторах тока для защиты фактическую предельную кратность равной или чуть больше запрашиваемой заказчиком, без учёта дополнительных коэффициентов запаса, добиваясь при этом требуемого класса точности.

Остаточная намагниченность может возникнуть при измерении сопротивления обмотки постоянному току во время испытания, а также при воздействии токов короткого замыкания в процессе эксплуатации ТТ. Высокая остаточная намагниченность приводит к смещению рабочей точки на частный цикл намагничивания. В результате чего, намагниченный сердечник работает на частном цикле петли гистерезиса, а его запас по магнитному потоку до насыщения определяется как отношение максимального магнитного потока Ψ_s к остаточной намагниченности Ψ_r (рис. 2). Так как зна-

чение остаточной намагниченности может достигать 86 % от уровня насыщения, фактически это означает, что даже при незначительном симметричном токе КЗ, трансформатор приходит в состояние насыщения.

Уменьшение остаточной намагниченности Ψr_1 может быть достигнуто изменением конструкции магнитопровода, что дает дополнительный эффект линеаризации кривой намагничивания и соответственно снижению остаточной намагниченности сердечника трансформатора тока до уровня Ψr_2 (рис. 2).

Отделом исследований ООО «Эль-маш (УЭТМ)» была проделана большая работа по изучению остаточной намагниченности и ее изменению с течением времени и (или) изменением нагрузки. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Измерение степени намагниченности производилось путем вычисления потокоцепления через снятые осциллографированием характеристики тока и напряжения на выводах испытуемой обмотки при приложении напряжения от источника постоянного тока с переключением полярности при разомкнутых остальных обмотках. При нулевых начальных условиях интегрирования напряжения остаточная намагниченность на момент начала ее измерения равна сдвигу центра симметрии полученной петли гистерезиса относительно начала координат. Конечное состояние намагниченности в этом опыте дает начальное значение остаточной намагниченности для последующего опыта.

Исследования были проведены в лабораторных условиях на двух образцах трансформаторов тока:

■ образец № 1: встроенный трансформатор тока типа ТВЭ-УЭТМ@-35 $U_{1НОМ} = 35$ кВ, $I_{1НОМ} = 300$ А, $I_{2НОМ} = 5$ А, класс точности 10Р;

■ образец № 2: отдельно стоящий трансформатор тока типа ТРГ-УЭТМ@-220 $U_{1НОМ} = 220$ кВ, $I_{1НОМ} = 2000$ А, $I_{2НОМ} = 1$ А, класс точности 10Р.

По результатам измерений (таблица 1) видно, что начальная остаточная намагниченность сердечника ТТ незначительно уменьшается после протекания первичного тока и слабо зависит от вторичной нагрузки. Таким образом, намагниченный сердечник, например, после измерения сопротивления обмотки или протекания тока короткого

замыкания, останется намагниченным даже после длительного протекания рабочего первичного тока. Распространенное мнение, что рабочие токи нормального режима со временем приводят к размагничиванию сердечника, является неверным.

Не менее большая работа по измерению остаточной намагниченности трансформаторов тока SAS550 (производитель «TRENCH») в условиях эксплуатации на ОРУ 500 кВ Ростовской АЭС была проведена специалистами СО «ЕЭС». $U_{1НОМ} = 550$ кВ, $I_{1НОМ} = 2000$ А, $I_{2НОМ} = 1$ А, класс точности 10Р.

Измерение остаточной намагниченности проводилось снятием вольт-амперных характеристик и определялась остаточная намагниченность сердечников трансформаторов тока в цепях выключателей В-50 и В-60 с применением приборов СТ Analyzer (Omicron) и EZCT 2000 (VANGUARD INSTRUMENT). Результаты исследований приведены в таблице 2.

Из результатов измерения видно, что значение остаточной намагниченности невозможно спрогнозировать в эксплуатации: оно может иметь как положительное, так и отрицательное значение.

НАЛИЧИЕ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ТОКАХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

На магнитный поток в сердечнике и степень его близости к насыщенному состоянию намагниченности большое влияние оказывают значения аперiodической составляющей тока КЗ. Большая величина аперiodической составляющей характерна для сетей вблизи генерирующих станций и потребителей с большой индуктивной нагрузкой.

Необходимо отметить, что аперiodическая составляющая является однополярной и даже небольшое значение при достаточной длительности способно привести к насыщению сердечника трансформатора тока.

Пренебрежение аперiodической составляющей при выборе трансформаторов тока для защиты, особенно вблизи генерирующих станций, где постоянная времени первичной цепи превышает 100 мс, ведет к снижению надежности работы сети и крупным авариям. Следует отметить, что в некоторых случаях могут наблюдаться одновременно оба случая насыщения из-за высокой остаточной намагниченности и наличия аперiodической составляющей.

Таблица 1. Результаты исследований остаточной намагниченности

Тип ТТ	Нагрузка, ВА	Ток первичный, А	Время протекания первичного тока	Намагниченность, в % от потока насыщения		
				Начальная	Остаточная	Изменение
ТВЭ-УЭТМ@-35	10	106,6 95,4 (с интервалами 5–10 мин)	11 с	99	75,46	23,54
			11,2 с			
			11,5 с	-87,1	-78,08	9,02
ТРГ-УЭТМ@-220	27,5	113,4 115,1 112–113 (с интервалами 3–5 мин)	15 мин	84,4	63,48	20,9
			14,4 с	83,3	70,57	12,7
			5 мин	81,1	71,1	10,0
			15 с	84,5	69,9	14,6
			15 с 5 мин 5 мин 10 мин 15 с			
разомкнута	около 50 А с плавным снижением до нуля	20 с	убывающий ток по 1 мин без перерывов	78,6	69,6	9,0
				-82,5	0,13	

Таблица 2. Результаты измерения остаточной намагниченности трансформаторов тока SAS550

№	ТТ в цепи	Фаза	Обмотка	Ост. Намагн.
1	В-50	фаза «С»	обм.5	76,56 %
2		фаза «А»	обм.6	2,19 %
3		фаза «А»	обм.6	-76,15 %
4		фаза «А»	обм.6	73,01 %
5		фаза «В»	обм.6	65,37 %
6		фаза «С»	обм.6	64,83 %
7	В-60	фаза «А»	обм.4	40,40 %
8		фаза «А»	обм.5	-61,32 %
9		фаза «А»	обм.6	86,04 %
10		фаза «В»	обм.4	-16,09 %
11		фаза «В»	обм.5	48,21 %
12		фаза «В»	обм.6	12,02 %
13		фаза «С»	обм.4	-36,36 %
14		фаза «С»	обм.5	48,71 %
15		фаза «С»	обм.6	13,45 %

КЛАССЫ ТОЧНОСТИ ТТ ДЛЯ ЗАЩИТЫ

Для надежной работы сети, при выборе классов точности трансформаторов тока для защиты, необходимо учитывать дополнительные требования к остаточной намагниченности и аperiodической составляющей в токе короткого замыкания. Рассмотрим различные классы точности обмоток для защиты.

Класс точности обмоток для защиты 5P, 10P

До настоящего времени существовали только эти классы точности в отечественных стандартах.

К данному классу точности не предъявляются требования по точности в переходных режимах и ограничений по остаточной намагниченности, а значит для трансформаторов тока данных классов точности характерно наличие остаточной намагниченности.

В настоящее время кроме традиционных классов 5P и 10P предлагаются следующие классы точности трансформаторов тока для релейной защиты в соответствии с новым стандартом ПНСТ-283.

Класс точности обмоток для защиты 5PR, 10PR

Данный класс точности, помимо требований, предъявляемым к классам 5P и 10P, характеризуется требованием к остаточной намагниченности, которая не должна составлять более 10 % от потока насыщения. Следовательно, при протекании симметричных токов КЗ такой трансформатор тока не уйдет в насыщение, и не будет происходить ис-

кажения тока во вторичной цепи. После отключения трансформатор не требует размагничивания, так как после прекращения протекания тока в обмотках сердечник возвращается в состояние, предшествующее короткому замыканию. Такой тип трансформаторов должен прийти на смену трансформаторам класса точности 5P и 10P: он не требует увеличения сечения или значительного увеличения стоимости, так как фактически это тот же классический трансформатор, только с небольшим конструктивным изменением магнитопровода.

Класс точности обмоток для защиты TPY

Данный класс точности характеризуется не только требованием к ограничению остаточной намагниченности, аналогично классам 5PR, 10PR, но и требованиями к точности передачи мгновенного значения тока в переходном режиме короткого замыкания с нормированной погрешностью не более 10 %. Данный класс позволяет измерять значение тока КЗ с учетом аperiodической составляющей. Надо отметить, что такая точность работы трансформаторов тока в переходных режимах требуется далеко не всегда, и для ее достижения приходится значительно увеличивать сечение магнитопровода, что, естественно, ведет к увеличению стоимости.

Класс точности обмоток для защиты TPZ

Данный класс характеризуется нормируемой погрешностью трансформации периодической составляющей

тока КЗ. Можно сказать, что трансформатор тока фильтрует периодическую составляющую. Класс TPZ – наиболее перспективный классом точности трансформаторов для работы в переходных режимах. Из особенностей конструкции стоит отметить значительно меньшие габариты и стоимость по сравнению с трансформатором тока класса TPY.

РАЗВИТИЕ НАЦИОНАЛЬНОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ

Ситуация по стандартам ГОСТ Р МЭК и ГОСТ МЭК крайне запутанная и очевидно, что существующая нормативная база безнадежно устарела, а стандарты МЭК не отражают национальных интересов.

Органами стандартизации ведется работа по принятию в качестве национальных стандартов идентичных переводов стандартов МЭК, которые действуют исключительно для экспортных поставок. Непонятно как воспринимать эти национальные стандарты для экспортных поставок! Содержат большое количество ошибок, что фактически приводит к невозможности его использования даже в качестве информационного материалов.

Например, ГОСТ Р МЭК 61869-2:

п.3.1.204 слова «без ограничения остаточного потока» переведены как «с ограничением»;

п.5.3.201 «...номинальное выдерживаемое напряжение межвитковой изоляции должно составлять десятикратное значение от максимального среднеквадратического значения нормированной э.д.с. в точке перегиба, но не менее 10 кВ (пикового значения)». Должно быть «но не более 10 кВ»;

п.5.5.202 «not precluded» – «не препятствуется» переведено как «не допускается». Вместо слов «остаточный магнитный поток» употребляется «магнитная индукция», что, во-первых, не соответствует оригиналу, а, во-вторых, физически неверно. Индукция – это удельная характеристика магнитного материала (Тл), а этот документ имеет дело с трансформатором в сборе и данных для определения индукции не содержит. Определить можно только то, что можно измерять на выводах обмотки, в частности, поток (Вб), точнее, потокосцепление.

В России с 1 января 2014 года действует стандарт – ГОСТ ИЕС 60044-1-2013 «Трансформаторы измерительные. Часть 1». Данный стандарт –

перевод стандарта IEC 60044-1:2003, который был заменен стандартами IEC 61869-1:2007 и IEC 61869-2:2012, то есть часть норм оригинала документа МЭК утратила силу еще в 2007 году, а остальная – в 2012 г. Очевидно, что при таком подходе внедряются устаревшие документы. При переходе от серии IEC 60044 к серии IEC 61869 состав документа претерпел существенные изменения, поэтому ГОСТ IEC 60044-1-2013 даже для экспорта нельзя считать актуальным. Кроме того, ГОСТ IEC 60044-1-2013 содержит ссылки на международные стандарты, которые официально не переведены на русский язык и не введены в действие на территории РФ, даже для продукции на экспорт. На сегодня идет речь об отмене данного стандарта.

Похожая ситуация и с другими стандартами серии **МЭК 61869, ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015 «Трансформаторы измерительные. Часть 2. Дополнительные требования к трансформаторам тока»**. Требования настоящего стандарта распространяются на трансформаторы тока для экспортных поставок. Как национальный стандарт может быть для экспортных поставок?

ГОСТ IEC 61869-1-2015 (IEC 61869-1:2007, IDT). «Трансформаторы измерительные. Часть 1. Общие требования» – один из ссылочных документов, является государственным стандартом Республики Беларусь и не действует на территории Российской Федерации. Данный стандарт имеет порядка 30 ссылочных документов. Большинство ссылочных нормативных документов не приняты в РФ как ГОСТы и даже не переведены на русский язык.

Чтобы выполнить требования конкретного стандарта, необходимо не только выполнить требования непосредственно текста стандарта, но одновременно выполнить требования всех ссылочных стандартов, указанных в разделе «Нормативные ссылки»: на материалы и комплектующие, методы испытаний и измерений, метрологию, климатические исполнения и многое другое. С принятием идентичного перевода стандарта МЭК в качестве национального стандарта (пусть даже только для экспортных поставок) изготовитель продукции не может его полностью выполнить, так как система стандартизации МЭК существенно отличается от отечественной. Международные стандарты не являются

действующими на территории РФ, и из всего их объема переведены на русский язык только единицы!

ГОСТ IEC 60050-321-2014 «Международный электротехнический словарь. Часть 321. Измерительные трансформаторы». Данный международный словарь издан на трех официальных языках – английском, французском и русском. В такой ситуации непонятно, зачем делать перевод стандарта с русского на русский? Еще один интересный момент – данный «перевод» выполнен на основе международного словаря IEC 60050-321 изданного в 1986 и не обновленного с тех пор, соответственно никаких терминов относящихся к современным изделиям, появившимся за последние десятилетия он не содержит.

Русский язык – один из официальных языков международной организации МЭК, и любой стандарт может быть переведен на русский язык и зарегистрирован как официальная публикация в центральном офисе МЭК (в Женеве). Если необходимо, для оборудования, выпускаемого для поставки на экспорт, целесообразно применять именно эти официальные публикации. Для отслеживания и учета мирового уровня целесообразно вести такую работу по переводу стандартов, параллельно с разработкой стандартов МЭК, а для достижения наибольшего эффекта и гармонизации технических требований со стандартами МЭК необходимо непосредственное участие в рабочих группах, начиная с начальных этапов разработки. Также надо понимать, что ни одно государство не применяет стандарты МЭК в качестве национальных стандартов в «чистом» виде.

В связи с отсутствием нормативной базы заказчики, например, ОАО «ФСК ЕЭС», формулируют требования «своими словами» и ссылаются на нелегитимный в стране стандарт, например: «трансформаторы должны обеспечивать с заданным классом точности предел погрешности в переходных режимах, включая цикл АПВ, в том числе и неуспешное АПВ «КЗ – отключение – пауза 1 сек. – включение» согласно требованиям МЭК 44-6». Сегодня из самих стандартов СТО убрали последнюю фразу «согласно требованиям МЭК 44-6», но в тендерах она встречается до сих пор. Из данного требования следует что трансформаторы тока 5P и 10P тоже

удовлетворяют данным требованиям, так как требования к нормируемой погрешности в переходных режимах отсутствуют, а «своему классу точности» (5P и 10P) они удовлетворяют. Т.е. требование формально есть, но из-за отсутствия нормативной базы, изготовители комплектуют оборудование трансформаторами тока классов 5P и 10P.

ВЫВОДЫ

1. Для традиционных трансформаторов тока классов 5P и 10P единственный способ борьбы с вредным влиянием остаточной намагниченности – размагничивание трансформатора тока, но выполнять данную процедуру после каждого переключения выключателя в условиях эксплуатации с практической точки зрения трудоемко, нецелесообразно и нереализуемо.

Для исключения проблем с насыщением ТТ из-за высокой остаточной намагниченности необходимо применять ТТ с новыми классами точности 5PR, 10PR, TPY, TPZ, имеющих гарантированный коэффициент остаточной намагниченности не более 10 %.

2. Из вышесказанного можно сделать вывод, что для обеспечения надежной работы РЗА в большинстве случаев подойдет трансформатор класса точности 5PR, 10PR. Применять трансформаторы классов точности TPY, TPZ следует в тех случаях, когда постоянная времени первичной цепи составляет более 100 мс, при этом отдавать предпочтение нужно классу точности TPZ. И только в тех случаях, когда требуется измерение тока КЗ с учетом аperiodической составляющей, следует использовать трансформаторы класса точности TPY.

3. Сегодня в ТК016 ПК-2 «Электрические сети (магистральные и распределительные)» ведется работа по развиту национальной стандартизации в области измерительных трансформаторов. Работа включена в Программу национальной стандартизации до 2020 года и утверждена приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. Серия стандартов содержит требования к классам точности обмоток для защиты 5PR, 10PR, TPY, TPZ, описанные в данной статье. В объем работы по разработке серии стандартов, в том числе, входит создание нормативной базы для электронных трансформаторов.