

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТБОРА МОЩНОСТИ ОТ ВЛ 110–500 кВ

ЛАРИН В.С., ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»

МАТВЕЕВ Д.А., «НИУ «МЭИ»

НИКУЛОВ, И.И., ОАО «РЭТЗ Энергия»

Применение трансформаторов прямого подключения к воздушным линиям электропередачи представляет все больший интерес в мировой практике. Номинальная фазная мощность таких трансформаторов рассматривается в диапазоне от 10 до 500 кВА, при этом конструктивно трансформаторы оказываются значительно ближе к трансформаторам напряжения, нежели к силовым трансформаторам. Применение этих трансформаторов осложнено отсутствием нормативной базы, в связи с чем в настоящее время в Международной электротехнической комиссии (МЭК) создается рабочая группа для разработки стандарта на эти устройства, получившие название SSVT – Station Service Voltage Transformers, а в отечественной практике часто называемые трансформаторами отбора мощности. В статье рассмотрены области применения таких устройств, мировой опыт их внедрения в рамках пилотных проектов, проанализирован возможный технико-экономический эффект, проявляющийся, в частности, в снижении затрат на организацию электроснабжения и в снижении потерь электроэнергии. Охарактеризованы научно-технические проблемы на пути разработки эффективных конструкций и рассмотрены ключевые вопросы, определяющие технические требования к трансформаторам, которые предстоит выдвинуть к ним на этапе стандартизации.

Концепция интеллектуальных систем электроснабжения и энергопотребления в Российской Федерации и в мире подразумевает применение новых технологий для повышения надежности и экономичности действующих и вновь проектируемых электрических сетей на фоне изменений, связанных с внедрением возобновляемых источников, распределенной генерации, жестких ограничений по выбросам парниковых газов, широкого внедрения цифровых коммуникаций. Ключевые задачи, решаемые интеллектуальными электроэнергетическими системами, отличаются в различных странах и регионах в зависимости от внешних факторов, текущего состояния энергосистем и их программ развития. Однако обеспечение надежности и энергоэффективности станций и подстанций – всегда задача первостепенной важности.

Большое значение имеет организация надежного электроснабжения сетей соб-

ственных нужд, при этом в большинстве случаев требуется и резервный источник питания. Для этого существует несколько возможных технических решений, среди которых можно выделить:

- строительство отдельной линии электропередачи. Это наиболее дорогое решение, надежность которого во многом зависит от условий прохождения трассы;
- использование третичной обмотки основного силового трансформатора (автотрансформатора). Такое решение существенно усложняет конструкцию силового трансформатора и исключает возможность его конструирования с оптимальными параметрами, так как дополнительная обмотка занимает значительный объем, располагаясь, при этом, вблизи стержня магнитопровода, увеличивая габариты и потери трансформатора и снижая его надежность.
- применение дизель-генераторов. К недостаткам этого решения следует

отнести повышенные эксплуатационные издержки, необходимость частого технического обслуживания и низкую экологичность за счет выбросов углекислых газов и повышенного уровня шума.

Альтернатива указанным подходам – применение трансформаторов отбора мощности (ТОМ), подключаемых непосредственно к воздушным линиям электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения и понижающих напряжение за одну ступень до значений, необходимых для питания электрооборудования систем собственных нужд. Конструктивно такие устройства не похожи на силовые трансформаторы, и в значительной степени опираются на конструктивно-технические решения, реализуемые в измерительных трансформаторах напряжения, но обеспечивающие большую номинальную мощность. При этом эти устройства могут быть спроектированы так, чтобы обеспечить радикальное пре-

имущество в стоимости перед силовыми трансформаторами.

В связи с невысокой стоимостью применение ТОМ представляется актуальным и для решения задач интеграции возобновляемых источников в единую интеллектуальную электроэнергетическую систему. В системах распределенной генерации при невысокой мощности возобновляемых источников такие устройства могут работать в двустороннем режиме, обеспечивая выдачу мощности в сеть.

Еще одна область применения этих устройств – организация электроснабжения удаленных потребителей: небольших населенных пунктов, фермерских хозяйств, вышек сотовой связи и телекоммуникаций, насосных и нефтеперекачивающих станций. Возможно применение ТОМ в составе передвижных КТП 110 и 220 кВ для организации временного электроснабжения при строительстве удаленных объектов или в качестве аварийного источника питания от ВЛ при ликвидации катастроф.

Во всех вышеперечисленных случаях ТОМ способны обеспечить надежное и экономичное техническое решение. Их дополнительные возможности, такие как регулирование напряжения на низкой стороне и измерение напряжения с помощью дополнительных вторичных обмоток вместо отдельного измерительного трансформатора, обосновывают большой интерес к перспективам их разработки не только в России, но и в мире.

ПЕРСПЕКТИВЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ

Проведение научных исследований, разработка и внедрение во многих странах мира технологий интеллектуальных электроэнергетических систем привели к резкому возросшему интересу к устройствам отбора мощности. В частности, на 46-й сессии СИГРЭ в августе 2016 года вопрос об актуальности разработок, связанных с применением этих устройств, был вынесен на обсуждение на дискуссионном заседании исследовательского комитета АЗ «Высоковольтное оборудование».

В основе обсуждения было сообщение испанских специалистов [1] о применении индуктивных трансформаторов напряжения для питания собственных нужд подстанций, по которому в рамках дискуссии было сделано пять сообще-

ний, обобщающих опыт первых разработок и экспериментального применения трансформаторов отбора мощности в США, Австралии, Испании, Италии и ЮАР. Всеми докладчиками отмечалась высокая заинтересованность электросетевых компаний и растущая потребность в таких устройствах. Особо была отмечена необходимость стандартизации, которая позволила бы применять эти устройства на основе официально утвержденной нормативной базы. В связи с этим, в декабре 2016 г. на пленарном заседании Технического комитета 38 МЭК было принято решение об организации новой рабочей группы, которая будет заниматься разработкой стандарта на трансформаторы отбора мощности, получившие в МЭК название «Station Service Voltage Transformers» (SSVT). Проект по разработке стандарта на эти устройства запущен и в США (рабочая группа WGC57.13.8 IEEE).

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ (ПИЛОТНЫЕ ПРОЕКТЫ)

На сегодняшний день в мире разработаны опытные и промышленные образцы трансформаторов отбора мощности с масляной и элегазовой изоляцией. Компания ABB наладила их производство для питания потребителей на низком и среднем напряжении с диапазоном высших напряжений 46–550 кВ [2, 3]. Компания Kopçar завершила разработку трансформатора отбора мощности с открытым (незамкнутым) магнитопроводом [4, 5]. В Российской Федерации первые образцы таких устройств выпущены пока только на напряжение 110 кВ АО «Уралэлектротяжмаш» и ОАО «РЭТЗ Энергия» (рис. 1).

Из опыта применения трансформаторов можно выделить пилотные проекты, реализованные в Австралии. С 2006 г. там установлено примерно 70 аппаратов для питания собственных нужд подстанций электроснабжения шахт и рудников, а также удаленных бытовых потребителей. Первичные напряжения трансформаторов составляют 72,5, 120, 145 и 300 кВ, вторичные – 200–240 В, измерительные обмотки выполнены на В. Номинальные мощности аппаратов находятся в диапазоне 15–100 кВА. 32 аппарата имеют элегазовую изоляцию, они подключены напрямую к сборным шинам или ВЛ. Маслонаполненные трансформаторы подключены через



Рис. 1. Опытный образец ТОМ 110 кВ мощностью 20 кВА производства ОАО «РЭТЗ Энергия»

разъединители для обеспечения возможности технического обслуживания.

За прошедшие 10 лет не было ни одного случая аварийного выхода аппаратов из строя. Тем не менее, широкому внедрению трансформаторов отбора мощности препятствует отсутствие нормативной базы – без стандартов оборудование не закупает.

Опыт применения ТОМ для электроснабжения удаленных бытовых потребителей имеется у компании ABB [2]. К 2015 году Всемирным банком были профинансированы работы по обеспечению электроэнергией семи деревень в юго-восточной части республики Конго с численностью населения от 200 до 1500 человек. Рядом с каждой из деревень проходят ВЛ 220 кВ, от которых и был организован отбор мощности. Компания ABB разработала и построила однофазные мини-подстанции с подключением ТОМ к ВЛ через разъединитель. Дополнительно, для защиты от перенапряжений устанавливались ОПН.

Представители ABB отмечают также широкие перспективы применения ТОМ как аппарата для питания собственных нужд ветроэнергетических установок [3].

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ НА ПУТИ СОЗДАНИЯ ТОМ

Ключевой фактор, определяющий возможность создания ТОМ на напряжения свыше 110 кВ – применение новых технологий проектирования и изготовления высоковольтной изоляции. Трансформаторы отбора мощности по своим техническим характеристикам не являются ни измерительными, ни традиционными силовыми трансформаторами, и использование компактных обмоток для них имеет решающее значение. Применение новых изоляционных материалов, технологий и методов регулирования электрических полей, основанных на конечно-элементном моделировании, открывает новые возможности по достижению минимальных габаритов устройств, снижения потерь и нагрева активных частей, обеспечения малого отклонения выходного напряжения под нагрузкой. Для реализации указанных подходов необходимы критерии длительной и кратковременной электрической прочности главной и продольной изоляции.

ФАКТОРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТОМ

Являясь компактными и экономичными устройствами, трансформаторы отбора мощности позволяют также получить дополнительный эффект, выражающийся в снижении потерь. При их использовании в схемах электроснабжения собственных нужд станций и подстанций исключается дополнительная ступень трансформации. Помимо этого, появляется дополнительная возможность снижения потерь во время пусковых и ремонтных периодов за счет исключения работы силовых трансформаторов в режимах, близких к холостому ходу, когда они используются только для питания системы собственных нужд. Мощность холостого хода ТОМ на один-два порядка меньше, чем у силовых трансформаторов, поэтому эффект от применения ТОМ может оказаться существенным.

При питании собственных нужд от третичной обмотки основного силового трансформатора или автотрансформатора часто требуется еще один понижающий трансформатор, например, 10/6 кВ или 6(10)/0,4 кВ, что дополнительно увеличивает потери при снабжении собственных нужд. Питание собственных нужд со стороны НН сило-

вого трансформатора (автотрансформатора) требует поддержания напряжения на стороне НН. Применительно к автотрансформаторам это означает необходимость регулирования напряжения на стороне СН (а не в нейтрали), то есть применения устройств РПН на повышенном напряжении и усложнение конструкции изоляции трансформатора. Кроме того, при наличии третичной обмотки с выведенными на крышку бака автотрансформатора выводами возникает необходимость обеспечения стойкости к сквозным коротким замыканиям обмотки НН. При этом обмотка НН, даже если она маломощная и используется исключительно для питания собственных нужд суммарной мощностью порядка десятых единиц МВт, должна выдерживать колоссальные токи КЗ, определяемые сопротивлением КЗ пар обмоток СН–НН и ВН–НН.

Одним из решений задачи повышения надежности и стойкости при КЗ автотрансформаторов является использование в них третичных (стабилизационных) обмоток, у которых наружу бака выведены лишь два вывода одной вершины треугольника (для возможности разобрать «треугольник» и провести диагностические измерения), что исключает возможность сквозных КЗ на стороне НН, однако применение таких автотрансформаторов возможно лишь в случае отказа от использования третичных обмоток для питания собственных нужд.

Снижение потерь достигается и при использовании ТОМ для питания удаленных потребителей – вместо строительства и применения отдельной ЛЭП 6–35 кВ и понизительной подстанции 6–35/0,4 используется источник питания, подключенный непосредственно к ВЛ 110–220 кВ.

Важный вопрос – надежность ТОМ. Эту надежность можно было бы оценить как весьма высокую на основе имеющихся данных для измерительных трансформаторов [6], однако ТОМ отличаются от ТН тем, что часто могут быть перегружены. Это указывает на то, что конструкции обмоток ТОМ нельзя слепо копировать с обмоток ТН – многолетняя практика проектирования и опыт применения цилиндрических слоевых обмоток ТН основываются на качественно других температурных режимах. Это же обстоятельство необходимо учитывать и при разработке технических требований.

О ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЯХ К ТРАНСФОРМАТОРАМ ОТБОРА МОЩНОСТИ

Требования к электрической прочности изоляции

Трансформаторы отбора мощности могут иметь различные уровни изоляции. При использовании ТОМ на подстанции в качестве резервного источника питания собственных нужд, он может оказаться расположенным достаточно далеко от ОПН, поэтому испытательные напряжения должны быть установлены как для аппаратов и трансформаторов тока по ГОСТ Р 55195.

При использовании ТОМ как основного источника питания (микростанции) с подключением через разъединитель необходима установка ОПН со стороны ТОМ, при этом расстояние между ТОМ и ОПН оказывается весьма малым. В этом случае уровень изоляции может быть существенно снижен в обоснованных пределах, аналогично силовым трансформаторам [7]. Таким образом, целесообразно разделение технических требований и разработка нескольких различных модификаций ТОМ для обеспечения оптимальных технико-экономических показателей, а также соответственное нормирование испытательных напряжений.

Требования к уровню частичных разрядов

Поскольку по своей сути ТОМ – силовой трансформатор малой мощности, вполне логично было бы применить нормы на допустимые уровни частичных разрядов согласно стандартам ГОСТ и МЭК на силовые трансформаторы. Так, по ГОСТ Р 56738-2015 (МЭК 60076-3:2013) допустимый уровень ЧР составляет 250 пКл при испытательном напряжении 1,4–1,5 от наибольшего рабочего фазного напряжения. С другой стороны, эти нормы учитывают особенности конструкции силовых трансформаторов, возможность наличия ЧР на баке и заземленных частях магнитопровода – на удалении от изоляции обмоток.

С учетом компактной конструкции изоляции ТОМ и их общего конструктивного исполнения, представляется целесообразным ограничить допустимую интенсивность ЧР и использовать методику испытаний измерительных трансформаторов, что дополнительно обосновывается повышенными требованиями к внутренней изоляции и необ-

ходимостью обеспечения надежности в условиях применения аппаратов без выключателей.

Требования к напряжению короткого замыкания и регулированию напряжения

В силовых трансформаторах средней и большой мощности (десятки и сотни МВА) напряжение короткого замыкания u_k обычно составляет 10–12 %. Для поддержания напряжения на стороне НН (СН) в данных трансформаторах применяется регулирование напряжения с помощью устройства РПН. Диапазон регулирования устанавливается таким образом, чтобы он перекрывал возможное отклонение напряжения на вторичной стороне трансформатора при его нагрузке.

В распределительных трансформаторах u_k удается обеспечить на уровне 5–6 %, что позволяет значительно снизить требуемый диапазон регулирования, не применяя устройство РПН и существенно упростить конструкцию трансформатора.

Таким образом, требование к наличию и диапазону регулирования напряжения на вторичной стороне трансформатора в значительной степени связано с нормированным значением напряжения КЗ трансформатора. В то же время, чем мощнее трансформатор, тем больше должно быть u_k для ограничения токов КЗ.

Применительно к ТОМ сделать небольшое u_k , как правило, не получается, так как рабочее и испытательные напряжения сравнительно большие, что требует больших изоляционных расстояний. Из этого следует, что в случае наличия жестких требований по поддержанию напряжения вторичной обмотки необходимо реализовать регулирование напряжения в ТОМ, при этом устройство регулирования не должно приводить к существенному удорожанию и усложнению конструкции ТОМ.

Альтернативно, если жестких требований по поддержанию напряжения вторичной обмотки не предъявляется, например, если для стороны НН 0,4 кВ принято допустимым отклонение напряжения ± 10 % (или даже ± 15 %), представляется возможным в отдельных случаях отказаться от применения устройства регулирования и ограничиться применением ПБВ для сезонного регулирования напряжения.

Требования по нагреву

При установлении требований по нагреву ТОМ, в которых применены традиционные изоляционные материалы (трансформаторное масло, бумажная изоляция), представляется целесообразным руководствоваться нормами на силовые трансформаторы ГОСТ Р 52719. Испытания целесообразно проводить по методике, установленной для силовых трансформаторов (ГОСТ 3484.2).

В случае применения высокотемпературных изоляционных материалов (изоляционных жидкостей, арамидной бумаги) требуется дополнительное рассмотрение допустимых для изоляционной системы температур, поскольку в настоящее время в ГОСТ Р 52719 отсутствуют требования по нагреву к трансформаторам с применением высокотемпературных изоляционных материалов.

Требования к стойкости при КЗ

Как и силовые трансформаторы, ТОМ должны выдерживать сквозные токи КЗ. Представляется целесообразным установить те же требования к стойкости при КЗ, что и для силовых трансформаторов по ГОСТ Р 52719.

Испытания ТОМ на стойкость при КЗ имеют некоторые особенности по сравнению с испытаниями распределительных и силовых трансформаторов. Эти трансформаторы, как правило, имеют обмотки с напряжением, близким к напряжению ударных генераторов, что позволяет в ряде случаев проводить испытания без использования ударных трансформаторов или с использованием ударного трансформатора с небольшим коэффициентом трансформации, которые зачастую имеются в составе испытательных лабораторий. Например, от ударного генератора напряжением 12(14) кВ испытания трансформатора 10/0,4 кВ могут быть выполнены со стороны ВН, а испытания трансформатора 110/10 кВ могут быть выполнены при питании со стороны НН. Иначе дело обстоит для ТОМ с номинальными напряжениями, например, 220/0,4 кВ или 330/0,4 кВ, для которых испытания со стороны ВН могут быть невозможны из-за отсутствия ударного трансформатора с требуемым коэффициентом трансформации, а испытания со стороны НН имеют технические сложности из-за сочетания сравнительно небольшого напряжения и больших токов.

ВЫВОДЫ

Трансформаторы отбора мощности – перспективные устройства, способные предоставить экономичные, надежные и предпочтительные технические решения для широкого круга задач по обеспечению электроснабжения.

Возможна и целесообразна разработка нескольких модификаций ТОМ с различными уровнями изоляции и требованиями по регулированию напряжения на стороне НН.

Широкое применение трансформаторов отбора мощности сдерживается отсутствием нормированных технических требований. На сегодняшний день уже созданы международные рабочие группы по стандартизации ТОМ, аналогичная работа должна быть проделана и в России. Помимо разработки стандартизованных технических требований к ТОМ необходимо также провести работы по корректировке норм проектирования объектов электроэнергетики с учетом возможного применения этих аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Regil, A. Burgos. Inductive Voltage Transformers for Auxiliary Services Power Supply in Substations. Design, Specification and Normative Aspects and Application Example // CIGRE Session Report, Paris, 2016.
2. D. Xu, N.S. Powers, W. Sae-Kok. Development of a Power Source for Rural Electrification // IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), 8–11 Oct, 2015, P. 340–347.
3. D. Xu, N.S. Powers, M. Paul, W. Sae-Kok, P. Sukirithawornkul. Alternative Power Source in Various Substation Applications // IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT ASIA), 3–6 Nov, 2015.
4. Žiger, B. Bojani, D. Krajtner. Open-core Power Voltage Transformer: Concept, Properties, Application // IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), 13–16 May, 2014, P. 246–253.
5. I. Žiger, B. Bojanić, D. Krajtner. Power Voltage Transformers — Expanding Beyond Station Service // IEEE Power & Energy Society General Meeting, 26–30 Jul, 2015.
6. Final Report of the 2004–2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment. Part 4 – Instrument Transformers // CIGRE Technical Brochure, No. 512, 2012.
7. Лоханин А.К. Вопросы координации изоляции силовых трансформаторов со сниженным уровнем изоляции // Электричество, 2010, № 2, С. 21–27.