

Так ли однозначны преимущества инверторных станций катодной защиты над трансформаторными?

Со времени первой публикации статьи прошло три года и появились новые данные, потребовавшие некоторой корректировки материала.

Будучи по роду деятельности, весьма плотно знакомым с производством и эксплуатацией СКЗ трансформаторного типа, решил выступить в качестве адвоката данного типа оборудования.

Ни в коем случае не умаляя достоинств современной высокочастотной преобразовательной техники, считаю, что достоинства и востребованность трансформаторных СКЗ незаслуженно принижены и обоснования необходимости применения исключительно преобразователей инверторного типа далеко не так однозначны.

Всемирно известная аксиома, что у каждой медали есть две стороны, а также собственные наблюдения послужили поводом написать данную статью. Скорее, это даже не статья, а некоторые выкладки из имеющихся у меня статистических данных для публичного обсуждения и дискуссии.

В Сети попадает много обзоров и сравнений инверторных станций катодной защиты (СКЗ), в которых декларируются неоспоримые преимущества данного типа СКЗ над станциями трансформаторного типа. Однако, при чтении данных материалов меня постоянно преследовало ощущение неполной объективности, а иногда и некоторой некорректности сопоставлений характеристик сравниваемых типов оборудования. Например, когда сравниваются характеристики/показатели инверторной СКЗ номинальной мощности 1,0 кВт с характеристиками трансформаторной – 3,0 кВт; как минимум, показатели массы данных СКЗ точно сравнивать не стоит.

В связи с этим постараюсь максимально корректно использовать имеющиеся в моем распоряжении данные и избегать неподтвержденных фактов.

Сразу оговорюсь, я не сторонник однозначных утверждений и считаю, что для решения каждой конкретной задачи должен применяться принцип вариативности, т.е. допустимости различных подходов, методов и способов ее решения. Мир – не черно-белый и, как минимум, существуют оттенки серого.

Я приглашаю всех специалистов, интересующихся и связанных с этой темой, обсудить представленные выкладки и высказать свое мнение. Обещаю, ни один Ваш вопрос, уточнение или замечание не останутся без ответа.

Перед тем, как перейти к каким-либо сопоставлениям, хочу обратить внимание, что в части автоматики, электроники управления и функциональных возможностей, оба типа СКЗ вполне идентичны и не требуют сравнения. Таким образом, в большей степени сопоставление будет связано с силовой частью СКЗ.

И так, начнем с наиболее распространенных утверждений и доводов в пользу СКЗ инверторного типа, учитывая сопоставимые технические и функциональные возможности СКЗ обоих типов, декларируемых в различных печатных и сетевых материалах:

1. Инверторные СКЗ имеют меньшие массу и габариты по сравнению с трансформаторными.

Отчасти верное утверждение. Силовой блок высокочастотного преобразователя имеет малые габариты и вес на 1 кВт выходной мощности, однако для него, как и для трансформаторного источника, необходимы блок электроники управления, аппаратура телемеханики, коммутационные электрические жгуты, соединители и другая аппаратура. К тому же, для всего этого требуется внешний корпус для монтажа и реализации возможности защиты оборудования от несанкционированного доступа и воздействия окружающей среды при установке СКЗ на открытой площадке в городских или полевых условиях. Таким образом, на выходе мы получаем, что габариты инверторной СКЗ обретают вполне осязаемый вид (500x550x700 мм, 600x450x900 мм и т.д.), сопоставимый с СКЗ трансформаторного типа, да и масса законченного устройства становится вполне ощутимой. В зависимости от мощности инверторные СКЗ имеют массу от 50 до 125 кг.

Для сопоставления, трансформаторные СКЗ, с которыми я непосредственно работаю, с интегрированным или внешним емкостно-индуктивным фильтром имеют габаритные размеры 440x400x850 мм (440x400x1160 мм при поставке с внешним блоком фильтра) и массу от 65 до 135 кг.

2. Блочно-модульная конструкция инверторных станций позволяет наращивать выходную мощность СКЗ без демонтажа шкафа, путем доустановки необходимого количества силовых модулей.

Справедливое утверждение, действительно удобное техническое решение. Тут скорее больше времени и ресурсов отнимет бюрократическое согласование изменения проектной мощности СКЗ.

В трансформаторных станциях добиться такой унификации сложно, но не невозможно. В частности, станции серии УКЗТ имеют универсальную конструкцию внешнего корпуса, несущих узлов и единый, для линейки мощностей от 0,3 до 3,0 кВт, выходной каскад выпрямителя, что позволяет увеличить мощность до 3,0 кВт путем простой замены силового трансформатора, имеющего сопоставимую стоимость с силовым модулем инвертора мощностью 1 кВт. При этом остается запасной трансформатор, который возможно использовать для уменьшения/увеличения мощности другой СКЗ. Также возможно увеличение мощности и до 5,0 кВт, но технически это будет реально сложнее, чем в случае с СКЗ инверторного типа и, возможно, несколько дороже.

Не берусь однозначно утверждать, но скорее всего то же самое возможно реализовать и в трансформаторных СКЗ других типов.

Справедливости ради отмечу, что наиболее привлекательным свойством модульной конструкции инверторных СКЗ является возможность резервирования силовых модулей, но это к вопросу о немного другом классе оборудования.

Если же вести речь о ремонтпригодности силовой части СКЗ, то да, силовые модули меняются просто и быстро, но и силовую часть трансформаторной СКЗ можно отремонтировать в полевых условиях в течение пары часов, т.к. схемотехника очень простая, а элементная база – доступная. Пожалуй, имеет смысл сопоставление стоимости запасного силового блока инверторной СКЗ и ремонта вышедшего из строя, со стоимостью запасных частей для ремонта трансформаторной.

3. У СКЗ инверторного типа более высокое, по сравнению с трансформаторными СКЗ, качество защиты сооружения, обусловленное низким коэффициентом пульсаций выходного напряжения, широким диапазоном допустимого изменения напряжения сети и сопротивления нагрузки.

Не могу безоговорочно с этим согласиться, т.к. трансформаторные СКЗ, оснащенные емкостно-индуктивным фильтром, обеспечивают сопоставимую с инверторными величину коэффициента пульсаций не более 3%, а в некоторых случаях и 1-2%. Диапазон изменения напряжения питающей сети, при котором трансформаторные СКЗ сохраняют работоспособность, не меньше, чем у инверторных (от 150 до 264 В).

Еще неформальный вопрос: что понимать под качеством защиты сооружения? Качество защиты сооружения определяется величиной и стабильностью обеспеченного защитного (суммарного или поляризационного) потенциала. Насколько мне известно, пульсация напряжения постоянного тока не оказывает отрицательного влияния на величину и стабильность защитного потенциала, т.к. данная пульсация не переходит в знакопеременную зону.

Что касается диапазона сопротивления нагрузки, то у меня будет вопрос к представителям эксплуатирующих компаний. В своей практике при работе на объектах с инверторными СКЗ я сталкивался с проблемой, что при работе на цепи нагрузки менее 1 Ом, при необходимости установки низкого значения выходного тока (от 1 до 3 А), инверторные СКЗ вели себя нестабильно. Если позволите, я не буду конкретизировать модель СКЗ. При работе с трансформаторными СКЗ с такими проблемами сталкиваться не доводилось, они вели себя устойчиво на низкоомных нагрузках 0,3 – 0,5 Ом с величиной защитного тока от 1А. Вопрос заключается в следующем: это действительно так или просто мне так повезло?

Ну а теперь перехожу к самому интересному и, пожалуй, ключевому вопросу – о существенно более высокой энергетической эффективности и, как следствие, экономической целесообразности станций катодной защиты инверторного типа в сравнении с трансформаторными СКЗ.

4. Инверторные СКЗ имеют более высокий коэффициент полезного действия по сравнению с трансформаторными, к тому же КПД трансформаторных СКЗ резко падает при уменьшении нагрузки.

У трансформаторных СКЗ, при правильном подборе LC-фильтра, КПД сопоставим с характеристиками инверторных СКЗ в номинальном режиме. Если и будет разница, то она уложится в диапазон 1 – 3%.

Насколько же справедливо утверждение о резком падении КПД трансформаторной СКЗ при уменьшении нагрузки и какие потери экономического характера это за собой влечет, давайте посмотрим дальше. Сейчас придется привести довольно много цифр и выкладок из имеющейся в моем распоряжении статистической информации о режимах работы СКЗ на реальных объектах для возможности аналитического взгляда на данный вопрос. Призываю всех читателей, связанных с этой тематикой и владеющих собственной статистической информацией, а также опытом эксплуатации или производства обсуждаемого оборудования, не оставаться в стороне, а вступить в обсуждение темы, высказать свое мнение, согласиться или не согласиться с мнением Вашего покорного слуги.

Забегая вперед, скажу, что характеристики и показатели СКЗ инверторного типа, производства не моей компании-партнера (ООО НПП «Дон»), я буду использовать только те, что представлены в официальных источниках компаний-изготовителей.

Для начала посмотрим теоретическую раскладку сил на примере виртуальных СКЗ инверторного и трансформаторного типов какой-то единой номинальной мощности, пусть

это будет 2,0 кВт. Сопоставим суммарные расходы на электроэнергию за год и за регламентированный срок службы (15 лет).

Потребление электроэнергии инверторной СКЗ номинальной мощностью 2,0 кВт, работающей в номинальном режиме, при показателе КПД=90%, составит:

за сутки – $2,0 \text{ кВт} / 0,9 \times 24 \text{ ч.} = 53,3 \text{ кВт*ч}$,

за год – $53,3 \text{ кВт*ч} \times 365 = 19\,454,5 \text{ кВт*ч}$,

за срок службы 15 лет – $19\,454,5 \text{ кВт*ч} \times 15 = 291\,817,5 \text{ кВт*ч}$.

Потребление электроэнергии трансформаторной СКЗ номинальной мощностью 2,0 кВт с емкостно-индуктивным фильтром, работающей в номинальном режиме, при показателе КПД=88%, составит:

за сутки – $2,0 \text{ кВт} / 0,88 \times 24 \text{ ч.} = 54,5 \text{ кВт*ч}$,

за год – $54,5 \text{ кВт*ч} \times 365 = 19\,892,5 \text{ кВт*ч}$

за срок службы 15 лет – $19\,892,5 \text{ кВт*ч} \times 15 = 298\,387,5 \text{ кВт*ч}$

При применении среднего тарифа на электроэнергию 10,12 руб. за 1 кВт*ч (для РО, апрель 2025) получим, что экономия по расходам на электроэнергию в случае с применением инверторной СКЗ составит $(19\,892,5 - 19\,454,5) \times 10,12 \text{ руб.} = 4\,432 \text{ руб.}$ в год или за 15-тилетний срок службы – $(298\,387,5 - 291\,817,5) \times 10,12 = 66\,488 \text{ руб.}$

Пока очень красиво. Но мы сейчас рассматривали случай полной нагрузки с максимальным показателем КПД. Вы прекрасно знаете, что станции катодной защиты в реальной жизни практически не эксплуатируются в режиме номинальной мощности, но детально об этом несколько позже. Мы же начнем понемногу приземляться.

Значение КПД станций катодной защиты при работе на режиме выходной мощности менее номинального значения не регламентируется.

Тем не менее некоторые изготовители в характеристиках инверторных СКЗ указывают значение КПД не менее 75% при работе на нагрузке в диапазоне 10 – 20% от номинальной мощности. Допускаю, что упоминание такого процента нагрузки связано с предположением реального длительного режима работы СКЗ.

В моем распоряжении есть информация о работе инверторной СКЗ номинальной мощностью 2,0 кВт, на реальном объекте, в режиме работы 8,7% (67В, 2,6А) от номинальной мощности с КПД = 74%. Так же, есть протокол испытаний от независимой лаборатории для трансформаторной станции катодной защиты УКЗТ с интегрированным емкостно-индуктивным фильтром номинальной мощностью 2,0 кВт, обеспечившей КПД равный 77,3% при работе в режиме 9,7% от номинальной мощности. Позволю себе предположить, что обозначенная выше инверторная СКЗ, при работе в режиме 9,7% от номинальной мощности, обеспечит сопоставимый КПД – 77,3%.

Таким образом получается, что при обозначенном режиме работы КПД инверторной и трансформаторной станций катодной защиты сопоставимы и разницы в расходах на электрическую энергию нет.

И, наконец, приближаюсь к более реальной картине по режимам эксплуатации СКЗ. Занимаясь выполнением работ по обслуживанию, наладке и ремонту СКЗ в разных регионах страны, я волей или неволей получаю достаточно обширные данные по реальным режимам работы станций катодной защиты в различных регионах нашей страны. Для получения усредненной картины по эксплуатационной нагрузке СКЗ мною

были взяты данные по 411 шт. СКЗ, работающих в пяти федеральных округах, в том числе: 166 шт. в Южном ФО, 85 шт. в Центральном ФО, 60 шт. в Северо-Кавказском ФО, 58 шт. в Приволжском ФО и 42 шт. в Уральском ФО.

Можно было бы сделать и более объемную выборку, но, как Вы увидите, несмотря на географический разброс, сходимость результата находится на достаточно высоком уровне и, принимая, что любые методы усреднения содержат в себе процент погрешности, разница результатов, даже если она будет, не внесет сколь-либо значимых изменений в общую картину. Опять же напомним, статья потенциально носит характер обсуждения, и если Вы располагаете информацией альтернативного характера, с удовольствием приму ее к обсуждению, анализу и, может быть, к изменению своей точки зрения.

Все, отхожу от лирики и начинаю переходить к описанию использованной мною методики и сухим цифрам статистики.

Чтобы не приводить огромное количество цифр по каждой из 411 СКЗ, для каждого ФО был рассчитан средний процент рабочей нагрузки, единичной («виртуальной») СКЗ от установленной мощности, на основании усредненных показателей режимов работы и установленной мощности реальных станций катодной защиты (См. таблицу 1. Расчет среднего процента рабочей нагрузки на одну СКЗ).

Таблица 1. Расчет среднего процента рабочей нагрузки на одну СКЗ

Федеральный округ	N, шт.	Рном.сум., Вт	Рном.ср., Вт	Рвых.сум., Вт	Рвых.ср., Вт	Кср.нагр., %
ЮФО	166	247 600	1 492	9 496	57	3,83
ЦФО	85	142 200	1 673	1 624	19	1,14
СКФО	60	109 000	1 817	3 156	53	2,91
ПФО	58	172 200	2 968	1 565	27	0,9
УФО	42	134 200	3 195	1 110	26	0,82
Обобщающий результат	411	805 200	1 959	16 951	41	2,1

Расчеты производились следующим образом:

$R_{ном.ср.} = R_{ном.сум.} / N$ где

- $R_{ном.ср.}$ – средняя номинальная мощность единичной «виртуальной» СКЗ,
- $R_{ном.сум.}$ – суммарная номинальная мощность установленных СКЗ,
- N – количество СКЗ в выборке для расчетов;

$R_{вых.ср.} = R_{вых.сум.} / N$ где

- $R_{вых.ср.}$ – средняя мощность на выходе единичной «виртуальной» СКЗ,
- $R_{вых.сум.}$ – суммарная мощность на выходе установленных СКЗ, работающих в заданных режимах защиты;

$K_{ср.нагр.} = R_{вых.ср.} / R_{ном.ср.}$ где

- $K_{ср.нагр.}$ – средний процент нагрузки единичной СКЗ по отношению ее номинальной мощности.

Таким образом, из полученных данных делаю вывод, что средняя загрузка станций катодной защиты, в рабочих режимах, находится в диапазоне (округлим значения) от 1 до 4% их номинальной мощности. Если взять данные обобщающего расчета по всем

регионам, то средний процент рабочей нагрузки единичной станции составляет порядка 2% при средней установленной номинальной мощности 1,96 кВт. Кстати, вот я и подошел к тому, почему в расчетах выше я использовал СКЗ номинальной мощностью 2,0 кВт.

Ну что же, попробуем произвести расчеты экономических показателей двух типов станций катодной защиты, опираясь на полученные результаты.

К сожалению, по реальным рабочим режимам СКЗ инверторного типа требуемой номинальной мощности, у меня очень скудная информация. Тем не менее есть данные о работе инверторной СКЗ (2,0 кВт), работающей в режиме 1% от номинальной мощности. В этом режиме, она обеспечивает КПД 19%

Так же, имеются данные по СКЗ трансформаторного типа (2,0 кВт) при работе в режиме 1,5% от номинальной мощности, обеспечивая КПД 45,5%.

Т.е. я снова буду позволять себе некоторые допуски, надеюсь, не умаляя достоинств инверторов, да и не дадут мне ошибиться коллеги. Если что, буду рад Вашим замечаниям и указаниям на, возможно, допущенные мною ошибки.

Предположу, что дополнительные 0,5% (10Вт) нагрузки для инвертора увеличат его показатель КПД в 2 раза и он составит 38%.

Потребление электроэнергии инверторной СКЗ номинальной мощностью 2,0 кВт, работающей в режиме 1,5% от номинальной мощности, при показателе КПД=38% (допущение по причине отсутствия реальной величины характеристики), составит:

за сутки – $2,0 \text{ кВт} \times 0,015 / 0,38 \times 24 \text{ ч.} = 1,89 \text{ кВт*ч}$,

за год – $1,89 \text{ кВт*ч} \times 365 = 689,8 \text{ кВт*ч}$,

за срок службы 15 лет – $689,8 \text{ кВт*ч} \times 15 = 10\,347 \text{ кВт*ч}$.

Потребление электроэнергии трансформаторной СКЗ номинальной мощностью 2,0 кВт с емкостно-индуктивным фильтром, работающей в режиме 1.5% от номинальной мощности, при показателе КПД=45% (реально измеренная величина на производимых СКЗ), составит:

за сутки – $2,0 \text{ кВт} \times 0,015 / 0,45 \times 24 \text{ ч.} = 1,56 \text{ кВт*ч}$,

за год – $1,56 \text{ кВт*ч} \times 365 = 569,4 \text{ кВт*ч}$,

за срок службы 15 лет – $569,4 \text{ кВт*ч} \times 15 = 8\,541 \text{ кВт*ч}$.

Возвращаясь к расчету экономической эффективности, снова используя средний тариф на электроэнергию 10,12 руб. за 1 кВт*ч (по РО, апрель 2025), получим, что экономия по расходам, теперь уже в случае с применением трансформаторной СКЗ, составит:

$(689,8 - 569,4) \times 10,12 \text{ руб.} = 1\,218,4 \text{ руб.}$ в год или за 15-тилетний срок службы - $(10\,347 - 8\,541) \times 10,12 = 18\,277 \text{ руб.}$

Таким образом, на основании приведенных данных и расчетов, считаю утверждение «Инверторные СКЗ имеют более высокий коэффициент полезного действия по сравнению с трансформаторными, к тому же КПД трансформаторных СКЗ резко падает при уменьшении нагрузки» весьма спорным.

По канонам написания статьи, дальше должен бы последовать раздел с важным названием «Выводы», но, если позволите, я заменю его разделом с другим названием – «Вопросы».

Первый вопрос. У меня присутствует навязчивое ощущение, что затраты на обслуживание и ремонт при эксплуатации СКЗ инверторного типа несколько выше, чем у трансформаторного. Это может быть обусловлено как элементной базой преобразователей/выпрямителей, так и необходимой квалификацией обслуживающего

персонала более высокого уровня, по причине серьезной разницы в сложности схемотехники преобразователей. Не обладая опытом обслуживания инверторных СКЗ на постоянной основе, я не могу оценивать уровень и состав этих расходов. Со своей стороны буду очень признателен, если кто-то сможет поделиться своим опытом и знаниями в этой части. Пока же вопрос следующий: маловероятно, но допустим, что эксплуатационные расходы у трансформаторных и инверторных СКЗ сопоставимы, однако изначальная стоимость инверторных СКЗ заведомо выше. Отбивается ли эта разница первичных затрат экономией на энергопотреблении?

Второй вопрос вытекает из первого. При учете экономических показателей эффективности, не стоит ли комплексно оценивать параметры и аспекты, связанные с эксплуатацией и жизненным циклом оборудования для получения реальной картины, а не просто красивых цифр, вырванных из контекста?

Нет. Все-таки позволю себе сделать небольшой вывод, точнее, высказать свое субъективное мнение.

На мой взгляд, в современной жизни должны быть представлены станции обоих типов, и выбор для применения того или иного типа должен определяться комплексной оценкой условий планируемой эксплуатации приобретаемого оборудования для достижения реального экономического эффекта. В перечень этих самых оценочных условий, на мой взгляд, необходимо включать не только планируемый процент долговременной нагрузки, но и климатические условия конкретного региона эксплуатации, качество энергоснабжения, конфигурацию системы электрохимзащиты, реальную оценку уровня квалификации обслуживающего персонала и, наверное, немало других факторов, более известных эксплуатирующим службам и организациям на основании их опыта.

Оценивая вышеизложенную информацию, напрашивается основной вопрос, обозначенный в названии статьи: настолько ли однозначны преимущества СКЗ инверторного типа по отношению к трансформаторным? Может рано списывать последних со счетов?

На этом остановлюсь и буду благодарен всем коллегам за участие в обсуждении обозначенных вопросов в режиме открытого диалога.

Ссылка на статью:

https://www.esa-shop.ru/blogs/stati-obsuzhdeniya/invertor_vs_transformator

С уважением,
Вадим Первунин