



ПРОБЛЕМЫ ВЫБОРА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ПО УСЛОВИЮ НАСЫЩЕНИЯ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Д.С. Петров, Россия, г. Чебоксары, ПЦ «ЭКРА»

***Аннотация:** Рассмотрены проблемы обеспечения требуемого времени до насыщения ТТ при проектировании, проведен анализ эффективности мероприятий, снижающих риски неправильной работы устройств РЗ. Предложены два метода выбора ТТ, обеспечивающих правильную работу защит разных типов в условиях насыщения ТТ.*

***Ключевые слова:** трансформаторы тока, насыщение, релейная защиты, повреждения, погрешность.*

Введение

Согласно письму Минэнерго России №ЧА-3440/10 от 02.04.2019 г. «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты» и п.128 Правил технологического функционирования электроэнергетических систем, утвержденных постановлением Правительства РФ от 13.08.2018 №937, технические характеристики трансформаторов тока (ТТ) должны обеспечивать правильную работу устройств релейной защиты (РЗ) при коротких замыканиях (КЗ), в том числе при возникновении апериодической составляющей тока. Наличие значительной апериодической составляющей в токе КЗ приводит к насыщению магнитопровода ТТ и искажению формы кривой вторичного тока. В результате это может привести к ложной работе основных защит и быстродействующих ступеней резервных защит. По этой причине вышеупомянутыми руководящими документами предписано обеспечить правильную работу устройств РЗ путем сравнения расчетного времени до насыщения ТТ, определенного по методикам ПНСТ 283-2018 и ГОСТ Р 58669-2019, с минимальным временем достоверного измерения значения тока, необходимым для устройства защиты. При неудовлетворительных результатах предписано разработать мероприятия, исключающие риски неправильной работы РЗ в условиях насыщения ТТ. В итоге такой метод «борьбы» с насыщением ТТ приводит к ряду проблем на всех уровнях взаимодействия субъектов электроэнергетики:



– в подавляющем большинстве случаев из-за наличия высокого уровня остаточной намагниченности (до 86%) ТТ с классом точности 5Р, 10Р не могут обеспечить требуемое время до насыщения для правильной работы защиты, из-за чего возникает необходимость в их замене на ТТ с немагнитным зазором или применении других дорогостоящих мероприятий (увеличение сечения контрольных кабелей и др.). Поскольку существующий метод оценки влияния насыщения ТТ на работу устройств РЗ не учитывает индивидуальные особенности работы разных типов защит и выполнение их элементной базы данное обстоятельство приводит к неоправданно большим экономическим затратам для собственников энергообъектов;

– для проектных организаций из-за отсутствия универсальной методики выбора ТТ с учетом насыщения, возникают трудности «подбора» приемлемых параметров ТТ при работе с заводами-изготовителями, что влечет за собой рассмотрение множества предложений производителей ТТ и большое количество итераций расчетов по ПНСТ 283-2018 и ГОСТ Р 58669-2019, на что задействуются большие резервы производственного времени.

Из вышеизложенного возникает необходимость в пересмотре существующих подходов по обеспечению правильной работы устройств РЗ в условиях насыщения ТТ.

Анализ эффективности мероприятий, снижающих риски неправильной работы устройств релейной защиты

Меры, снижающие риски неправильной работы устройств РЗ в условиях насыщения ТТ, следующие:

- увеличение сечения контрольных кабелей вторичных цепей, подключаемых к ТТ (уменьшение вторичной нагрузки);
- повышение номинальной вторичной нагрузки ТТ;
- повышение номинальной предельной кратности ТТ;
- изменение номинального вторичного тока ТТ с 5А на 1А;
- повышение номинального первичного тока ТТ;
- применение ТТ с немагнитным зазором (PR, TPY, TPZ) и ограничением остаточной намагниченности не более 10%.

Оценим эффективность данных мероприятий на примере ТТ, находящегося в определенном переходном режиме. Выпол-



няется расчет времени до насыщения ТТ по ПНСТ 283-2018 (или ГОСТ Р 58669-2019) с учетом всех вышеуказанных мероприятий. Результаты расчетов сведены в таблицу. Поскольку для правильной работы большинства видов защит необходимы данные в течение одного периода измеряемого сигнала с учетом работы АЦП, полученные значения времени до насыщения ТТ должны быть выше 20 – 30 мс.

Таблица

Анализ эффективности мероприятий, снижающих
риски неправильной работы устройств РЗ

№ пп	Мероприятие, снижающее риск неправильной работы устройств РЗ	A , о.е.	$t(0)$, мс	$A(1-Kr)$, о.е.	$t(0,86)$, мс
1	Исходные данные: ТТ-110кВ 600/5,10Р,30ВА/10, $Z_{НОМ} = 1,2$ Ом, $R_2 = 0,174$ Ом, $X_2 = 0,016$ Ом, $Z_{2.ФАКТ} = 0,936$ Ом, $I_{КЗ} = 2274$ А, $T_a = 0,018$ с	4,457	30	0,624	6
2	Увеличение сечения кабеля (уменьшение вторичной нагрузки) с 2,5 до 6 мм ²	7,394	нет насы- щения	1,035	7
3	Повышение номинальной вторичной нагрузки ТТ с 30 до 50 ВА	5,728	35	0,802	7
4	Повышение номинальной предельной кратности ТТ с 10 до 30 о.е.	10,208	нет насы- щения	1,429	8
5	Повышение номинальной предельной кратности ТТ до 30 о.е. и номинальной вто- ричной нагрузки до 50 ВА	14,453	нет насы- щения	2,023	9
6	Повышение номинальной предельной кратности ТТ до 30 о.е. за счет меньшей номи- нальной вторичной нагрузки (10 ВА)	4,381	30	0,613	6
7	Изменение номинального вторичного тока ТТ с 5 А на 1 А	16,397	нет насы- щения	2,296	10



Продолжение таблицы

№ п.п.	Мероприятие, снижающее риск неправильной работы устройств РЗ	A , о.е.	$t(0)$, мс	$A(1-Kr)$, о.е.	$t(0,86)$, мс
8	Повышение номинального первичного тока ТТ с 600 А до 1000 А	6,613	нет насы- щения	0,926	7
9	Изменение номинального вторичного тока ТТ на 1 А и повышение номинального первичного тока до 1000 А	20,615	нет насы- щения	2,886	11
10	Комплексное применение мероприятий, снижающих риск неправильной работы устройств РЗ: ТТ-110кВ 600/1,10Р,30ВА/30, $Z_{НОМ} = 30$ Ом, $R_2 = 6,002$ Ом, $X_2 = 1,451$ Ом, $Z_{2.ФАКТ} = 0,915$ Ом, $I_{КЗ} = 2274$ А, $T_a = 0,018$ с	41,144	нет насы- щения	5,760	34
11	Замена ТТ с классом точно- сти 10Р на ТТ с классом точности 10PR с аналогич- ными параметрами и огра- ничением остаточной намагниченности до 10%	5,821	нет насы- щения	5,239	33

По результатам, представленным в таблице, можно сделать следующие выводы:

1. В переходных режимах характеристики ТТ с классом точности 10PR показывают себя лучше ТТ с классом точности 10Р с аналогичными параметрами. Это достигается за счет немагнитного зазора, что заметно изменяет свойства намагничивания ТТ: ВАХ из прямоугольной преобразуется в более наклонную характеристику и удается ограничить уровень остаточной намагниченности до 10%. Но есть и недостаток: ТТ с немагнитным зазором (5PR, 10PR, TPY, TPZ) имеют габаритные размеры, превышающие габаритные размеры магнито замкнутых ТТ (5Р, 10Р), из-за чего их применение не всегда выполнимо.

2. Уменьшение вторичной нагрузки (увеличение сечения кабеля) имеет наименьшее влияние на увеличение времени до



насыщения ТТ. Кроме того, на протяженных участках завышенное увеличение сечения кабеля для улучшения условий ТТ с классом точности 10Р при его насыщении может быть экономически нецелесообразным.

3. Повышение номинальной предельной кратности и номинальной вторичной нагрузки ТТ более значительно влияет на увеличение времени до насыщения, но может привести к неоправданно бóльшим размерам ТТ.

4. Изменение коэффициента трансформации ТТ (повышение номинального первичного тока ТТ, изменение номинального вторичного тока ТТ с 5А на 1А) позволяет значительно увеличить время до насыщения до минимально необходимого значения, но может привести к вынужденному загроблению установки и, как следствие, меньшей чувствительности защиты.

Выявленные проблемы и предложения по их устранению

Согласно вышеизложенным выводам наиболее приемлемым решением является замена ТТ с классом точности 10Р на ТТ с немагнитным зазором, но это повлечет за собой значительные экономические вложения. Кроме того, следует понимать, что существующий метод сравнения времени до насыщения ТТ в режиме КЗ с минимально необходимым временем измерения значений тока устройством РЗ, является скорее избыточным, а не достаточным условием для правильной работы защит, т.к. не учитывает их индивидуальные особенности работы. Это может привести к неоправданно завышенным характеристикам ТТ, которые в ряде случаев будет невозможно выполнить производителям ТТ. Например, для защит оборудования собственных нужд станций ТТ могут не обеспечивать минимально необходимое время до насыщения даже при отсутствии остаточной намагниченности и даже при применении ТТ с немагнитным зазором, а для электромеханических и микроэлектронных защит при рассмотрении в качестве условия правильной работы реле критерий обеспечения отключения КЗ (срабатывание защиты + отключение выключателя) требуемое время до насыщения может составлять 100 – 200 мс. ТТ, обеспечивающий такое время до насыщения, изготовить на практике затруднительно, особен-



но для сети со значительной постоянной времени затухания апериодической составляющей.

Объективным решением «проблемы насыщения» является следующее:

– разработка новых принципиальных методических указаний, учитывающих индивидуальные особенности работы разных типов защит при насыщении ТТ и выполнение их элементной базы (для МП УРЗ примером такой методики является ЭКРА.650323.085 Д «Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока»);

– переосмысление существующих методик выбора уставок устройств РЗ разных типов с учетом насыщения ТТ и наличием в них остаточной намагниченности. Реализация данной задачи является приоритетной, поскольку она может разрешить проблему влияния насыщения ТТ на работу устройств РЗ.

Другие проблемы касаются организационно-технического уровня: в ТЗ уже на стадии ПД предъявляются требования по расчету времени до насыщения по ПНСТ 283-2018 и ГОСТ Р 58669-2019. Принцип расчета времени до насыщения ТТ по ПНСТ 283-2018 учитывает параметры, когда известен тип ТТ и его характеристики, предоставленные заводом-изготовителем ТТ, в связи с чем выполнить расчет на стадии ПД при новом строительстве объектов электроэнергетики представляется невозможным без предварительного определения конкретного завода-изготовителя, который эти данные предоставит. Расчет по ГОСТ Р 58669-2019 аналитическим методом и графическим методом по паспортным данным может применяться на стадии ПД, в том числе и при новом строительстве объектов электроэнергетики, т.к. за счет ПХН-аппроксимации учитываются только паспортные (проектные) параметры ТТ, но ввиду того, что на стадии ПД часто не определены тип и производитель оборудования РЗ, неясно какое время до насыщения ТТ необходимо обеспечивать. Следовательно, требуется методика выбора ТТ на стадии ПД, в которой будет учитываться переходный режим, сопровождающийся насыщением, и которая оптимизирует работу проектировщиков, позволяя сузить круг предлагаемых пара-



метров для производителей ТТ из множества вариантов к одному единственному.

Методика определения параметров трансформатора тока с учетом переходных режимов, сопровождающихся насыщением

Для решения проблемы выбора ТТ на стадии ПД с учетом насыщения, ПЦ «ЭКРА» предлагает к рассмотрению две упрощенные методики, учитывающие особенности работы разных типов защит и выполнение их элементной базы независимо от производителя релейной аппаратуры.

1. Графический метод (применим только для МП защит):

1) по напряжению установки выбирается номинальное напряжение ТТ;

2) по максимальному рабочему току присоединения выбирается номинальный первичный ток ТТ;

3) вторичный ток ТТ принимается 5А или 1А;

4) определяется сопротивление подключаемой нагрузки;

5) по сопротивлению подключаемой нагрузки выбирается номинальная вторичная нагрузка ТТ;

6) активное сопротивление вторичной обмотки ТТ определяется по усредненным значениям в зависимости от номинальной нагрузки ТТ с учетом количества витков на максимальной отпайке;

7) индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки ТТ не учитывается;

8) по средним соотношениям определяется постоянная времени вторичного контура ТТ;

9) по расчетным условиям для определенного типа защиты рассчитываются параметры переходного режима, строятся графики расчетных режимов;

10) относительно типа защиты и органов работы АЦП определяется минимально необходимое время достоверного измерения значения тока, при котором гарантируется правильная работа защиты в условиях насыщения ТТ;

11) на графики расчетных режимов наносится требуемое время до насыщения ТТ, которое необходимо обеспечить и относительно его пересечения с кривой определяется параметр



режима A , учитывающий соотношение между номинальными параметрами ТТ и необходимыми параметрами в месте его установки. Выбирается наибольшее значение параметра режима A ;

12) по расчетным параметрам п.2-8,10 определяется требуемая предельная кратность;

13) ТТ с расчетными параметрами проверяется на допустимую погрешность;

14) ТТ с расчетными параметрами проверяется по условию отсутствия опасных перенапряжений во вторичных цепях ТТ при максимальном токе КЗ;

15) ТТ с расчетными параметрами проверяется по условию электродинамической и термической стойкости.

Достоинства графического метода:

Результаты расчета соответствуют требованиям письма Минэнерго России №ЧА-3440/10 от 02.04.2019 г. и п.128 Правил технологического функционирования электроэнергетических систем, утвержденных постановлением Правительства РФ от 13.08.2018 №937. Методика учитывает расчетные условия переходных режимов для каждого вида защит. Рекомендуются для определения параметров ТТ с немагнитным зазором (PR, TPY, TPZ).

Недостатки графического метода:

Из-за наличия высокого уровня остаточной намагниченности (до 86%) данную методику не рекомендуется применять для ТТ с классом точности 5P, 10P, поскольку это может привести к невозможности выполнения выбранных параметров заводами-изготовителями ТТ (предельная кратность ТТ может достигать свыше 100 о.е.). Тем не менее, она позволяет оценить ориентировочные допустимые параметры ТТ с классом точности 5P, 10P. Методика не учитывает допустимую погрешность устройств защиты в начальный момент времени протекания переходного режима, т.е. до заданного времени насыщения ТТ должна обеспечиваться точная трансформация тока. Это приводит к неоправданно завышенным характеристикам ТТ.

2. Аналитический метод (применим для всех типов защит независимо от выполнения их элементной базы):



- 1) по напряжению установки выбирается номинальное напряжение ТТ;
- 2) по максимальному рабочему току присоединения выбирается номинальный первичный ток ТТ;
- 3) вторичный ток ТТ принимается 5А или 1А;
- 4) определяется сопротивление подключаемой нагрузки;
- 5) по сопротивлению подключаемой нагрузки выбирается номинальная вторичная нагрузка ТТ;
- 6) по расчетным условиям для определенного типа защиты рассчитываются параметры переходного режима;
- 7) определяется апериодический коэффициент, учитывающий величину апериодической составляющей тока КЗ относительно наличия остаточной намагниченности ТТ и допустимой погрешности определенного типа защиты;
- 8) выбирается требуемая предельная кратность относительно расчетных условий определенного типа защит;
- 9) ТТ с расчетными параметрами проверяется по условию отсутствия опасных перенапряжений во вторичных цепях ТТ при максимальном токе КЗ;
- 10) ТТ с расчетными параметрами проверяется по условию электродинамической и термической стойкости.

Достоинства аналитического метода:

Результаты расчета соответствуют требованиям п.128 Правил технологического функционирования электроэнергетических систем, утвержденных постановлением Правительства РФ от 13.08.2018 №937. Методика учитывает расчетные условия переходных режимов для каждого вида защит независимо от выполнения их элементной базы, а также их допустимую погрешность. Рекомендуется для определения параметров ТТ любых релейных классов точности (P, PX, PR, PRX, TPX, TPY, TPZ).

Недостатки аналитического метода:

Часто результаты расчета не соответствуют требованиям письма Минэнерго России №ЧА-3440/10 от 02.04.2019 г., поскольку параметры ТТ, рассчитанные по данной методике, не обеспечивают требуемое время до насыщения ТТ для правильной работы устройств РЗ. Тем не менее, выявлено, что при многократном моделировании различных переходных процессов влияние насыщения ТТ во всех случаях не оказывает суще-



ственного значения на работу защит, что еще раз подтверждает «избыточность» существующего подхода к проблеме насыщения ТТ.

Заключение

В настоящем докладе рассмотрены проблемы обеспечения требуемого времени до насыщения ТТ при проектировании, проведен анализ эффективности мероприятий, снижающих риски неправильной работы устройств РЗ в условиях насыщения ТТ. Выявлено, что лучшим решением является переосмысление существующих методик выбора уставок устройств РЗ разных типов с учетом насыщения ТТ и наличием в них остаточной намагниченности, что представляет собой более широкую задачу для исследования. В данной работе предложены два метода определения параметров ТТ с учетом переходных режимов, сопровождающихся насыщением, что позволит оптимизировать работу проектировщиков при выборе ТТ и обеспечить правильную работу защит разных типов независимо от выполнения их элементной базы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Королев Е.П., Либерзон Э.М.* Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия. – 1980. – 208 с.
2. *Шабад М.А.* Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние – 1985. – 296 с.
3. ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
4. ПНСТ 283-2018. Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока.
5. ГОСТ Р 58669-2019. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях.

Автор

Петров Дмитрий Сергеевич, магистр техники и технологии, инженер-проектировщик 2 категории, ПЦ «ЭКРА». E-mail: ds.petrov@list.ru.