

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

**ДИНАМИКА
НЕЛИНЕЙНЫХ
ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

**Материалы
XIV Всероссийской научно-технической
конференции**

ДНДС–2021

Чебоксары
2021

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

Д44

Редакционная коллегия:

ректор, канд. экон. наук, доцент *А.Ю. Александров*;

д-р техн. наук, профессор *Г.А. Белов*;

канд. техн. наук, доцент *А.В. Серебрянников*

Печатается по решению Ученого совета

Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова

Динамика нелинейных дискретных электротехнических
Д44 и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн.
конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. 536 с.

ISBN 978-5-7677-3286-9

Рассматриваются вопросы математических основ и математического моделирования нелинейных дискретных систем, цифровой обработки сигналов, построения и анализа устройств и систем силовой электроники, систем электроэнергетики и электропривода.

Для научных работников, инженеров, менеджеров и студентов старших курсов.

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

© Издательство

Чувашского университета, 2021

ISBN 978-5-7677-3286-9

8. *Edelsbrunner H., Kirkpatrick D. G., Seidel R.* On the shape of a set of points in the plane // *IEEE Transactions on Information Theory*. 1983. Vol. IT-29. No. 4. PP. 551–559.

9. *Al-Mestarehi B., Obaidat M.* Creating a Complete Model of the Wooden Pattern from Laser Scanner Point Clouds Using Alpha Shapes // *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 13. No. 2. PP. 269–279.

Наумов В.А., Солдатов А.В., Иванов Н.Г.,
Александрова М.И., Степанова Д.А.
(Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА»; ЧГУ)

ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Дифференциальная защита трансформатора (ДЗТ) является основной быстродействующей защитой силового трансформатора от всех видов коротких замыканий (КЗ). Для правильной работы ДЗТ при внешних и внутренних КЗ уставки защиты отстраиваются от небалансов в установившихся режимах КЗ. Однако опыт эксплуатации показал, что такой принцип настройки ДЗТ не гарантирует селективности и чувствительности защиты в переходных режимах с насыщением трансформаторов тока (ТТ). После нескольких случаев развития аварий, вызванных потерей селективности релейной защиты (РЗ) из-за насыщения ТТ в переходном режиме, был выпущен приказ Минэнерго России № 101 от 13 февраля 2019 г. [1] о необходимости проверки правильности работы РЗ при насыщении ТТ в переходных режимах. Согласно приказу технические характеристики устройств РЗ и автоматики должны содержать сведения о минимально необходимом сроке достоверного измерения значения тока – времени до насыщения, при котором обеспечивается надежная и селективная работа защиты.

В настоящей работе исследуется влияние насыщения ТТ на функционирование ДЗТ при внешних и внутренних КЗ.

Принцип работы ДЗТ. Принцип действия дифференциальной защиты (рис. 1) основан на пофазном вычислении дифференциального тока (i_d) защищаемой зоны и сравнении его с порогом срабатывания:

$$I_d > I_{op}, \quad i_d = i_1 + i_2,$$

где I_{op} – основная гармоника тока срабатывания; i_1 и i_2 – токи сторон защищаемого трансформатора.

ДЗТ состоит из чувствительного дифференциального измерительного органа (ДИО) и дифференциальной токовой отсечки (ДО). Чувствительный ДИО предназначен для выявления развивающихся повреждений с малыми токами. При внешнем повреждении или нарушении нормального режима работы через защищаемый объект протекает большой ток, вызывая увеличение дифференциального тока. Для предотвращения срабатывания от небаланса в этом режиме в чувствительной ступени ДЗТ реализовано торможение, т.е. увеличение тока срабатывания.

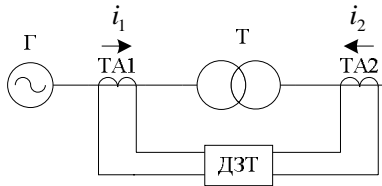


Рис. 1. Схема подключения ДЗТ

Зависимость порога срабатывания от тока внешнего КЗ задается при помощи тормозной характеристики

$$I_{op} = \begin{cases} I_{op,0}, & I_r \hat{=} [0; I_{r0,1}], \\ I_{op}(I_{r0,1}) + K_1(I_r - I_{r0,1}), & I_r \hat{=} (I_{r0,1}; I_{r0,2}], \\ I_{op}(I_{r0,2}) + K_2(I_r - I_{r0,2}), & I_r > I_{r0,2}, \end{cases}$$

где $I_{op,0}$ – ток срабатывания на горизонтальном участке; $I_{r0,1}$ и $I_{r0,2}$ – токи начала торможения первого и второго наклонных участков соответственно; K_1 и K_2 – коэффициенты торможения на первом и втором наклонных участках соответственно.

Тормозной ток вычисляется пропорционально сквозному току:

$$I_r = \begin{cases} \sqrt{I_1'^2 + I_2'^2} \cos(180^\circ - \alpha), & \text{если } \cos(180^\circ - \alpha) \geq 0, \\ 0, & \text{если } \cos(180^\circ - \alpha) < 0, \end{cases}$$

где I_1' и I_2' – приведенные токи первичной и вторичной обмоток соответственно; $\alpha = \angle(I_1', I_2')$ – угол между векторами I_1' и I_2' .

Для надежной отстройки от броска тока намагничивания в ДЗТ используют блокировку, запрещающую срабатывание защиты в режиме броска намагничивающего тока, когда относительное содержание второй гармонической составляющей в дифференциальном токе превышает уставку.

В ДЗТ предусмотрена дополнительная ступень ДО, предназначенная для быстрого отключения КЗ в режимах, когда чувствительная ступень может срабатывать с замедлением, например, из-за насыщения ТТ. ДО срабатывает при превышении основной гармоники дифференциального тока порога срабатывания отсечки ($I_{op,c}$):

$$I_d > I_{op,c}.$$

Функционирование ДЗТ в условиях внешнего КЗ при тяжелых насыщениях ТТ. В настоящее время в энергосистеме используются ТТ с замкнутым магнитопроводом классов 10Р и 5Р. Главной причиной насыщения ТТ в переходных режимах является наличие аperiodической составляющей в первичном токе. Она вызывает «накопление» магнитной индукции и может приводить к насыщению ТТ даже при относительно малой кратности амплитуды тока КЗ. Усугубляет положение и остаточная индукция в магнитопроводе, которая может достигать 85-95% [2] от индукции насыщения, поскольку она значительно сокращает интервал точной трансформации, который может составлять всего несколько мс. Кроме того в переходном режиме насыщение ТТ может наступить даже если в установившемся режиме ТТ работает без насыщения.

Насыщение ТТ приводит к уменьшению амплитуды и искажению фазы основной гармоники вторичного тока (рис. 2). Это приводит к увеличению дифференциального тока и уменьшению тормозного тока в режимах внешнего КЗ и может служить причиной потери селективности защиты. Наиболее тяжелые условия для ра-

боты ДЗТ возникают, когда насыщается ТТ одной из сторон, в то время как ТТ других сторон работают без насыщения.

На рис. 3 приведен типичный годограф дифференциального тока при внешнем КЗ с насыщением одной из сторон ТТ в переходном режиме. Анализ годографа показал следующее:

1. Годограф в переходном режиме попадает в зону срабатывания чувствительной ступени и находится в этой зоне практически до момента выхода ТТ из насыщения. Это создает условия для неселективной работы чувствительной ступени защиты.

2. В течение существенной части времени, когда годограф находится в зоне срабатывания чувствительной ступени, срабатывание этой ступени запрещается блокировкой по второй гармонике. Тем не менее блокировка по второй гармонике не способна обеспечить надежную отстройку от неселективного срабатывания.

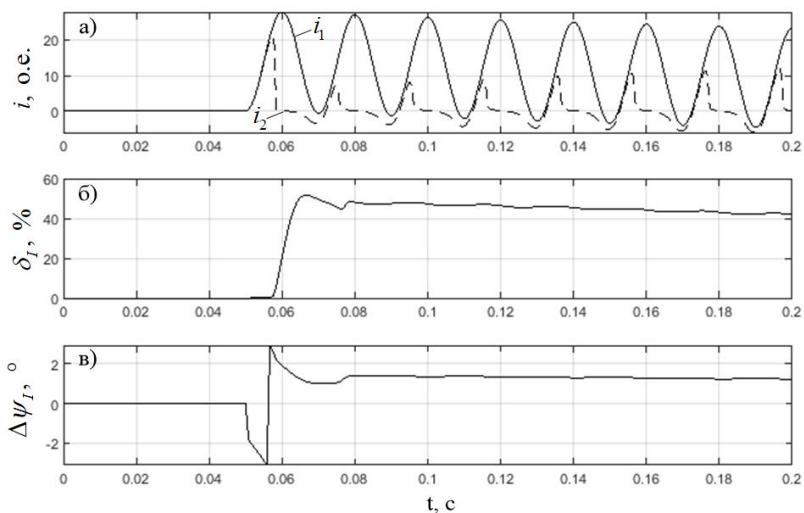


Рис. 2. Токи ТТ при его насыщении в переходном режиме в условиях внешнего КЗ (а); амплитудная (б) и фазовая (в) погрешности ТТ;

i_1 и i_2 – первичный и приведенный вторичный ток ТТ

3. Дифференциальный ток в переходном режиме многократно превышает порог срабатывания чувствительной ступени. В связи с этим представляется невозможной отстройка чувствительной ступени ДЗТ от излишних срабатываний за счет за-

грубления тормозной характеристики с сохранением требуемой чувствительности к внешним КЗ.

4. В установившемся режиме КЗ годограф находится за пределами зоны срабатывания, т.к. тормозная характеристика защиты отстроена от небаланса в этом режиме.

Как видно на рис. 3, статическая тормозная характеристика не позволяет отстроить защиту от срабатывания при насыщении ТТ в переходном режиме. Для сохранения селективности в ДЗТ должен быть предусмотрен специальный алгоритм, обеспечивающий выявление признаков насыщения ТТ в переходном режиме и повышающий пороги срабатывания чувствительной ступени и ДО на время существования этих признаков, или вводящий в действие дополнительный критерий срабатывания.

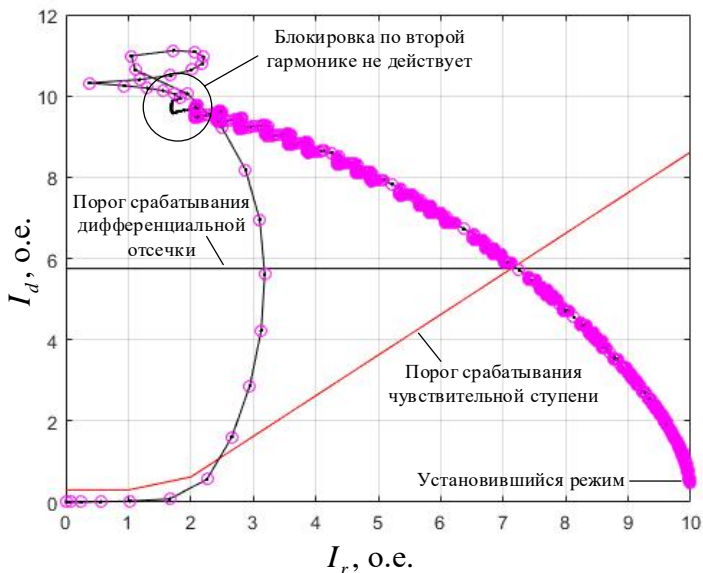


Рис. 3. Годограф дифференциального тока при внешнем КЗ при насыщении ТТ с одной стороны. Кратность тока внешнего КЗ составляет 10 о.е., начальная фаза тока КЗ – 90° , время до насыщения ТТ – 7 мс, постоянная времени апериодической составляющей – 350 мс. Маркерами отмечены точки годографа, в которых действие чувствительной ступени ДЗТ запрещено блокировкой по второй гармонике

Функционирование ДЗТ в условиях внутреннего КЗ при тяжелых насыщениях ТТ. Насыщение ТТ приводит к появлению высших гармоник в дифференциальном токе и снижает уровень дифференциального тока. Высшие гармоники могут приводить к замедлению чувствительной ступени из-за действия блокировки по второй гармонике, а снижение дифференциального тока в переходном режиме может вызывать замедление ДО. В результате насыщения ТТ быстродействие ДЗТ может недопустимо ухудшиться.

Исследования показали, что чувствительная ступень ДЗТ срабатывает всегда, однако при малых значениях времени до насыщения она замедляется из-за действия блокировки по второй гармонике (рис. 4). Длительность замедления чувствительной ступени защиты зависит не от кратности тока КЗ, а от постоянной времени аperiodической составляющей и начальной фазы периодической составляющей тока КЗ. Максимальное замедление наблюдается при максимальной постоянной времени и начальной фазе периодической 90° и может достигать 1,2 с (при постоянной времени $\tau = 350$ мс).

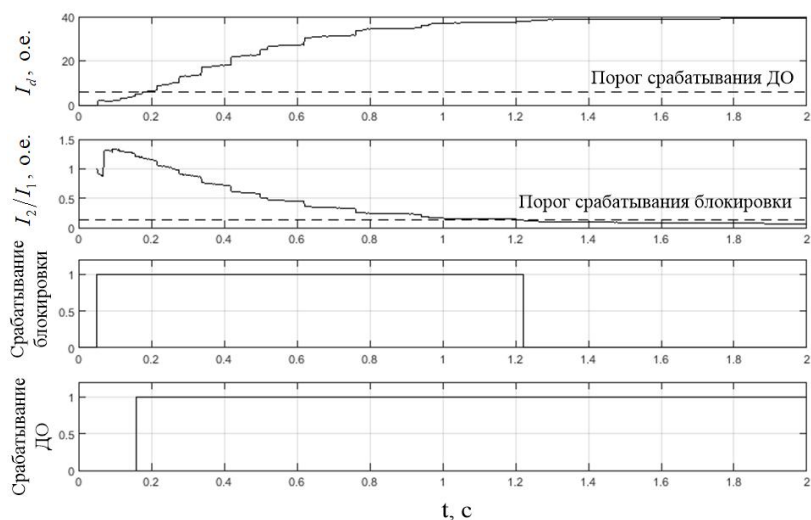


Рис. 4. Иллюстрация замедления чувствительной ступени защиты при внутреннем КЗ

Быстродействие защиты при тяжелом насыщении ТТ призвано сохранить ДО, но в переходном режиме при насыщении ТТ защита может замедляться, т.к. дифференциальный ток может стать меньше порога её срабатывания. Наихудшие условия для работы ДО создаются при минимальной кратности тока КЗ и минимальном времени до насыщения ТТ.

Исследования показали, что время срабатывания ДО, реагирующей на основную гармонику дифференциального тока, полученную при помощи фильтра Фурье, не превышает допустимые 40 мс [3–4] при времени до насыщения не менее 8 мс при кратности тока КЗ 10 о.е. и не менее 5 мс при кратности тока КЗ 40 о.е. (рис. 5). При меньших временах до насыщения ТТ срабатывание ДЗТ при внутренних КЗ может происходить с недопустимым замедлением.

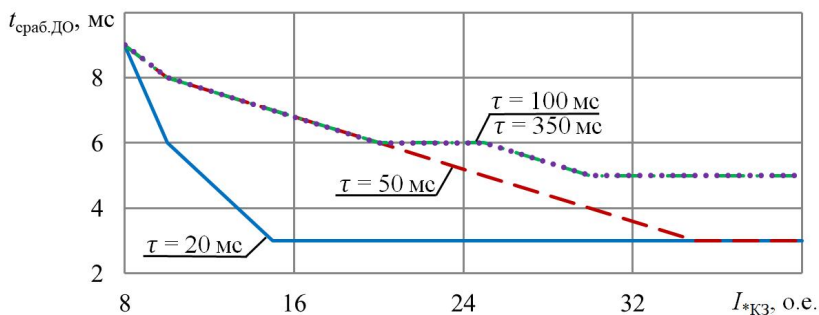


Рис. 5. Зависимость минимального времени до насыщения ТТ, при котором время срабатывания ДО не превышает 40 мс, от кратности тока внутреннего КЗ

Выводы

1. Выбор уставок ДЗТ на основе расчетов установившихся режимов не позволяет гарантировать надежную работу ДЗТ при насыщении ТТ в переходных режимах.

2. Статические тормозные характеристики обеспечивают сохранение селективности защиты при внешних КЗ с насыщением ТТ. Для селективной работы ДЗТ в этих режимах должны предусматриваться специальные алгоритмы, выявляющие признаки насыщения ТТ в переходном режиме и повышающие пороги срабатывания чувствительной ступени и ДО на время существования этих признаков, или вводящие в действие дополнительный критерий срабатывания.

3. Небаланс в переходных режимах при внешних КЗ может существенно превышать ток срабатывания ДО. Для сохранения селективности нужны специальные алгоритмы блокирования отсечки при внешних КЗ.

4. При внутреннем КЗ с тяжелым насыщением ТТ происходит замедление чувствительной ступени ДЗТ на время до 1,2 с. Быстрое отключение повреждения в этих режимах должна обеспечивать ДО. Срабатывание ДО с быстродействием не хуже 40 мс обеспечивается при временах до насыщения ТТ не менее 5-8 мс (в зависимости от кратности тока КЗ).

Литература

1. Об утверждении требований к оснащению линий электропередачи и оборудования объектов электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше устройствами и комплексами релейной защиты и автоматики, а также к принципам функционирования устройств и комплексов релейной защиты и автоматики: Приказ Минэнерго России № 101 от 13 февраля 2019 г. 44 с.

2. Determining CT Requirements for Generator and Transformer Protective Relays / R. Chowdhury [et al.] // 46th Annual Western Protective Relay Conference. Spokane, Washington. 2019. PP. 1–14.

3. Засыпкин А. С. Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 240 с.

4. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА (с изменениями от 11.12.2019), ПАО «ФСК ЕЭС» 357 с.

Иванов М.О.^{1,2}, Кудряшова М.Н.¹, Солдатов А.В.^{1,2},
Антонов В.И.^{1,2}, Иванов Н.Г.^{1,2}
(Чебоксары, ¹ООО НПП «ЭКРА», ²ЧГУ)

ЦИФРОВАЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРА ОТ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ НА БАЗЕ ТЕРМИНАЛОВ ЭКРА 200

Сложность обеспечения селективности и чувствительности защиты от однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) статора генератора, работающего на сборные шины, обусловлена наличием гальванической связи с сетью и другими генераторами. С другой стороны,

Научное издание

**ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции

Материалы публикуются в авторской редакции.

*Ответственность за достоверность цитат, имён, названий
и иных сведений, а также за соблюдение законов
об интеллектуальной собственности
несут авторы представленных статей*

Отв. за выпуск *А.В. Серебрянников*

Согласно Закону № 436-ФЗ от 29 декабря 2010 года
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 28.05.2021. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times.

Усл. печ. л. 31,15. Уч.-изд. л. 30,88. Тираж 300 экз. Заказ № 604

Отпечатано в соответствии с представленным оригинал-матетом
в типографии Чувашского государственного университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15