

УДК 621.316.925.1
Шифр специальности ВАК 2.4.2., 2.4.3., 2.4.5.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ 6–35 кВ

Целью исследования является выявление новых информационных признаков, позволяющих отличить пусковые режимы энергетических установок от режимов короткого замыкания. Рассмотрена динамика изменения составляющих полного тока (КЗ) фазы сети среднего напряжения в имитационной модели в номинальном, пусковом режимах и при КЗ. Выявлено наличие существенного изменения активной и реактивной составляющих тока в случае КЗ. Полученные результаты могут использоваться для повышения чувствительности защит путем введения дополнительного логического органа.



Распределительное устройство 10 кВ

Фото: А.А. Колесников

АВТОРЫ:
Д.С. Демидов,
ORCID ID 0009-0006-8556-7891,
ООО НПП «Микропроцессорные технологии»
А.А Колесников, к. т. н.,
ORCID ID 0000-0002-3907-9591,
ООО НПП «ОВИСТ»
А.Л. Куликов, д. т. н., профессор,
ORCID ID 0000-0003-1092-7136,
anton8094@mail.ru,
ФГБОУ ВО «Нижегородский
государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева»

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#переходный процесс;
#релейная защита; #самозапуск
электродвигателей

↓ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Демидов Д.С., Колесников А.А.,
Куликов А.Л. Использование
активной и реактивной
составляющих тока для
идентификации коротких
замыканий в сетях среднего
напряжения 6–35 кВ // Энергия
единой сети. 2025. № 5–6. С. 12–16.

©©

ВВЕДЕНИЕ

Распределение электроэнергии осуществляется в основном сетями 6–35 кВ. Как правило, такие сети являются наиболее аварийными ввиду их естественного износа, отсутствия надлежащего и своевременного эксплуатационного обслуживания, недостаточной технической оснащенности, а также вследствие некорректных решений, принимаемых на этапе проектирования и строительства. Большая протяженность также увеличивает вероятность возникновения повреждений. В сетях 6–35 кВ на одиночных линиях с односторонним питанием от многофазных замыканий должна устанавливаться двухступенчатая токовая защита, первая ступень которой выполнена в виде токовой отсечки, а вторая, охватывающая линию целиком, — в виде максимальной токовой защиты (МТЗ) с независимой или зависимой характеристикой выдержки времени.

Ток срабатывания МТЗ выбирают по наиболее тяжелым условиям симметричных режимов, что определяет один из основных недостатков существующих токовых защит — недостаточную чувствительность во многих случаях несимметричных коротких замыканий (КЗ) [1]. При определении тока срабатывания МТЗ учитывают увеличение тока защищаемой линии вследствие самозапуска электродвигателей (ЭД) нагрузок [2] при восстановлении напряжения после отключения КЗ (выражение (1)), а учет производят с помощью коэффициента самозапуска $K_{сзп}'$, численное значение которого при расчетах может достигать 2,5–3 и более [3].

$$I_{с.з.} = \frac{K_n \cdot K_{сзп}}{K_b} \cdot I_{раб.макс.}' \quad (1)$$

где K_n — коэффициент надежности, который зависит от используемых в МТЗ реле;
 K_b — коэффициент возврата.

Точное определение коэффициента $K_{сзп}$ для нагрузки до 1 кВ на практике затруднено ввиду отсутствия полных данных о составе нагрузок, характеристиках и загрузке двигателей и др. Определить опытным путем расчетные уставки по месту на энергетическом объекте, как правило, невозможно из-за сложности технологических процессов энергетического производства и требований к их непрерывности. Другой подход состоит в подборе $K_{сзп}$ в зависимости от типа потребителя — промышленные, сельские, городские [4]. В итоге при расчетах в большинстве случаев приходится идти на загромождение уставок, что негативно сказывается на основных показателях релейной защиты объекта — чувствительности и надежности [5, 6]. В то же время продолжительность существования режимов, от которых производится отстройка, мала по сравнению со временем работы оборудования в более «легких» (нормальных) условиях эксплуатации.

Значительная часть линий напряжением до 6–35 кВ питает маломощные трансформаторные подстанции, защищаемые со стороны высокого напряжения предохранителями. Становится актуальной проблема дальнего резервирования защит трансформаторов, что подтверждается рядом публикаций [7, 8], в которых определена сложность выявления КЗ на стороне выше-

го напряжения маломощных трансформаторов в связи с низкими уровнями аварийных составляющих токов в месте установки защит.

Следует также отметить, что на линиях, максимальные рабочие токи которых сопоставимы с токами КЗ в конце линий, традиционные токовые защиты, реагирующие на полные токи фаз, могут не удовлетворять требованиям нормативных документов по чувствительности. Таким образом, защита становится нечувствительной к токам КЗ не только в резервной, но и в основной зоне.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость повышения технического совершенства как токовых защит самого объекта, так и защит, осуществляющих дальнейшее резервирование.

Одним из подходов по совершенствованию токовых защит распределительных сетей является выявление новых информационных признаков, благодаря которым появляется возможность отличить пусковые режимы энергетических установок от режимов КЗ, в том числе при отсутствии информации о составе и характеристиках нагрузки. В результате исключается необходимость отстройки (выражение (1)) от режимов пуска и самозапуска ($K_{сзп} = 1$).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье проанализирована возможность использования активной и реактивной составляющих тока фазы для выявления новых информационных признаков, однозначно определяющих режимы пуска, нормального режима и КЗ.

На рис. 1 представлены участок распределительной сети 10 кВ и соответствующая схема замещения. Нагруз-

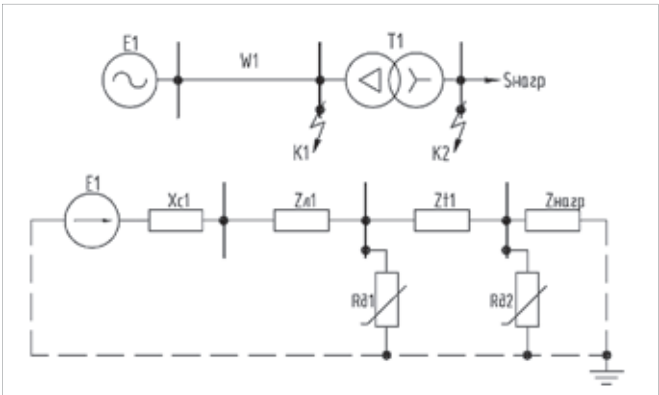


Рис. 1. Участок распределительной сети 10 кВ и схема замещения
Обозначения: $E1$ — система электроснабжения с результирующей ЭДС $E1$; $T1$ — силовой трансформатор 10/0,4 кВ; $W1$ — линия электропередачи (ЛЭП); $S_{нагр}$ — нагрузка, подключенная к шинам 0,4 кВ; $K1, K2$ — рассматриваемые точки КЗ; $z_{с1}$ — сопротивление системы электроснабжения; $z_{л1}$ — сопротивление системы электроснабжения; $z_{т1}$ — сопротивление силового трансформатора; $z_{нагр}$ — сопротивление нагрузки; $Rd1$ — сопротивление дуги при КЗ в точке $K1$; $Rd2$ — сопротивление дуги при КЗ в точке $K2$.

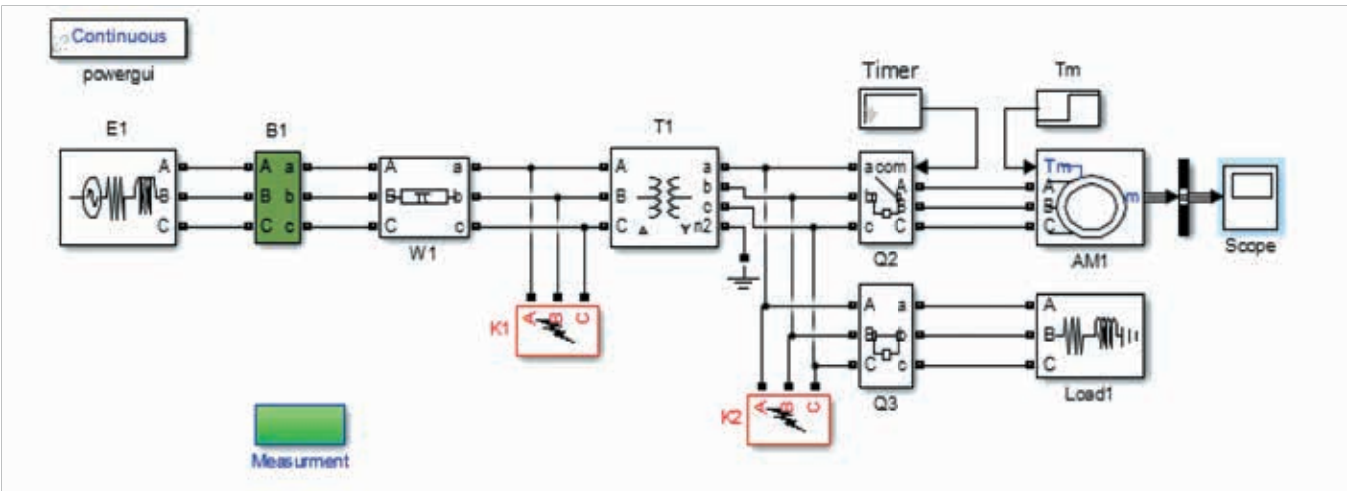


Рис. 2. Имитационная модель распределительной сети

ка трансформатора 10/0,4 кВ смешанная и содержит как статическую нагрузку, так и двигательную.

Полный ток фазы линии в общем случае содержит активную и реактивную составляющие [10]:

$$I_{\Phi} = \sqrt{I_{\text{акт}}^2 + I_{\text{реакт}}^2}, \tag{2}$$

где $I_{\text{акт}}$ – активная, $I_{\text{реакт}}$ – реактивная составляющая полного тока фазы.

Величины составляющих полного тока фазы зависят от мощности нагрузки и коэффициента мощности. При

изменении режимов работы электроустановок также изменяются величины составляющих полного тока фазы. Следовательно, возможно использование дополнительной информации о составляющих токов фаз для идентификации нормальных и аварийных режимов [11].

Целесообразно проанализировать следующие предположения:

- при КЗ в точках K1 и K2 (рис. 1) значительно уменьшается активная составляющая тока и увеличивается реактивная;
- при пусках ЭД происходит увеличение как активной, так и реактивной составляющей тока, при этом отношение их друг к другу остается без изменений;
- при КЗ изменения активной и реактивной составляющих токов носят более динамичный характер, чем при прямых пусках ЭД;
- при включении силового трансформатора на холостой ход (ХХ) происходит увеличение реактивной составляющей тока [12].

В ходе исследований была разработана имитационная модель распределительной сети с асинхронными двигателями (АД) в программном пакете Matlab/Simulink. На рис. 2 приведена имитационная модель участка распределительной сети, которая позволяет получить динамические характеристики АД, статической нагрузки, величины составляющих полных токов фаз линии и исследовать поведение составляющих тока в нормальных и аварийных режимах работы системы электроснабжения.

Питание силового трансформатора 10/0,4 кВ (Т1) (рис. 2) осуществляется от шин 10 кВ конечной мощности проводом АС-70/11 (w1). Модель учитывает наличие на стороне 0,4 кВ как статической (Load1), так и двигательной (AM1) нагрузки. При проведении имитационных экспериментов учитывалось влияние механических характеристик электропривода.

Разработанная модель (рис. 2) позволила получить необходимую информацию для анализа пусковых режимов

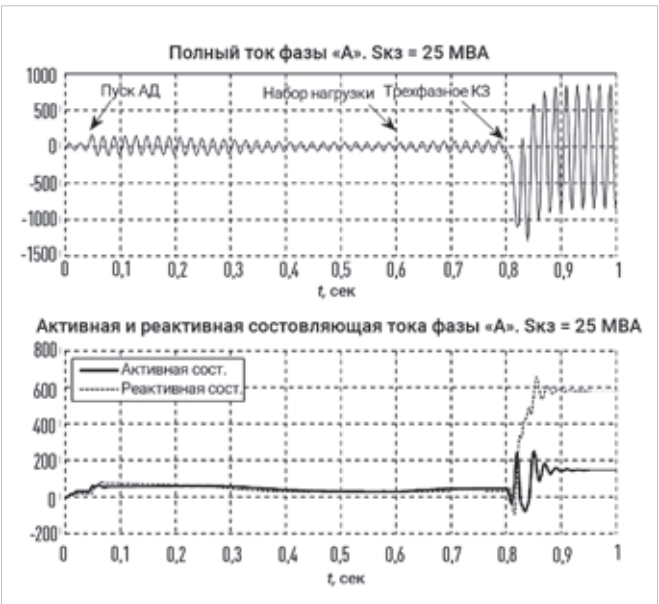


Рис. 3. Полный ток фазы «А» и составляющие токов фазы «А» при S_{к3} = 25 MVA

АД. Способ пуска асинхронных двигателей – прямой пуск. Он представляет собой подсоединение обмоток двигателя непосредственно к сети без изменения электрических параметров сети. При пуске двигатель развивает большой пусковой ток, в 5–7 раз превышающий номинальный. Двигатели питаются от вторичной обмотки низшего напряжения силового трансформатора напрямую.

Для рассмотрения динамики изменения составляющих полного тока фазы распределительной сети рассматриваются следующие режимы:

- пусковой режим асинхронного двигателя;
- холостой ход;
- номинальный режим;
- режим набора нагрузки асинхронным двигателем;
- режим симметричного КЗ на стороне 0,4 кВ трансформатора;
- режим несимметричного КЗ на стороне 0,4 кВ трансформатора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 3 приведены результаты моделирования режимов пуска, холостого хода, набора нагрузки и трехфазного КЗ на стороне 0,4 кВ. Мощность системы КЗ (S_{к3}) при этом составляет 25 MVA.

Анализ рис. 3 показывает, что при трехфазном КЗ на стороне 0,4 кВ активная и реактивная составляющие полного тока фазы «А» имеют ряд особенностей:

- в момент пуска АД (t = 0,05 с) изменения активной и реактивной составляющих носят более плавный характер, без резких колебаний и на меньшем интервале времени;
- на промежутке времени t = 0,8÷0,91 с после момента КЗ изменения активной и реактивной составляющих носят резкий колебательный характер. В момент КЗ резко увеличивается реактивная составляющая.

Указанные обстоятельства обусловлены тем, что, во-первых, происходит резкая смена режима работы вследствие КЗ, во-вторых, происходит сброс активной мощности (а как следствие, и активной нагрузки, а также активной составляющей тока) и ток КЗ носит в основном реактивный характер. Значения составляющих зависят только от соотношения реактивного и активного сопротивлений в контуре КЗ.

Утяжеляя условия работы распределительной сети, уменьшив значение мощности КЗ системы до 5 и 0,5 MVA, получаем зависимости, представленные на рис. 4, 5.

На рис. 5 видно, что при трехфазном КЗ на стороне 0,4 кВ и мощности КЗ системы S_{к3} = 0,5 MVA полный ток фазы «А» при пуске имеет практически такое же значение, как и при трехфазном КЗ. Однако при этом активная и реактивная составляющие полного тока фазы имеют такой же характер поведения, как и в предыдущих случаях (рис. 3, 4):

- ярко выраженный колебательный характер изменения в первые моменты после КЗ;
- резкое уменьшение активной и реактивной составляющих в первые моменты после КЗ.

Таким образом, возможно использование соотношения активной и реактивной составляющих полного тока

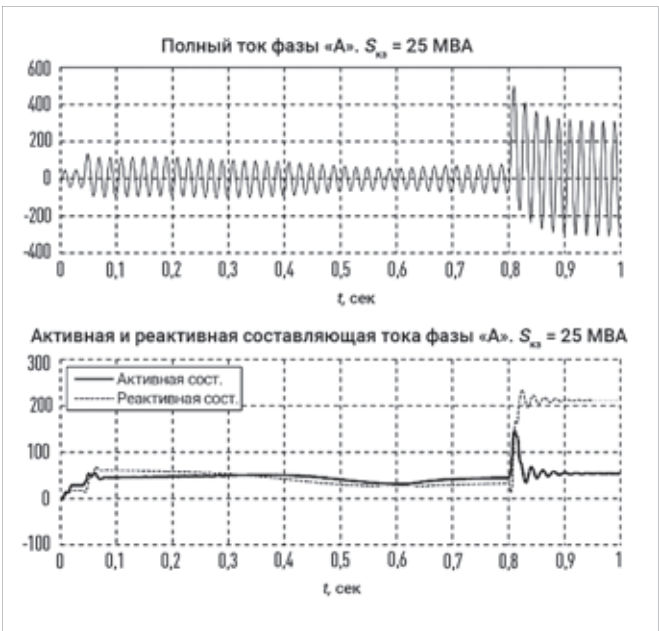


Рис. 4. Полный ток фазы «А» и составляющие токов фазы «А» при S_{к3} = 5 MVA

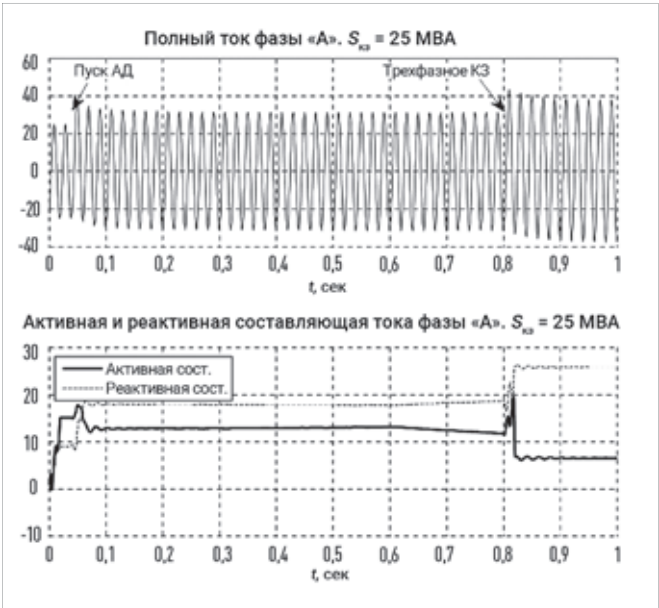


Рис. 5. Полный ток фазы «А» и составляющие токов фазы «А» при S_{к3} = 0,5 MVA

фазы в качестве информационного признака для совершенствования токовых защит напряжением 6–35 кВ.

На рис. 6 предложена упрощенная структурная схема усовершенствованной МТЗ с разрешением работы по модулю соотношения активной и реактивной составляющих тока.

Функционирование устройства, выполненного с использованием схемы, представленной на рис. 6, предпо-

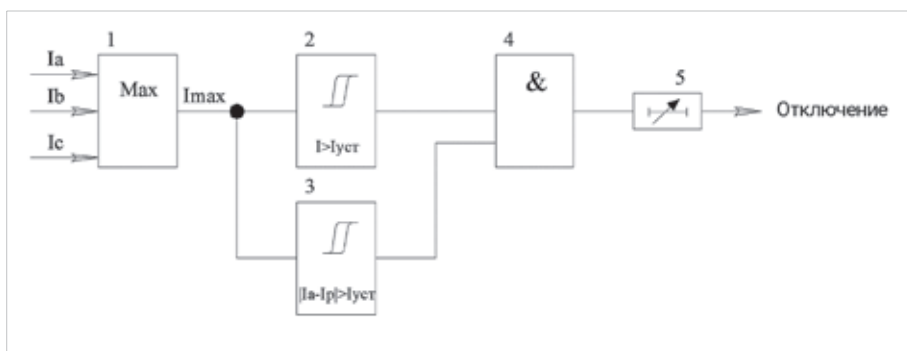


Рис. 6. Упрощенная структурная схема усовершенствованной МТЗ

Обозначения: 1 — элемент выбора максимального тока; 2 — элемент сравнения максимального тока с уставкой; 3 — элемент сравнения активной и реактивной составляющих тока с уставкой; 4 — элемент «И»; 5 — таймер (выдержка времени защиты).

лагает: определение тока поврежденной фазы (элемент 1); последующее его сравнение с уставкой (элемент 2); расчет активной и реактивной составляющих тока поврежденной фазы, а также сравнение модуля их разности с заранее определенным уставочным значением (элемент 3). При одновременной выдаче элементами 2 и 3 сигналов о превышении уставочных значений реализуется однозначное определение режима КЗ и происходит срабатывание МТЗ (рис. 6) с выдержкой времени.

Таким образом, в защите (рис. 6) обеспечивается отстройка от токов самозапуска без ухудшения чувствительности, а также реагирование на все виды КЗ как на линии, так и за силовым маломощным трансформатором.

ВЫВОДЫ

1. В результате исследования динамических процессов в сети среднего напряжения в различных режимах выявлено, что:
 - на начальном промежутке после момента КЗ изменения активной и реактивной составляющих тока носят резкий колебательный характер;
 - в момент пуска АД изменения активной и реактивной составляющих тока носят более плавный характер, без резких колебаний и на меньшем интервале времени;
 - в момент КЗ имеют место резкое увеличение реактивной составляющей и резкое уменьшение активной составляющей.
2. Соотношение активной и реактивной составляющих полного тока фазы можно использовать как дополнительный информационный признак с целью идентификации режима КЗ. При этом чувствительность МТЗ может быть увеличена в 2–3 раза путем изменения $K_{\text{сзн}}$ до 1 и, следовательно, уменьшения тока срабатывания защиты.
3. К достоинствам использования соотношения активной и реактивной составляющих полного тока фазы в качестве информационного признака защиты можно отнести отстройку от токов самозапуска без ухудшения чувствительности, а также реагирование на все виды КЗ как на линии, так и за силовым маломощным трансформатором.

Рисунки к статье предоставлены авторами.

↓ ЛИТЕРАТУРА

1. Митченко В.А., Дубов А.Л., Шурчалова О.Н. О повышении чувствительности максимальных токовых защит ЛЭП 6–10 кВ // Электротехника. 2012. № 3. С. 51–53.
2. Булычев А.В., Грибков М.А. Анализ процессов самозапуска электродвигателей в современных электрических распределительных сетях с позиций релейной защиты // Релейная защита и автоматизация. 2023. № 1(50). С. 30–38.
3. Романюк Ф.А., Тищенко А.А., Румянцев В.Ю. Повышение технического совершенства токовых и токовых направленных защит распределительных сетей // Вестник Белорусского национального технического университета. 2009. № 4. С. 66–69.
4. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. СПб.: ПЭИПК, 2003.
5. Колесников А.А., Папков Б.В. Особенности сбора и обработки данных для расчета надежности современной релейной защиты // Вестник НГИЭИ. 2022. № 3(130). С. 50–64. DOI: 10.24412/2227-9407-2022-3-50-64
6. Вуколов В.Ю., Колесников А.А., Обалин М.Д., Папков Б.В. Выбор очередности реконструкции устройств релейной защиты подстанций по статистическим критериям теории игр // Электричество. 2021. № 5. С. 26–32. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-5-26-32
7. Нагай В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 2002.
8. Маруда И.Ф. Релейная защита и автоматика ответственной однотрансформаторной подстанции 110 кВ // Электрические станции. 2005. № 5.
9. Маруда И.Ф. О ближнем резервировании на подстанциях с выключателем 110 кВ в цепи трансформатора // Электрические станции. 2001. № 5.
10. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996.
11. Нагай В.В. Оценка селекции режимов продольно-поперечной несимметрии в электрических распределительных сетях с эффективно-заземленной нейтралью // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2004. № 3. С. 51–54.
12. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.