

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.316.925.2

Селективность дифференциальной защиты сборных шин при перегруженных трансформаторах тока

М.Д. Скорытченко, В.А. Шелест

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена проблема обеспечения селективности дифференциальной защиты сборных шин в условиях перегруженных трансформаторов тока. В ходе работы были выявлены два режима функционирования дифференциальной защиты: режим источника тока при внутреннем коротком замыкании и режим источника напряжения при внешнем. Шунтирование сопротивления в дифференциальной цепи защиты в определённые моменты времени позволяет различать указанные режимы. Предлагается использовать этот подход для повышения селективности защиты. Компьютерное моделирование подтвердило эффективность предложенного метода. Также было рассмотрено применение контроллера для достижения данной цели.

Ключевые слова: дифференциальная защита, сборные шины, трансформатор тока, короткое замыкание, ток небаланса, селективность, сопротивление дифференциальной цепи, шунтирование, моделирование

Для цитирования. Скорытченко М.Д., Шелест В.А. Повышение селективности дифференциальной защиты сборных шин при перегруженных трансформаторах тока. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(4):44–48.

Selectivity of Busbar Differential Protection with Overloaded Current Transformers

Mikhail D. Skorytchenko, Vladimir A. Shelest

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The problem of ensuring selectivity of busbar differential protection in conditions of current transformer overloading was investigated. In the frame of the study, two modes of differential protection were identified: the mode of a current source under the internal short circuit and the mode of a voltage source under the external short circuit. Using shunt resistance in differential protection circuit at the certain moments of time allows distinguishing the specified modes. It was proposed to use this approach to increase the selectivity of protection. Computer modeling confirmed the efficiency of the proposed method. The use of a controller to achieve this objective was also studied.

Keywords: differential protection, busbars, current transformer, short circuit, unbalance current, selectivity, differential resistance circuit, shunting, modeling

For Citation. Skorytchenko MD, Shelest VA. Selectivity of Busbar Differential Protection with Overloaded Current Transformers. *Young Researcher of Don*. 2025;10(4):44–48.

Введение. Системы сборных шин (СШ) электрических станций и подстанций играют важнейшую роль в электроэнергетике. Для обеспечения надежного электроснабжения потребителей необходимо обеспечить бесперебойную работу СШ. Все присоединения СШ оснащены релейной защитой, предназначенной для отключения в случае их повреждения.

Для защиты от повреждений на СШ используется дифференциальная защита (ДЗ), которая опирается на трансформаторы тока (ТТ) всех присоединений. Повреждения на СШ и на ошиновке, соединяющей ТТ присоединений, считаются внутренними короткими замыканиями (КЗ). В дифференциальном реле результирующий ток равен сумме вторичных токов всех питающих присоединений, и таким образом ДЗ надежно отключает эти

присоединения. Тем не менее, повреждения на присоединениях за ТТ представляют собой внешние повреждения, и ДЗ, будучи устроенной по принципу действия, не реагирует на них, то есть не срабатывает. Это связано с тем, что в дифференциальном реле вторичный ток поврежденного присоединения вычитается из вторичных токов всех питающих присоединений, в результате чего результирующий ток (ток небаланса) оказывается близким к нулю, то есть меньше установленной уставки реле.

При насыщении магнитопровода ТТ вторичный ток уменьшается. При внутреннем повреждении это не влияет на работу ДЗ, поскольку в дифференциальном реле ток остается выше уставки, и происходит успешное отключение питающих присоединений. В случае внешнего короткого замыкания ДЗ не должна срабатывать. Однако необходимо учитывать тот факт, что в поврежденном присоединении ток равен сумме токов КЗ всех питающих присоединений. Это создает высокую вероятность того, что ТТ поврежденного присоединения будет перегружен, что приведет к насыщению магнитопровода. Уменьшение вторичного тока этого присоединения приведет к увеличению тока небаланса. Если ток небаланса превысит уставку, то ДЗ отключит питающие присоединения. Таким образом, вместо отключения поврежденного присоединения ДЗ отключает все питающие присоединения, что приводит к прекращению электроснабжения потребителей. Такое действие ДЗ называют ложной или неселективной работой.

Современная тенденция к увеличению мощности энергосистем и, соответственно, повышению токов КЗ усиливает вероятность неселективной работы ДЗ сборных шин. В настоящее время существует необходимость в модернизации ДЗ сборных шин, используемых на практике. Это возможно путем применения более эффективных принципов.

Принципы действия широко известных ДЗ сборных шин основаны на использовании следующих подходов: ток дифференциальной цепи, токов дифференциальной цепи и всех плеч защиты, а также фаз токов всех плеч защиты. Первый из принципов имеет простую реализацию, что особенно важно, поскольку сборные шины обладают множеством присоединений и, соответственно, большим числом ТТ.

Построение ДЗ по второму принципу основывается на использовании как дифференциального тока, так и токов всех плеч защиты, количество которых соответствует количеству присоединений сборных шин. Это значительно усложняет электрическую схему защиты. Для реализации ДЗ по третьему принципу требуется преобразование токов всех присоединений в прямоугольные импульсы, содержащие фазовую информацию о токах. Подобная защита также становится сложной.

В данной работе предлагается реализовать ДЗ на первом принципе. Такая ДЗ должна обеспечивать селективную работу при достаточной простоте. Существуют возможности для совершенствования ДЗ, выполненных по первому принципу. Большинство известных методов улучшения таких защит прежде всего направлены на более полное использование информации, содержащейся в форме дифференциального тока [1].

Необходимо учитывать особенности режимов работы ТТ по отношению к дифференциальной цепи. При внешнем коротком замыкании магнитопроводы ТТ питающих присоединений не насыщаются. Следовательно, сопротивления их ветвей намагничивания остаются высокими и не влияют на величину тока в дифференциальной цепи. В этом случае дифференциальная цепь, состоящая из дополнительного сопротивления R_d и дифференциального реле (ДР), оказывается последовательно соединенной с ветвью намагничивания ТТ поврежденного присоединения. Ток намагничивания ТТ данного присоединения равен току небаланса в дифференциальной цепи. Ток поврежденного присоединения, в свою очередь, равен сумме токов питающих присоединений, что создает потенциальную возможность глубокого насыщения магнитопровода, особенно во время переходного процесса с апериодической составляющей. Источник тока I вместе с сопротивлением плеча защиты со стороны поврежденного присоединения можно воспринимать в качестве источника напряжения. При этом ток небаланса в дифференциальной цепи будет значительно зависеть от величины дополнительного сопротивления.

При внутреннем коротком замыкании весь ток распределяется между ТТ питающих присоединений, и их магнитопроводы, как правило, не насыщаются. Если же магнитопровод какого-либо ТТ в итоге и насыщается, то это происходит в незначительной степени. Таким образом, ТТ по отношению к дифференциальной цепи можно рассматривать по-прежнему как источник тока. Ток в дифференциальной цепи до насыщения ТТ практически не будет зависеть от дополнительного сопротивления.

Эти два различных режима работы ТТ по отношению к дифференциальной цепи были использованы для разработки различных вариантов совершенствования ДЗ сборных шин. Среди них стоит выделить внедрение активного стабилизирующего сопротивления [2] и насыщающегося дросселя [1] в дифференциальную цепь. Дальнейшим развитием идеи улучшения ДЗш в этом направлении стало внедрение коммутируемого дифференциального реле [3], которое использует тиристорные ключи. При внешнем повреждении тиристоры остаются закрытыми, и ток в реле равен нулю. В случае внутреннего короткого замыкания напряжение на разомкнутой дифференциальной цепи возрастает до уровня, при котором тиристоры открываются, и реле срабатывает.

Основным недостатком коммутируемого дифференциального реле является высокий уровень напряжения при внутреннем повреждении, что может привести к выходу из строя изоляции обмоток ТТ. В работе [4] было принято решение заменить тиристоры дополнительным сопротивлением R_d и шунтировать его в момент прохождения максимума дифференциального тока.

Целью данной работы является разработка ДЗ сборных шин с шунтируемым дополнительным сопротивлением на основе микроконтроллера при соблюдении требований к релейной защите [5].

Основная часть. Разработке новой ДЗ предшествовало изучение процессов в дифференциальной цепи. На основании компьютерного моделирования было установлено, что при внешнем коротком замыкании после шунтирования дополнительного сопротивления и достижения максимума дифференциального тока (тока небаланса) он начинает вновь увеличиваться (рис. 1). Это объясняется тем, что в момент шунтирования дополнительного сопротивления магнитопровод ТТ поврежденного присоединения максимально насыщается, а сопротивление ветви намагничивания ТТ становится минимальным. Если дополнительное сопротивление R_d на порядок больше сопротивления дифференциального реле, то рост тока небаланса будет значительным, и его можно зафиксировать. Момент шунтирования сопротивления R_d обозначен буквой K (рис. 1).

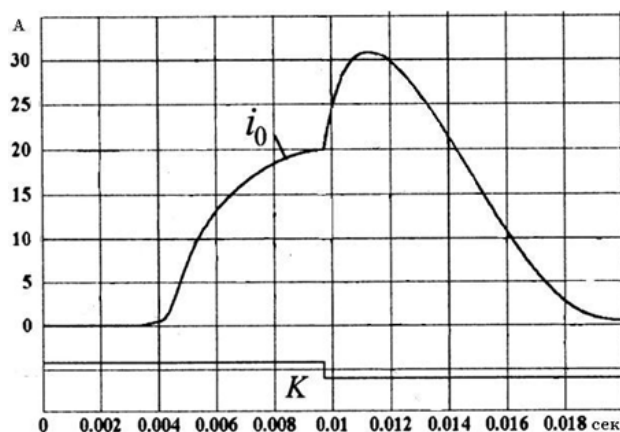


Рис. 1. Изменение дифференциального тока (тока небаланса) при шунтировании дополнительного сопротивления

На основании компьютерного моделирования внутреннего повреждения было установлено, что после шунтирования дополнительного сопротивления, после достижения максимума дифференциального тока, он не начинает снова увеличиваться. Происходит лишь незначительное изменение формы тока.

Описание проблемы. Для решения поставленной задачи необходимо было сформировать дифференциальную цепь, выбрать порты в микроконтроллере, подключив их к этой цепи, а также разработать соответствующую программу для микроконтроллера. На рис. 2 представлена упрощенная схема коммутируемого дифференциального реле, основанного на микроконтроллере.

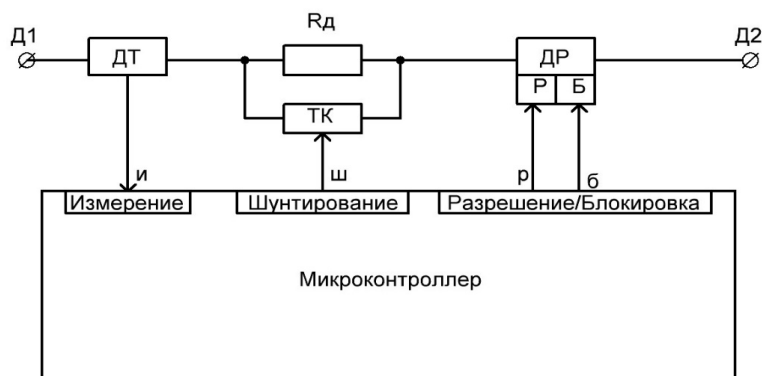


Рис. 2. Упрощенная схема коммутируемого дифференциального реле на базе микроконтроллера

В дифференциальной цепи Д1 – Д2 В последовательно соединены датчик тока ДТ, дополнительное сопротивление R_d и дифференциальное реле ДР. Датчик тока ДТ преобразует электрический ток в напряжение с учетом полярности. Сопротивление R_d в сотни раз превышает сопротивление дифференциального реле ДР. В дифференциальном реле предусмотрено два входа: Р — для разрешения срабатывания и Б — для блокировки срабатывания.

В микроконтроллере порт «Измерение» подключен к датчику тока ДТ и обеспечивает преобразование как положительных, так и отрицательных напряжений в соответствующие цифровые коды. Порт «Шунтирование» соединен с блоком транзисторных ключей ТК и отвечает за открытие соответствующего транзистора с учетом полярности тока. Порт «Разрешение/Блокировка» подает команды на дифференциальное реле, позволяя ему функционировать при внутреннем коротком замыкании и предотвращая ложное срабатывание при внешнем коротком замыкании.

Была составлена программа, реализующая алгоритм управления коммутируемым дифференциальным реле (рис. 3). Блоки программы выполняют следующие функции:

- разрешение дифференциального реле;
- пауза для подготовки измерения;
- первое измерение тока i_A ;
- проверка превышения порогового значения тока i_0 ;
- пауза для подготовки измерения;
- второе измерение тока i_B ;
- проверка, что второе измерение тока больше первого;
- запоминание последнего измерения тока;
- запоминание последнего измерения тока;
- пауза для подготовки измерения;
- второе измерение тока i_B ;
- проверка, что второе измерение тока больше первого;
- блокировка дифференциального реле;
- сигнализация внешнего КЗ.

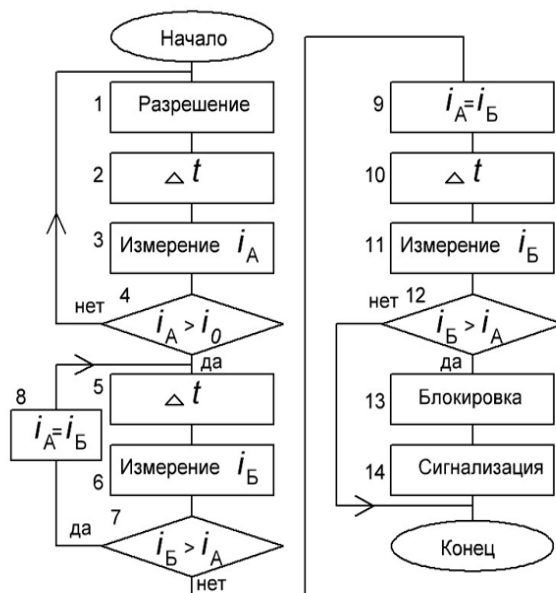


Рис. 3. Упрощенный алгоритм коммутируемого дифференциального реле

Заключение. На основе цифровых технологий было разработано дифференциальное реле с повышенной селективностью для сборных шин открытых распределительных устройств электрических станций и подстанций. В процессе разработки нового устройства были учтены особенности переходных электромагнитных процессов, возникающих при внешних и внутренних повреждениях. Для повышения селективности реле применено активное воздействие на переходные процессы в дифференциальной цепи.

Можно с уверенностью утверждать, что результаты выполненной работы полностью соответствуют поставленной цели. Применение компьютерного моделирования значительно упростило анализ режимов трансформаторов тока при коммутации дополнительного сопротивления. Алгоритм, разработанный в ходе этой работы, можно рекомендовать для выполнения других аналогичных исследований.

Внедрение разработанного реле позволит на практике предотвратить ложные срабатывания защиты сборных шин и необоснованное прекращение электроснабжения потребителей. Дальнейшие исследования в этой области могут быть ориентированы на повышение быстродействия защитных систем.

Список литературы

1. Шелест В.А. Сравнение принципов выполнения дифференциальных реле, использующих информацию только дифференциальной цепи защиты сборных шин. *Известия вузов СССР. Электромеханика*. 1975;(7).
2. Релейная защита. *Энергетика за рубежом*. 1959;(1).
3. Дроздов А.Д., Подгорный Э.В., Шелест В.А. и Богдан А.В. Коммутируемое дифференциальное реле для защиты шин. *Известия вузов СССР. Электромеханика*. 1973;(10).
4. Шелест В.А., Галкин А.И., Цыгулев Н.И. *Устройство для дифференциальной защиты сборных шин*. Авторское свидетельство № SU 658647 A1. 1979.
5. *Электротехнический справочник*. Под общей редакцией профессоров МЭИ. Москва: Энергия; 1974. 520 с.

Об авторах:

Михаил Дмитриевич Скорытченко, студент кафедры цифровых технологий и платформ в электроэнергетике Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), mskorytchenko@donstu.ru

Владимир Александрович Шелест, кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых технологий и платформ в электроэнергетике Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), vshelest@donstu.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Mikhail D. Skorytchenko, Student of the Digital Technologies and Platforms in the Electric Power Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), mskorytchenko@donstu.ru.

Vladimir A. Shelest, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Digital Technologies and Platforms in the Electric Power Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), vshelest@donstu.ru.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.