
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316.925

EDN: EPCVZC

**ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА
АВТОМАТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ****Т.Е. Минакова**ORCID: 0000-0001-5776-1917 e-mail: t.e.minakova@mail.ru

Санкт-Петербургский горный университет

*Санкт-Петербург, Россия***Д.А. Михайлов**ORCID: 0009-0001-3510-3339 e-mail: daniilmihajlov7762@gmail.com

Санкт-Петербургский горный университет

Санкт-Петербург, Россия

Предлагается централизованная система совместной работы противоаварийной автоматики (повторного включения и ввода резерва) и релейной защиты для системы электроснабжения предприятия с протяженными кабельными линиями напряжения 6-10 кВ. Данная система особенно актуальна на предприятиях с взрывоопасными и тяжелыми условиями работы, где выдержка времени при отключении повреждения может привести к катастрофическим последствиям. Предложенный алгоритм взаимодействия релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА) обеспечивает повышение быстродействия, селективность отключения повреждения и интеграцию релейных защит со средствами автоматики на основе микропроцессорных терминалов или компьютерной техники. Разработанная архитектура интеграции данных содержит микропроцессор или компьютер, контроллеры с интерфейсами физического обмена данными со средствами релейной защиты, системой диспетчеризации, каналами связи телемеханических систем и их узлов. Подземное расположение объектов управления систем электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса предопределяет дистанционное диспетчерское управление наземными службами. Контрольные пункты телемеханики имеют множество каналов передачи информации от распределенных средств коммутации схемы электроснабжения и их органов формирования сигналов о положении и сигналах управления ими. Обосновано необходимое техническое обеспечение для осуществления предложенного алгоритма и рассмотрен пример его реализации на участке системы электроснабжения горнодобывающего предприятия. Исследования, проведенные на

лабораторном стенде, показали повышение быстродействия отключения поврежденных участков, и одновременно – селективности действия РЗА. Разработана математическая модель для системы электроснабжения с предложенной схемой интеграции данных РЗА.

Ключевые слова: логическая защита, противоаварийная автоматика, релейная защита, селективность, электроснабжение горнодобывающих предприятий.

Для цитирования: Минакова Т.Е., Михайлов Д.А. Централизованная система автоматического восстановления электроснабжения предприятий горнодобывающей отрасли // Интеллектуальная электротехника. 2024. № 2. С. 4-22. EDN: EPCVZC

CENTRALIZED SYSTEM FOR AUTOMATIC RESTORATION OF POWER SUPPLY OF MINING INDUSTRY ENTERPRISES

T.E. Minakova

ORCID: 0000-0001-5776-1917 e-mail: t.e.minakova@mail.ru

Saint-Petersburg Mining University

Saint Petersburg, Russia

D.A. Mihajlov

ORCID: 0009-0001-3510-3339 e-mail: daniilmihajlov7762@gmail.com

Saint-Petersburg Mining University

Saint Petersburg, Russia

Abstract. The paper presents centralized system for joint operation of emergency automation (automatic reclosing and automatic transfer switch) and relay protection is proposed for the power supply system of an enterprise with long 6-10 kV cable lines. This is especially relevant in enterprises with explosive and difficult working conditions, where a delay in disconnecting a fault can lead to catastrophic consequences. The proposed algorithm for the interaction of relay protection and emergency automation ensures increased speed, selectivity of fault shutdown and integration of relay protection with automation equipment based on microprocessor terminals or computer equipment. The developed data integration architecture contains a microprocessor or computer, controllers with interfaces for physical data exchange with relay protection means, a dispatch system, communication channels of telemechanical systems and their components. The underground location of control facilities for power supply systems of mineral resource complex enterprises predetermines remote dispatch control of ground services. Telemechanics control points have many channels for transmitting information from distributed switching means of the power supply circuit and their organs for generating signals about their position and control signals. The article substantiates the necessary technical support for implementing the proposed algorithm and considers an example of its implementation in a section of the power

supply system of a mining enterprise. Research carried out on a laboratory bench showed an increase in the speed of disconnecting damaged areas, and at the same time – the selectivity of the action of relay protection and emergency automation. A mathematical model has been developed for the power supply system with a proposed scheme for integrating relay protection and emergency automation data.

Keywords: relay protection, emergency automation, logical protection, selectivity, power supply for mining enterprises.

For citation: T.E. Minakova and D.A. Mihajlov, “Centralized system for automatic restoration of power supply of mining industry enterprises”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 4-22, 2024. EDN: EPCVZC

I. Введение

Обеспечение работоспособного состояния действующих систем релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА) является одной из важнейших задач отечественной электроэнергетики. Последние технические достижения в данной сфере направлены на замену электромеханической релейной защиты цифровыми микропроцессорными средствами, позволяющими повысить быстродействие и надежность [1]. Существенным отличием средств микропроцессорной релейной защиты от электромеханических является способность не только контролировать текущие значения двух параметров: тока и напряжения (а при их отклонении от допустимых значений — формировать сигналы отключения), но и определять и запоминать причины, время и дату отключения, сохранять параметры предшествующего режима, продолжительность аварии и т.д. [2, 3].

Надежность системы электроснабжения при применении микропроцессорных средств со временем только увеличивается, так как при обновлении программного обеспечения появляется возможность исправления ошибок и создания более совершенных алгоритмов функционирования системы релейной защиты. Такой возможности у электромеханической релейной защиты нет, она подвержена износу, что со временем сильно снижает ее надежность [4].

Несмотря на широкий выбор экономически выгодных предложений по повышению надежности и устойчивости системы электроснабжения, зачастую они не используются, так как сложны для эксплуатационного персонала [5]. Для повышения надежности система релейной защиты выполняется как можно более простой при условии сохранения показателей быстродействия, надежности, селективности. Для достижения быстродействия и селективной работы в нее включаются вычислительные и логические процедуры, которые вырабатывают, например, латентные переменные, необходимые и достаточные для эффективной защиты электроустановок и систем их электроснабжения [6, 7].

II. Материалы и методы

На предприятиях минерально-сырьевого комплекса, особенно опасных по концентрации газов и пыли, а именно – горнодобывающих и нефтегазовых – в системе электроснабжения важнейшую роль играют защиты мгновенного действия, которые используются в качестве основных. Если при аварии данные защиты работают неселективно, происходит массовое отключение потребителей [8]. Распределительные устройства системы электроснабжения на предприятиях, относящихся к минерально-сырьевому комплексу, могут находиться на большом расстоянии друг от друга, поэтому восстановление системы после ее распада из-за короткого замыкания затруднено [9, 10]. При этом требуется диспетчер высокой квалификации, способный дистанционно принимать решения, обеспечивающие безопасное восстановление поврежденных участков сетей. Поэтому уже на текущий момент возникает необходимость в системах автоматического восстановления сетей после короткого замыкания, способных исправить неселективное действие защит и осуществить при необходимости ввод резервного источника питания [11, 12]. В настоящее время в системах РЗА (релейной защиты и автоматики) предприятий минерально-сырьевого комплекса используются в основном электромеханические реле типа РТ-40, РСТ, РТ-81 и т.д. Хотя данные реле и зарекомендовали себя как простые и надежные системы защиты, на крупных и ответственных предприятиях они заменяются на микропроцессорные устройства. Данный переход связан с недостаточными быстродействием и чувствительностью электромеханических устройств, а также моральным и физическим износом. Полному переходу к новым видам систем РЗА препятствует высокая стоимость данных систем, а также сложность наладки, обслуживания и эксплуатации. Таким образом, востребованной является гибкая система релейной защиты и автоматики, которая будет простой в эксплуатации и открытой, с возможностью изменения схемы электроснабжения. На предприятиях минерально-сырьевого комплекса должны быть реализованы следующие виды защит и автоматики [13]:

- 1) на фидерах: защиты минимального напряжения и АПВ (автоматического повторного включения);
- 2) на секционных и вводных выключателях: АВР (автоматического ввода резерва) и АПВ.

Создание централизованных систем, включающих в себя АПВ, АВР, быстродействующие защиты и защиты минимального напряжения, позволит обеспечить селективное отключение поврежденного участка без выдержки времени и восстановление электроснабжения неповрежденных участков. Применительно к распространенной на практике схеме (рис. 1) рассмотрим реализацию алгоритма централизованного автоматического повторного включения и автоматического включения резерва (ЦАПВ и

ЦАВР), используемого на сегодняшний день на многих предприятиях минерально-сырьевого комплекса для автоматизированного восстановления системы электроснабжения. На рис. 1 представлен фрагмент принципиальной схемы электроснабжения предприятия. Изображение вводных выключателей на схеме выполняется без отходящей линии. Секционные выключатели (СВ) в нормальном режиме разомкнуты (обозначено символом X). Остальные выключатели являются линейными.

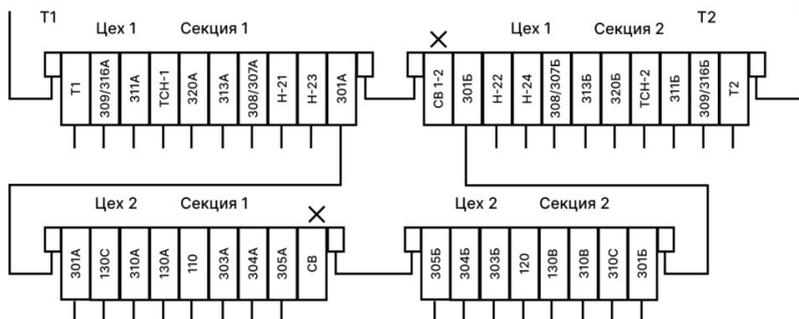


Рис. 1. Принципиальная схема электроснабжения предприятия

Fig. 1. Schematic diagram of the enterprise's power supply

Главной функцией систем ЦАПВ и ЦАВР, реализуемой на предприятии, является включение всех неселективно отключенных при коротком замыкании в любом месте системы электроснабжения выключателей. В случае необходимости система также осуществляет включение резервного источника питания. На рис. 1 представлено исходное состояние системы электроснабжения, питание осуществляется отдельно по секциям. От каждого выключателя поступает два вида сигнала в систему ЦАПВ и ЦАВР, а именно: сигнал о срабатывании максимальной токовой защиты (МТЗ) и сигнал о положении выключателя. Для реализации алгоритма исходная схема сети преобразуется в схемы электроснабжения для каждого из конечных потребителей, схемы для потребителей одной секции распределительного устройства будут одинаковыми и иметь два (три) источника.

Алгоритмом ЦАПВ и ЦАВР реализуется процесс восстановления неповрежденной части системы электроснабжения после отключения участков, на которых идентифицировано короткое замыкание или иная авария. С целью обеспечения однозначности понимания и реализации в схеме электроснабжения на предприятии представим алгоритм функционирования РЗА в схематической и табличной форме. В соответствии с алгоритмами

централизованного управления АПВ и АВР осуществляется каскадное восстановление участков сети, кроме последнего перед зоной КЗ.

Если этого недостаточно, для восстановления электроснабжения, производится подключение резервного источника питания. В первую очередь, выполняется кодирование каждого выключателя [14, 15]. Код выключателя записывается в виде А–Б–В, где А – номер уровня распределительного устройства; Б – номер секции; В – номер выключателя. Табл. 1 представляет процесс кодирования выключателей рассматриваемой схемы.

Таблица 1.
Кодирование выключателей системы электроснабжения

Table 1.
Coding of power supply system switches

Обозначение на принципиальной схеме	Код
Цех 1, 1РУ-10 кВ, секция 1	
Вводный выключатель Т1	1-1-1
309/316А	1-1-2
311А	1-1-3
ТСН-1	1-1-4
320А	1-1-5
313А	1-1-6
308/307А	1-1-7
Н-21	1-1-8
Н-23	1-1-9
301А	1-1-10
Цех 1, 1РУ-10кВ, секция 2	
Вводный выключатель Т2	1-2-1
309/316Б	1-2-2
311Б	1-2-3
ТСН-2	1-2-4
320Б	1-2-5
313Б	1-2-6
308/307Б	1-2-7
Н-22	1-2-8
Н-24	1-2-9
301Б	1-2-10
Секционный выключатель СВ1-2	1-2-11
Цех 2, РП-301, секция 1	
301А (вводной)	2-1-1
130С	2-1-2
310 А	2-1-3
130А	2-1-4
110	2-1-5
303А	2-1-6

Продолжение табл. 1

Table 1 (continued)

Обозначение на принципиальной схеме	Код
305А	2-1-8
Секционный выключатель СВ	2-1-9
Цех 2, РП-301, секция 2	
301Б (вводной)	2-2-1
130В	2-2-2
310В	2-2-3
310С	2-2-4
120	2-2-5
303Б	2-2-6
304Б	2-2-7
305Б	2-2-8

Номер уровня в табл.1 растет по мере удаления от источника электропитания. В тех случаях, когда шины не секционированы, их номер считается равным 1. Таким образом, принципиальная схема принимает вид, представленный на рис. 2.

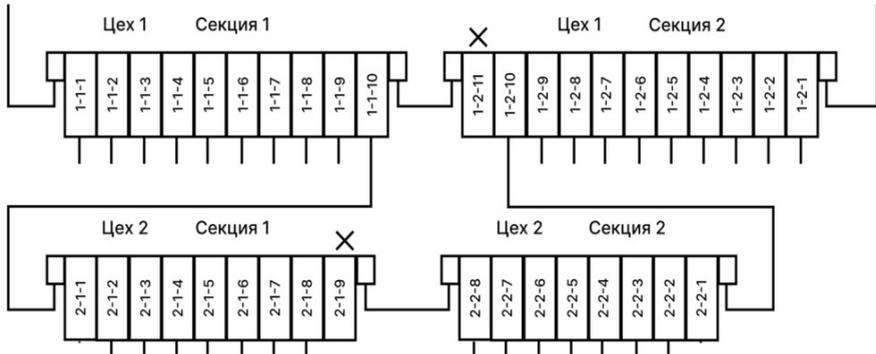


Рис. 2. Кодированная принципиальная схема электроснабжения предприятия

Fig. 2. Coded schematic diagram of enterprise power supply

Для составления алгоритма преобразуем исходную принципиальную схему таким образом, чтобы сформировалась магистральная схема сети от источников до конечных потребителей. Сформированная сеть представляется графом, который для потребителей Цеха 2 (секции 1 и 2) представлен на рис. 3. Основными источниками энергии являются трансформаторы Т1 (для потребителей секции 1) через выключатели 1-1-1, 1-1-10 и 2-1-1 и

трансформатор Т2 через выключатели 1-2-1, 1-2-10 и 2-2-1. Напряжение от резервного источника подается через отключенный в нормальном режиме выключатель 2-1-9.

Окружностями (вершины графа) обозначены выключатели магистралей, состояние которых: 1 – включен, 0 – выключен.

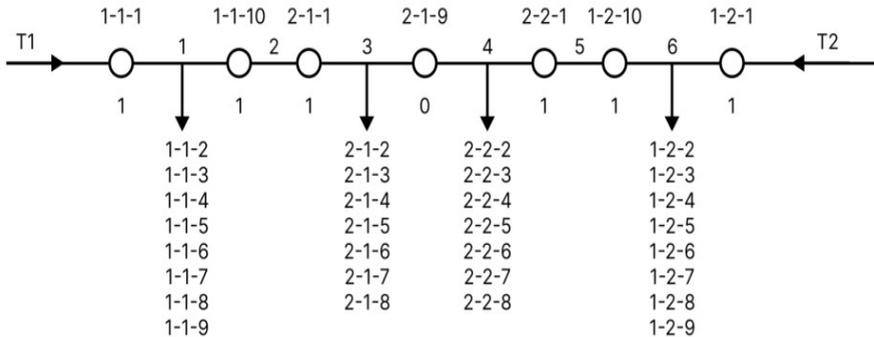


Рис. 3. Граф системы электроснабжения предприятия

Fig. 3. Graph of the enterprise power supply system

Данный граф представляется в табл. 2, в которую заносятся коды выключателей и номера ветвей графа. В зависимости от точки короткого замыкания в таблице заполняются столбцы состояния выключателей после короткого замыкания и необходимые команды, подаваемые на выключатели с целью восстановления системы электроснабжения предприятия.

Для потребителей Цеха 1 (секции 1 и 2) основными источниками будут являться трансформаторы Т1 и Т2, а резервным источником является отключенный в нормальном режиме выключатель 1-2-11.

Детали алгоритм работы ЦАПВ и ЦАВР представим в типовых аварийных режимах, а именно: в случае КЗ за выключателем 2-1-5, в случае КЗ на шинах 1-ой секции цеха 2 и в случае КЗ на шинах 1-й секции цеха 1.

Состояние выключателей после КЗ и последующего восстановления электроснабжения отображается на диспетчерском пункте следующими обозначениями в табл. 2: «К» – выключатель отключен МТЗ; «Ж» – выключатель отключен вследствие исчезновения напряжения на шинах; «З» – выключатель включен; «Г» – отключен в нормальном режиме работы. В нижней части таблицы указывается код выключателя, за которым произошло короткое замыкание.

Таблица 2.
Таблица состояний коммутационных аппаратов

Table 2.
Table of states of switching devices

Номер линии и ветви графа	Код выключателя	Варианты реализации КЗ и результаты восстановления					
		КЗ у потреби- теля (2-1-5)		КЗ на шинах секции 1 цеха 2		КЗ на шинах секции 1 цеха 1	
		После КЗ	После восст.	После КЗ	После восст.	После КЗ	После восст.
T1	1-1-1	З	З	З	З	К	К
1							
	1-1-10	К	З	К	К	К	К
2							
	2-1-1	К	З	К	К	К	К
3							
	2-1-9	Г	Г	Г	Г	Г	К
4							
	2-2-1	З	З	З	З	З	З
5							
	1-2-10	З	З	З	З	З	З
6							
T2	1-2-1	З	З	З	З	З	З
1	1-1-2	З	З	З	З	К	К
	1-1-3	З	З	З	З	К	К
	1-1-4	З	З	З	З	К	К
	1-1-5	З	З	З	З	К	К
	1-1-6	З	З	З	З	К	К
	1-1-7	З	З	З	З	К	К
	1-1-8	З	З	З	З	К	К
	1-1-9	З	З	З	З	К	К
3	2-1-2	Ж	З	К	К	Ж	З
	2-1-3	Ж	З	К	К	Ж	З
	2-1-4	Ж	З	К	К	Ж	З
	2-1-5	К	К	К	К	Ж	З
	2-1-6	Ж	З	К	К	Ж	З
	2-1-7	Ж	З	К	К	Ж	З
	2-1-8	Ж	З	К	К	Ж	З
4	2-2-2	З	З	З	З	З	З
	2-2-3	З	З	З	З	З	З
	2-2-4	З	З	З	З	З	З
	2-2-5	З	З	З	З	З	З
	2-2-6	З	З	З	З	З	З

Продолжение табл. 2

Table 2 (continued)

Номер линии и ветви графа	Код выключателя	Варианты реализации КЗ и результаты восстановления					
		КЗ у потребителя (2-1-5)		КЗ на шинах секции 1 цеха 2		КЗ на шинах секции 1 цеха 1	
		После КЗ	После восст.	После КЗ	После восст.	После КЗ	После восст.
	2-2-7	3	3	3	3	3	3
	2-2-8	3	3	3	3	3	3
6	1-2-2	3	3	3	3	3	3
	1-2-3	3	3	3	3	3	3
	1-2-4	3	3	3	3	3	3
	1-2-5	3	3	3	3	3	3
	1-2-6	3	3	3	3	3	3
	1-2-7	3	3	3	3	3	3
	1-2-8	3	3	3	3	3	3
	1-2-9	3	3	3	3	3	3
Код выключателя, после которого КЗ		2-1-5		2-1-1		1-1-1	

Отключенный максимальной токовой защитой выключатель одновременно с командой на отключение посылает сигнал на включение выключателя, расположенного ближе к источнику. Таким образом, КЗ отключается селективно ближайшим выключателем. При восстановлении напряжения на шинах защита минимального напряжения, отключившая выключатели смежных присоединений (код Ж), включает отключенные выключатели. Для реализации на предприятии системы централизованного автоматизированного повторного включения и ввода резерва составляется схема структуры автоматики (рис. 4).

Схема содержит следующие компоненты: цифровое аппаратное и программное обеспечение на базе микропроцессоров или компьютеров (МП), физические интерфейсы и контроллеры для обмена данными с периферийными устройствами (К), собственно устройства релейной защиты (УРЗ), органы диспетчерского управления режимами и схемами сетей (Д) и узлы их коммуникаций (У), собственно средства телекоммуникаций – линии (ЛТ), систему их контрольных пунктов (КП 1...КП N) и систему электроснабжения (СЭС). Необходимо отметить, что на предприятиях минерально-сырьевого комплекса потребитель может находиться под землей, связь с ним осуществляется через линии связи телемеханики от диспетчерских служб, расположенных на поверхности. Каждый контрольный пункт

телемеханики (КП) подключен к нескольким выключателям, что позволяет получать сигналы о срабатывании релейной защиты и о состоянии выключателей. Контроллер играет ключевую роль в системе, управляя всеми ее аспектами. Его функции включают в себя прием и передачу информации на компьютер, а после принятия диспетчером решения – получение сигналов от компьютера и направление требуемых команд управления на блок рабочих реле. В ПК диспетчера заносится схема электроснабжения, и именно в нем реализуется алгоритм централизованного автоматизированного повторного включения и ввода резерва. Сигналы от выключателей поступают на контроллер, который формирует сигнал прерывания, отображаемый на компьютере, что приводит к остановке текущих программ на компьютере. На компьютере отображается место возникновения короткого замыкания, после чего активируется программа централизованного аварийного отключения (ЦАПВ) и автоматического восстановления (ЦАВР). Диспетчер может наблюдать картину отключений после короткого замыкания, а также решение централизованного АПВ и АВР.

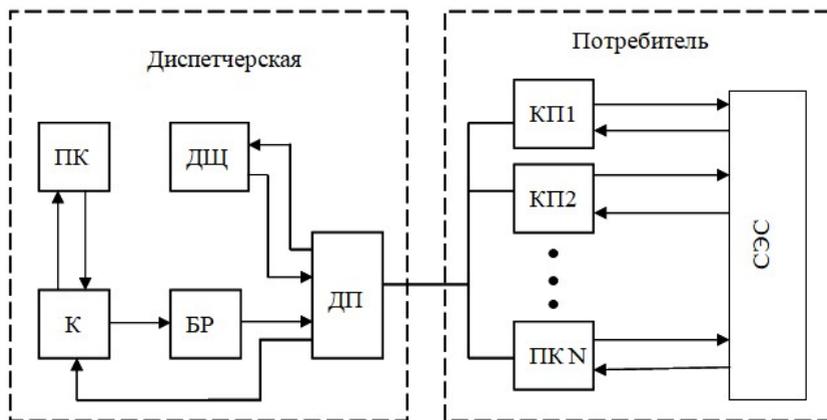


Рис. 4. Структурная схема системы централизованной противоаварийной автоматики

Fig. 4. Block diagram of the centralized emergency automation system

В данной схеме предусмотрено автоматизированное управления, при котором диспетчер подтверждает вариант восстановления электроснабжения [15]. Возможен также вариант полностью автоматического алгоритма.

Совершенствование на основе алгоритма централизованных АПВ и

АВР обеспечивает автоматического восстановления системы электроснабжения при любой аварии или неселективном срабатывании выключателей, т.е. исключает время на принятие решений и выполнение оперативных переключений персоналом диспетчерского пункта.

Предложенный алгоритм позволяет использовать участки системы электроснабжения с микропроцессорными защитами и участки, на которых релейная защиты выполнена на основе электромеханических или полупроводниковых реле [16, 17].

III. Результаты исследования

В целях повышения надежности системы электроснабжения и сокращения времени простоя оборудования предприятий минерально-сырьевого комплекса предложена реализация системы двухканальной релейной защиты и противоаварийной автоматики. В данной системе в качестве основной используется логическая защита (ЛЗ), ее резервирует максимальная токовая защита (МТЗ). ЛЗ – это токовая защита максимального действия без выдержки времени, селективность которой обеспечивается передачей по каналам телемеханики сигналов блокировки отключения выключателей на смежных участках, расположенных ближе к источнику питания. Ее резервирует МТЗ без выдержки времени. В случае отказа ЛЗ она осуществляет неселективное отключение всех выключателей, по которым протекает ток КЗ. Восстановление системы электроснабжения после ее распада выполняется с помощью систем централизованного автоматического повторного включения (ЦАПВ) и централизованного автоматического ввода резерва (ЦАВР) по заданному алгоритму без участия диспетчера. Рассмотрим реализацию данной системы для схемы, представленной на рис. 5.

В случае КЗ отключение произведет логическая защита шин, выступающая в роли основной, данная функция присутствует во всех современных микропроцессорных устройствах релейной защиты и широко используется на сегодняшний день. В случае КЗ на присоединении шин цеха 2 (точка К1) должна сработать ЛЗ, подав сигнал на отключение выключателю Q110. Далее защита должна подать блокировочный сигнал X на вводной и секционный выключатели по каналам связи, которые на рис. 1 изображены пунктирной линией. Таким образом, выполнится мгновенное и селективное отключение поврежденной линии. В целях передачи блокировочного сигнала X к защитами вышестоящих выключателей создаются дополнительные каналы связи телемеханики до этих выключателей, что предотвращает их отключение в случае КЗ. Блокировочный сигнал X при повреждении шины цеха 2 (точка К2) от выключателей отходящих линий поступать не будет. В данном случае мгновенно сработает вводной выключатель 301 А, а секционный выключатель заблокируется. В случае отказа основной защиты сработает резервная защита.

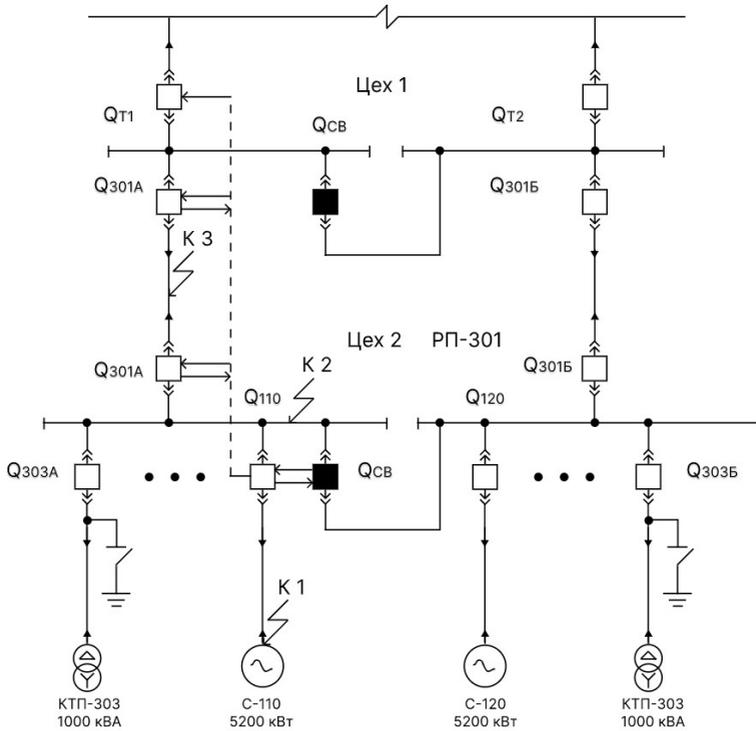


Рис. 5. Схема участка сети электроснабжения

Fig. 5. Section of the power supply network

Для реализации системы двухканальной релейной защиты необходимо установить на каждом выключателе ЛЗ и МТЗ мгновенного действия и проложить между объектами предприятия каналы связи для передачи блокировочного сигнала. Рассмотрим логику работы двухканальной защиты при отказе основной защиты ЛЗ по схеме, представленной на рис. 6.

В схеме обозначены: $I>$; L – МТЗ с логическим управлением, $I-$ – МТЗ, X_1 – сигнал датчика тока защищаемого участка, X_2 – сигнал срабатывания основной защиты, X_{n+1} – сигнал блокировки, поступающий от защит, более удаленных от источника питания, X_{n-1} – сигнал блокировки, поступающий к защитам в направлении к источнику питания, $\&$ и 1 – логические органы «И» и «ИЛИ», Y – выходной сигнал, D – задержка для обеспечения селективности резервной МТЗ, ТА1 и ТА2 – трансформаторы тока. По схеме видно, что логическая защита, выступающая в роли основной, мгновенно осуществляет селективное отключение выключателя. При ее отказе

мгновенное отключение выключателя производится МТЗ, выступающей в роли резервной. Таким образом, логическое выражение, которое характеризует запуск резервной МТЗ имеет вид:

$$Y = X_1 \cap \overline{X_2} \cap \overline{X_3}. \quad (1)$$

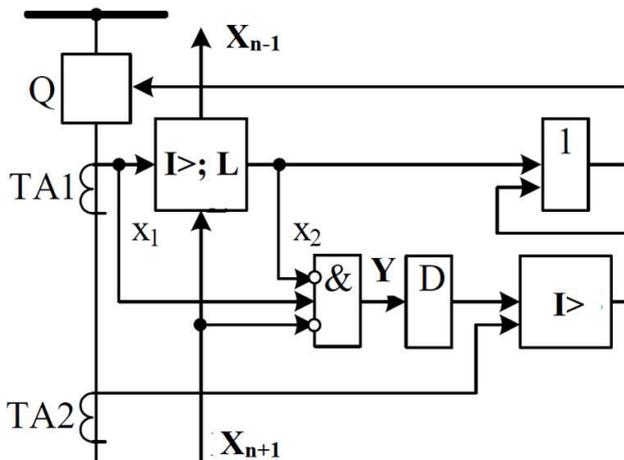


Рис. 6. Схема гибридной защиты

Fig. 6. Hybrid protection scheme

Очевидно, что МТЗ срабатывает только в тех случаях, когда появляется признак наличия тока короткого замыкания ($X_1 = 1$), и одновременно отсутствует сигнал блокировки ($\overline{X_3} = 0$) и срабатывания ЛУ ($\overline{X_2} = 0$). Только в таком случае сигнал Y примет значение, равное 1, запускающий МТЗ, в остальных случаях отключение будет производиться с помощью ЛЗ.

В случае неселективного отключения выключателей МТЗ в работу вступает ЦАПВ и ЦАВР, тем самым восстанавливая систему электроснабжения предприятия. Восстановление выполняется дистанционно диспетчером или, с его согласия, автоматически по заранее настроенному алгоритму. Алгоритм работы ЦАПВ после распада системы можно представить в виде таблицы, в которую заносятся сигналы, поступающие от защит выключателей, а именно: $X_i = 0$, если защита не сработала и $X_i = 1$, если защита сработала. Число столбцов m таблицы определяется по количеству выключателей в схеме от источника питания до точки аварии, а число строк n характеризуется количеством возможных вариантов работы релейной защиты. Таким

образом, выходной сигнал Y определяет возможность работы ЦАПВ по следующему логическому выражению:

$$Y = X_1 \cdot \overline{X_2} \dots X_m \cup \overline{X_1} \cdot X_2 \dots X_m \cup \dots \cup X_1 \cdot X_2 \cdot \overline{X_m}. \quad (2)$$

При $Y = 1$ в работу вступает ЦАПВ, которое осуществляет централизованное включение всех выключателей по пути от источника питания к поврежденному участку кроме последнего перед точкой короткого замыкания. Из выражения видно, что возможность отказа срабатывания защиты одного из выключателей также учитывается. Стоит отметить, что в случае отказа защиты ближайшего к точке короткого замыкания выключателя, будет выполнен алгоритм неполного ЦАПВ. Централизованное включение выключателей, находящихся на одном уровне с выключателем перед точкой короткого замыкания, отключение которых было выполнено вследствие исчезновения напряжения на шинах, выполняется с учетом особенностей включения конкретного присоединения. Рассмотрим реализацию алгоритма, применимо к предложенной схеме (рис. 5), а именно работу МТЗ и ЦАПВ в случае отказа или отсутствия основной защиты (ЛЗ). В случае короткого замыкания в точке К1 происходит отключение выключателей Q110, обоих присоединений: 310А и Г1. В табл. 3 представлены возможные сигналы, приходящие от защит выключателей: они приобретают значения $X_i = 0$, если защита не сработала, и $X_i = 1$, если защита сработала.

Таблица 3.
Логическая реализация алгоритма

Table 3.
Logical implementation of the algorithm

№	Q110	Q310А цеха 2	Q310А цеха 1	QГ1	Выходной сигнал
	X_1	X_2	X_3	X_4	Y
1	1	1	1	1	1
2	0	1	1	1	1
3	1	0	1	1	1
4	1	1	0	1	1
5	1	1	1	0	1

IV. Выводы

Предложены структура и состав системы гибридной релейной защиты, специально предназначенной для применения на предприятиях минерально-сырьевого комплекса, которые характеризуются повышенным

риском воздействия газов и пыли, а соответственно – повышенными требованиями к селективности, быстрдействию и надежности. Данная система включает в себя логическую защиту, как основную, обеспечивающую селективное отключение поврежденного участка без выдержки времени, а также максимально токовую защиту мгновенного действия, как резервную, обеспечивающую без выдержки времени неселективное отключение сети. Предложенные алгоритмы работы централизованного автоматического повторного включения и ввода резерва направлены на уменьшение времени простоя оборудования предприятия вследствие распада системы электроснабжения из-за отказа основной логической защиты и неселективного отключения МТЗ. Данные алгоритмы обеспечивают восстановление системы электроснабжения предприятия без участия диспетчера даже в случае отказа одной из защит, и разрабатываются конкретно под каждое предприятия для его конфигурации системы электроснабжения.

Предложенная система позволяет интегрировать участки системы электроснабжения с релейной защитой, выполненной на микропроцессорных реле с участками, защищенными релейной защитой с электромеханическими реле.

© Минакова Т.Е., 2024

© Михайлов Д.А., 2024

Поступила в редакцию 01.12.2023

Принята к публикации 20.12.2023

Received 01.12.2023

Accepted 20.12.2023

Библиографический список

- [1] Ключев Р.В., Босиков И.И., Гаврина О.А. Повышение эффективности релейной защиты на горно-обогатительном комбинате // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 300-311. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.14
- [2] Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Pelenev D.N. Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 052027. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052027
- [3] Рясков Ю.И., Шайтор Н.М., Горпинченко А.В. Обзор видов защиты асинхронных двигателей, используемых в энергетических системах и комплексах // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. № 22 (4). С. 107-115. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-107-115
- [4] Ivanchenko D.I., Voytyuk I.N., Smirnov A.I. Influence of the relative location of distributed energy sources on the current protection of the electric network // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1753. 012043. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012043

- [5] Tariq R., Alhamrouni I., Rehman A.U., Tageldin E., Shafiq M., Ghamry N.A., Hamam H. An optimized solution for fault detection and location in underground cables based on traveling waves // *Energies*. 2022. № 15 (17). 6468. DOI: 10.3390/en15176468
- [6] Лашенов М.Б. Влияние самозапуска мощных двигателей на систему электропитания // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 1. С. 134-140. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-134-140
- [7] Minakova T.E. Improving reliability of power supply of mineral-raw-material complex // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1753. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012032
- [8] Maresch K., Marchesan G., Cardoso G., Borges A. An underfrequency load shedding scheme for high dependability and security tolerant to induction motors dynamics // *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 196. 107217. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107217
- [9] Сычев Ю.А., Костин В.Н., Сериков В.А., Аладьин М.Е. Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2023. № 1. С. 159-179. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159\
- [10] Пронина А.К., Путилин К.П., Майорова Ю.А. Защита асинхронных двигателей от внутренних замыканий обмотки статора // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2020. № 63 (5). С. 95-99. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-5-95-99
- [11] Полищук В.И., Крицкий М.В., Баннов Д.М., Малышев С.В. Применение унифицированных блоков микропроцессорной релейной защиты в задачах диагностики электрических машин // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. № 21 (6). С. 93-100. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100
- [12] Agwa A.M., Hassan H.M., Matter Z.E., Eisawy E.A. Electrical grid reliability assessment by fault tree analysis // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2020. № 17 (3). P. 1127-1134. DOI: 10.11591/ijceecs.v17.i3.pp1127-1134
- [13] Voropai N.I., Chulyukova M.V., Petrov A.A. Automatic emergency load control of electric power systems: trends, new solutions, problems // *IFAC-PapersOnLine*. 2022. № 55 (9). P. 12-17. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.003
- [14] Kulikov A., Loskutov A., Bezdushniy D. Relay protection and automation algorithms of electrical networks based on simulation and machine learning methods // *Energies*. 2022. № 15 (18). P. 6525. DOI: 10.3390/en15186525
- [15] Kornatka M., Gawlak A. An analysis of the operation of distribution networks using kernel density estimators // *Energies*. 2021. № 14 (21). 6984. DOI: 10.3390/en14216984
- [16] Воронин В.А., Непша Ф.С. Имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электроснабжения // *Записки горного института*. 2020. № 246. С. 633-639. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5

- [17] Абрамович Б.Н., Богданов И.А. Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий // Записки Горного института. 2021. № 249. С. 408-416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10

References

- [1] R.V. Kliuev, I.I. Bosikov and O.A. Gavrina, “Increasing the efficiency of relay protection at a mining and processing plant”, *Journal of Mining Institute*, vol. 248, pp. 300-311, 2021. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.14
- [2] B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev and D.N. Pelenev, “Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 327, 052027, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052027
- [3] J.I. Riaskov, N.M. Shaitor and A.V. Gorpichenko, “Review of types of protection for asynchronous motors used in energy systems and complexes”, *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 22, no. 4, pp. 107-115, 2019. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-107-115
- [4] D.I. Ivanchenko, I.N. Voytyuk and A.I. Smirnov, “Influence of the relative location of distributed energy sources on the current protection of the electric network”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1753, 012043, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012043
- [5] R. Tariq, I. Alhamrouni, AU. Rehman, E. Tageldin, M. Shafiq, N.A. Ghamry and H. Hamam, “An optimized solution for fault detection and location in underground cables based on traveling waves”, *Energies*, vol. 15, no. 17, 6468, 2022. DOI: 10.3390/en15176468
- [6] M.B. Lashchenov, “The influence of self-starting powerful engines on the power supply system”, *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, no. 1, pp. 134-140, 2019. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-134-140
- [7] T.E. Minakova, “Improving reliability of power supply of mineral-raw-material complex”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1753, 012032, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012032
- [8] K. Maresch, G. Marchesan, G. Cardoso and A. Borges, “An underfrequency load shedding scheme for high dependability and security tolerant to induction motors dynamics”, *Electric Power Systems Research*, vol. 196, pp. 107217, Jul. 2021. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107217
- [9] J.A. Sychev, V.N. Kostin, V.A. Serikov and M.E. Aladin, “Analysis of non-sinusoidal modes in power supply systems of mining enterprises with nonlinear loads and capacitor units”, *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, no. 1, pp. 159-179, 2023. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159
- [10] A.K. Pronina, K.R. Putilin and J.A. Maiorova, “Protection of asynchronous motors from internal short circuits of the stator winding”, *Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, vol. 63, no. 5, pp. 95-99, 2020. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-5-95-99
- [11] V.I. Polishchuk, M.V. Kritsky, D.M. Bannov and S.V. Malyshev, “Application of unified microprocessor relay protection units in electrical machine diagnostics”, *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, vol. 21, no. 6, pp. 93-100, 2019. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100

- [12] A.M. Agwa, H.M. Hassan, Z.E. Matter and E.A. Eisawy, “Electrical grid reliability assessment by fault tree analysis”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 17, no. 3, pp. 1127-1134, Mar. 2020. DOI: 10.11591/ijeecs.v17.i3.pp1127-1134
- [13] N.I. Voropai, M.V. Chulyukova and A.A. Petrov, “Automatic emergency load control of electric power systems: trends, new solutions, problems”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 9, pp. 12-17, Jan. 2022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.003
- [14] A. Kulikov A., A. Loskutov and D. Bezdushniy, “Relay protection and automation algorithms of electrical networks based on simulation and machine learning methods”, *Energies*, vol. 15, no. 18, pp. 6525, 2022. DOI: 10.3390/en15186525
- [15] M. Kornatka and A. Gawlak, “An analysis of the operation of distribution networks using kernel density estimators”, *Energies*, vol. 14, no. 21, 6984, Oct. 2021. DOI: 10.3390/en14216984
- [16] V.A. Voronin and F.S. Nepsha, “Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system”, *Journal of Mining Institute*, vol. 246, pp. 633-639, 2020. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5
- [17] B.N. Abramovich and I.A. Bogdanov, “Increasing the efficiency of autonomous electrical systems of oil and gas enterprises”, *Journal of Mining Institute*, vol. 249, pp. 408-416, 2021. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Минакова Татьяна Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Tatiana E. Minakova, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.

Михайлов Даниил Александрович, магистрант Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Daniil A. Mihajlov, master of the Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.