

Системы адаптивной релейной защиты электрических сетей металлургических предприятий с распределенными источниками энергии

УДК 621.311



Д. И. Иванченко,
доцент,
канд. техн. наук,
эл. почта: ivanchenko_di@pers.spmi.ru



А. И. Смирнов,
ассистент,
канд. техн. наук,
эл. почта: smirnov_ai@pers.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Металлургические, нефтяные и угольные предприятия в России являются основными потребителями электроэнергии. При этом современная металлургическая промышленность характеризуется растущим уровнем потребления электрической энергии, которая необходима не только при реализации электрометаллургических технологий, таких как плавка в дуговых и индукционных печах, но и таких процессов, как измельчение, смешивание, транспортирование материала, прокатка. Кроме того, электрическая энергия требуется для работы устройств автоматического управления, освещения, систем охлаждения и др. [1].

Для решения задачи надежного и бесперебойного обеспечения электрической энергией, согласно Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года, приоритетными направлениями энергетической промышленности являются интеграция в ЕЭС России источников распределенной генерации (РГ), внедрение умного потребления и микрогенерации для локальных и удаленных потребителей [2, 3]. Альтернативные источники энергии уже используют Норникель, ЕВРАЗ, ММК, РУСАЛ, Северсталь и другие крупные потребители отрасли. Более 60 % внедренных систем РГ приходится на Центральную Россию, Сибирь и Урал.

В статье рассматривается влияние источников РГ на работу электрической сети металлургических предприятий. Развитию базы РГ на возобновляемых источниках посвящено немало публикаций [2, 4–6], однако использование электрической сети металлургических предприятий имеет специфические особенности, например

Современная металлургическая промышленность характеризуется растущим уровнем потребления электрической энергии, необходимым для обеспечения технологического процесса. Одним из основных подходов к решению задачи эффективного и бесперебойного электроснабжения предприятий, в том числе металлургических, согласно Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года, является применение систем распределенной генерации (РГ). Такие системы отличаются повышенными требованиями к устройствам релейной защиты и автоматики (РЗА), обеспечивающим надежность работы энергосистем и, соответственно, снабжение предприятий электрической энергией.

В работе выполнен анализ проблем, возникающих при работе устройств РЗА в системах РГ. Проведено моделирование работы максимальной токовой защиты (МТЗ) при изменении топологии электрической сети с учетом влияния источников РГ. Проведенные исследования показали ограничения по применению традиционных устройств РЗА в сетях с источниками РГ, позволили выделить основные факторы, влияющие на работу МТЗ. На основе анализа результатов моделирования и предлагаемых методов решения проблемы применения устройств РЗА в сетях с источниками РГ было показано, что устройства РЗА должны быть адаптивными. Для решения задачи динамической подстройки защиты к изменению токов короткого замыкания (КЗ) был предложен адаптивный алгоритм выбора уставок срабатывания защиты от КЗ. Алгоритм протестирован на компьютерной модели распределительной сети с несколькими генераторами и потребителями, в которой имитировали динамические режимы электрической сети металлургического предприятия, и показал эффективность работы в подобных сетях.

Ключевые слова: распределенная генерация, релейная защита, максимальная токовая защита, короткое замыкание, адаптивная защита, автоматизация сетей.

DOI: 10.17580/tsm.2023.04.03

изменения режимов работы электросети, вызванные технологическими процессами; возможность смены направления потоков мощности в автономном режиме; появление высших гармоник при использовании дуговых печей [7] и т. д. Все эти факторы оказывают негативное влияние на работу систем релейной защиты и автоматики (РЗА), что может привести к повреждению оборудования при коротких замыканиях (КЗ) в электросети.

Постановка проблемы

При использовании электростанций на основе альтернативных источников энергии сетевые компании и предприятия, устанавливающие объекты РГ, сталкиваются с рядом технических проблем, вызывающих финансовые потери [8, 9], в числе которых:

- механические повреждения из-за воздействия ударных токов КЗ;
- нарушения динамической устойчивости объектов РГ;
- неселективные отключения генераторов при срабатывании систем РЗА на смежных участках для ликвидации КЗ; при этом обесточиваются участки, способные продолжать работу в автономном режиме;
- значительные сложности обеспечения селективного срабатывания систем РЗА для ликвидации аварийного участка;
- трудности обеспечения надежного энергоснабжения потребителей при переходе участка сети на автономную работу.

В условиях увеличения выходной мощности генерации электроэнергии в энергосистеме ужесточаются требования, предъявляемые к устройствам РЗА. В целях обеспечения соответствия этим требованиям разрабатывают новые предложения по усовершенствованию принципов и методов работы систем РЗА, в том числе основного метода защиты от КЗ — максимальной токовой защиты (МТЗ) [10–12].

Первым шагом в разработке стратегий и алгоритмов адаптивной защиты для сетей с РГ будет оценка ее влияния на токовую защиту, что позволит расширить существующую концепцию защиты электрических сетей (Концепция разработки релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса ПАО «Россети»). Эта работа ориентирована на обеспечение коммуникации между устройствами по компьютерной сети [13, 14] и включение в этот процесс сбора и обработки данных в распределительных электрических сетях [15], поскольку именно эти сети позволяют контролировать и управлять параметрами каждого устройства РЗА. Разработанные стратегии следует учитывать при создании быстрых, селективных и надежных схем защиты, способных решить указанные проблемы при наличии в сети источников РГ. Помимо этого, нужно принимать во внимание возможности управления энергопотреблением в условиях изолированной энергосистемы [16].

Задача работы — создание алгоритма выбора принципов уставок срабатывания защиты, соответствующего всем требованиям, обусловленным применением систем РГ в сети металлургических предприятий.

Методология исследования

Для реализации адаптивности выбрана МТЗ, которая является основным типом РЗА от КЗ для всех топологий электросети. Условие срабатывания токовой защиты определяется значением тока КЗ в точке установки защиты и имеет простой способ расчета [17, 18]. Однако при работе сети с устройствами РГ в случае их подключения или отключения меняется топология электросети, что приводит к изменению возможных

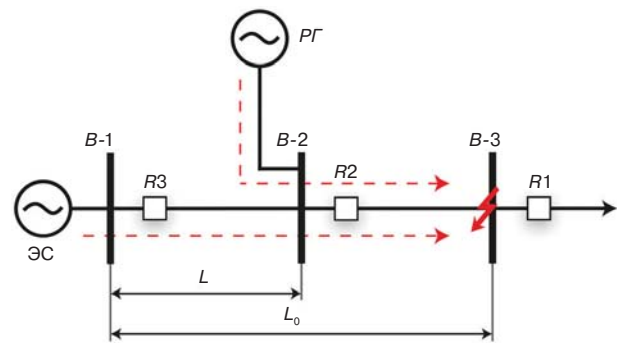


Рис. 1. Типовой фрагмент участка электросети с возникающим снижением чувствительности токовой защиты: ЭС — электростанция; РГ — источник распределенной генерации; R1–R3 — реле; B-1–B-3 — подстанции; L — расстояние до источника РГ; L₀ — расстояние, на котором имитируется КЗ

токов КЗ и, как результат, снижению эффективности работы защиты.

Среди основных факторов, влияющих на работу защиты, можно выделить снижение чувствительности и ложные срабатывания устройств РЗА. На **рис. 1** представлен характерный фрагмент участка сети с дополнительным источником генерации электроэнергии, подключенным к подстанции B-2.

Для оценки влияния дополнительной генерации электроэнергии на величину тока, возникающего на подстанции, необходимо рассчитать базовое значение тока КЗ на всем участке от подстанции B-1 до B-3, где на расстоянии L подключен источник генерации, а на расстоянии L₀ вблизи B-3 имитируется трехфазное КЗ. После преобразований, представленных в работах [19, 20], ток трехфазного КЗ I_{short} определяется уравнением

$$I_{short} = \frac{U_0 \cdot (Z_{ps} + D \cdot Z_{line} + Z_{dg})}{\sqrt{3} \cdot ((Z_{line} \cdot Z_{dg} + Z_{ps} \cdot Z_{dg} + Z_{ps} \cdot Z_{line}) + D \cdot Z_{line} (Z_{line} - Z_{ps}) - D^2 Z_{line}^2)}, \quad (1)$$

где D — коэффициент удаления устройства РГ относительно общей длины фидера L₀ от подстанции B-1; Z_{ps} — полное сопротивление энергосистемы; Z_{line} — сопротивление линии электропередач; Z_{dg} — сопротивление источника генерации; U₀ — напряжение системы.

Следующее уравнение описывает вклад в общий ток КЗ от основного источника электроэнергии:

$$I_{short_R3} = \frac{U_0 \cdot Z_{dg}}{\sqrt{3} \cdot ((Z_{line} \cdot Z_{dg} + Z_{ps} \cdot Z_{dg} + Z_{ps} \cdot Z_{line}) + D \cdot Z_{line} (Z_{line} - Z_{ps}) - D^2 Z_{line}^2)}. \quad (2)$$

Таким образом, вклад основного источника электросети в ток КЗ будет зависеть от полного сопротивления фидера, мощности источника дополнительной генерации и его удаленности от места повреждения электросети. Для построения зависимостей были произведены расчеты на смоделированном в программной среде Matlab участке электросети с фидером общей длиной 50 км и дополнительным генератором,

мощность которого увеличивалась с шагом в 1 МВт. По результатам компьютерного моделирования подтверждено уменьшение измеряемого тока КЗ на токовой защите В-1 до 34 %, выполняющей функции резервной защиты при КЗ на подстанции В-3 при изменении мощности в диапазоне от 1 до 10 МВт (рис. 2).

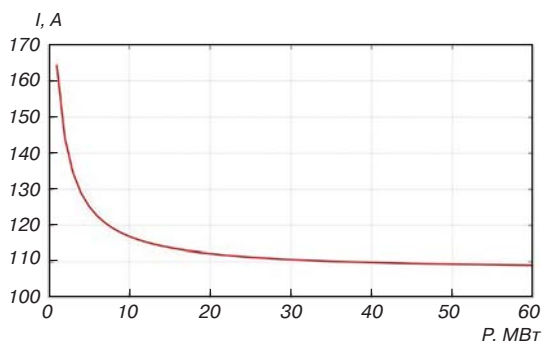


Рис. 2. Изменение тока на подстанции В-1 в зависимости от выходной мощности РГ в момент КЗ

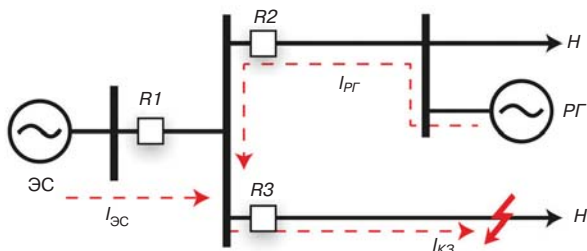


Рис. 3. Типовой фрагмент участка электросети с ложным отключением исправного участка:
 ЭС — электростанция; R1–R3 — реле; H — нагрузка;
 $I_{КЗ}$ — ток КЗ; $I_{РГ}$ — ток РГ; $I_{ЭС}$ — ток, поступающий с ЭС

Таблица 1
Коэффициент чувствительности МТЗ для основной защищаемой зоны при добавлении дополнительного источника

Длина линии, км	Без РГ	Мощность P, МВт			
		1	3	6	9
50	1,508	1,895	2,109	2,196	2,231
40	1,516	1,913	2,117	2,204	2,239
30	1,524	1,915	2,123	2,212	2,246
20	1,522	1,927	2,134	2,23	2,251
10	1,531	1,931	2,129	2,219	2,253
5	1,532	1,925	2,133	2,223	2,254

Таблица 2
Коэффициент чувствительности МТЗ дальнего резервирования при добавлении дополнительного источника

Длина линии, км	Без РГ	Мощность P, МВт			
		1	3	6	9
50	1,281	0,425	0,345	0,252	0,214
40	1,312	0,455	0,375	0,282	0,244
30	1,333	0,537	0,455	0,366	0,325
20	1,371	0,515	0,439	0,347	0,304
10	1,420	0,565	0,485	0,391	0,356
5	1,412	0,555	0,475	0,387	0,344

Коэффициент чувствительности МТЗ, рассчитанный численным методом для основной релейной защиты и защиты дальнего резервирования, представлен в табл. 1 и 2.

Полученные коэффициенты чувствительности для основной защиты ($k_{\chi} \geq 1,5$) и защиты дальнего резервирования ($k_{\chi} \geq 1,2$) соответствуют минимальным требованиям Правил устройства электроустановок (ПУЭ) для сети без источника РГ. Однако при подключении источников РГ различной мощности наблюдаются значительные отклонения от требований, что может привести к ложным срабатываниям или несрабатываниям МТЗ.

На рис. 2 видно, что значительное влияние на токи КЗ оказывают дополнительные источники мощностью от 1 до 10 МВт. Данный диапазон мощностей характерен для альтернативных источников энергии, которые могут изменять выходную мощность в зависимости от климатических условий, а следовательно, требуют корректировки срабатывания токовой защиты для предотвращения нештатных ситуаций.

Ложное срабатывание МТЗ на исправном участке происходит из-за вклада дополнительных источников электроэнергии в ток КЗ на смежном участке (рис. 3). В этом случае ток КЗ направлен вверх по фидеру к месту КЗ на смежном участке, и появляется вероятность срабатывания реле R2 быстрее, чем реле R3. Для исследования ложных срабатываний имитационная модель, используемая ранее, расширена в соответствии с рис. 3.

Место повреждения на добавленном участке изменяется с шагом 5 км в интервале 1–50 км. Также для каждого отдельного опыта относительное расположение генератора на смежном участке смещается на 5 км. Изменения вклада в ток КЗ регистрируются для РГ мощностью 1–9 МВт. Результаты исследования изменения тока КЗ на исправном участке в зависимости от расположения дополнительного источника электроэнергии и места КЗ на поврежденном участке показаны на рис. 4. Согласно расчету тока срабатывания РЗА по направлению потока мощности для исправного участка, на графике представлены зоны ложного срабатывания и несрабатывания РЗА.

Результаты моделирования показали, что при мощности источника РГ 1 МВт, расположенного на любом расстоянии от общей подстанции, не произойдет ложного срабатывания максимального токового реле в позиции R2 при КЗ на смежном участке, так как в этом случае сработает токовая отсечка в позиции R1 без выдержки времени. При мощности источника РГ 6–9 МВт, расположенного на расстоянии до 12,5 % от общей длины фидера, зона ложного срабатывания защиты (на графике обозначена синим цветом) расширяется, и величина тока не обеспечивает срабатывание токовой отсечки в позиции R1. При этом заданная выдержка времени МТЗ в позиции R1 создает вероятность ложного срабатывания реле R2. Кроме того, наибольшее влияние дополнительных источников

электроэнергии на ложное срабатывание защиты происходит при непосредственной близости источника к распределительной подстанции. Таким образом, для предотвращения отключения исправных участков необходимо согласование параметров РЗА на смежных участках при работе как в прямом, так и в обратном направлении потока мощности.

Для предотвращения неправильной работы РЗА рекомендуется изменять уставку срабатывания защиты в соответствии с текущей топологией сети или использовать принципиально другие неадаптивные схемы защиты.

Так, в работах [21–23] предложена стратегия адаптивной защиты, которая разделяет существующие сети на зоны и поддерживает баланс нагрузки для обновления параметров. Однако подобная стратегия не подходит для металлургической отрасли по причине разнородности потребителей, поскольку поддержание баланса нагрузки приведет к неэффективному использованию энергоресурсов.

Адаптивная система, основанная на методике оценки состояния обнаруженных аварийных участков и определения величины тока КЗ при работе сети в островном режиме, предложена авторами работ [24–26]. Стратегии адаптивной токовой защиты, управляющие выходной мощностью генераторов энергии для уменьшения вклада в ток КЗ для правильной работы реле с предустановленными параметрами, предложены авторами работ [27, 28]. Однако представленная методика эффективна только в сетях с постоянной топологией и не предусматривает изменения настроек токовых реле.

Среди существующих РЗА, применяемых в распределительных сетях металлургических предприятий, можно выделить дифференциальную защиту как наиболее чувствительную к КЗ. Однако она не будет корректно срабатывать, если к защищаемой зоне подключить источник РГ [29–31]. В работах [32, 33], обсуждается применение фильтра Калмана для повышения точности дистанционной защиты и оптимизации данных, получаемых с регистрирующих устройств. Однако на эффективность дистанционной защиты существенно влияют переходные процессы, наличие которых в значительной степени обусловлено спецификой металлургической отрасли. У устройства РЗА, работающего на основе контроля напряжения, при совместном функционировании источника РГ и центральной энергосистемы снижается чувствительность [34, 35]. Поэтому для решения проблемы динамического выбора уставок срабатывания адаптивной максимальной токовой релейной защиты был предложен алгоритм расчета уставок на основе определения взаимного сопротивления, описанный в теории линейных цепей [36] для определения сопротивления между источниками и местом КЗ.

Разработанный алгоритм преобразует электросеть в граф [37], где ребра — сопротивление элементов, а вершины — их соединения. Это позволяет учитывать

сопротивления воздушных и кабельных линий, генераторов и трансформаторов на всех участках. Каждое ребро характеризуется тремя параметрами: сопротивлением ребра и двумя номерами вершин графа, между которыми находится ребро.

Алгоритм работает циклически в несколько последовательных этапов, на каждом из которых производится соответствующее преобразование графа цепи.

На *первом этапе* происходят поиск и удаление ветвей дерева, которые имеют только одну точку присоединения к графу цепи (другая точка не включена в цепь). После удаления таких ветвей цикл начинается заново.

На *втором этапе* преобразуются последовательно соединенные ветви. Если две ветви имеют одну общую вершину, которая не является одной из точек, между которыми рассчитывается сопротивление, и не принадлежит другим ветвям, то такие ветви считаются последовательно соединенными и их сопротивления складываются:

$$Z_{ij} = Z_i + Z_j, \quad (3)$$

где Z_{ij} — сопротивление ветви между вершинами i и j ; Z_i и Z_j — сопротивления ветвей, соединенных с вершинами i и j по схеме «звезда» соответственно.

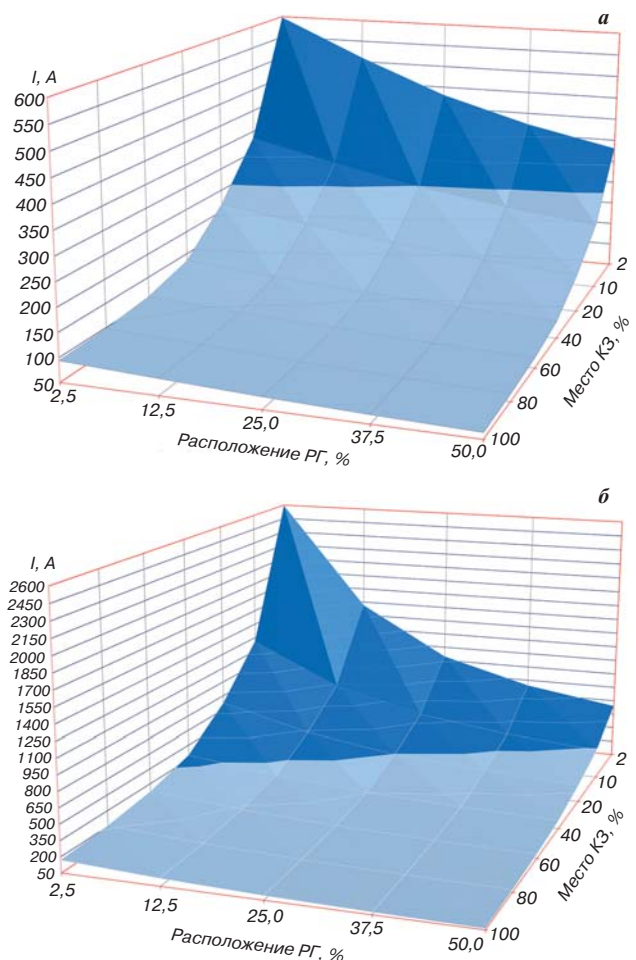


Рис. 4. Ложное отключение исправного участка при мощности распределенной генерации, МВт: а — 1; б — 9

После преобразования последовательных ветвей цикл начинается заново.

На *третьем этапе* происходит преобразование параллельно соединенных ветвей. Если две ветви имеют две общие вершины, такие ветви считаются параллельно соединенными и складываются их проводимости, обратно пропорциональные сопротивлениям.

$$Z_{ij} = \frac{Z_i Z_j}{Z_i + Z_j}. \quad (4)$$

После преобразования параллельных ветвей цикл начинается заново.

На *четвертом этапе* происходит последовательное преобразование n -лучевых звезд, начиная со звезд с максимально большим числом лучей и заканчивая 3-лучевыми. Если n ветвей имеют одну общую вершину, такие ветви заменяются системой ветвей,

попарно соединяющих точки, которые ветви n -лучевой звезды соединяли с вершиной. Проводимости ветвей при замене n -лучевой звезды определяются по формуле

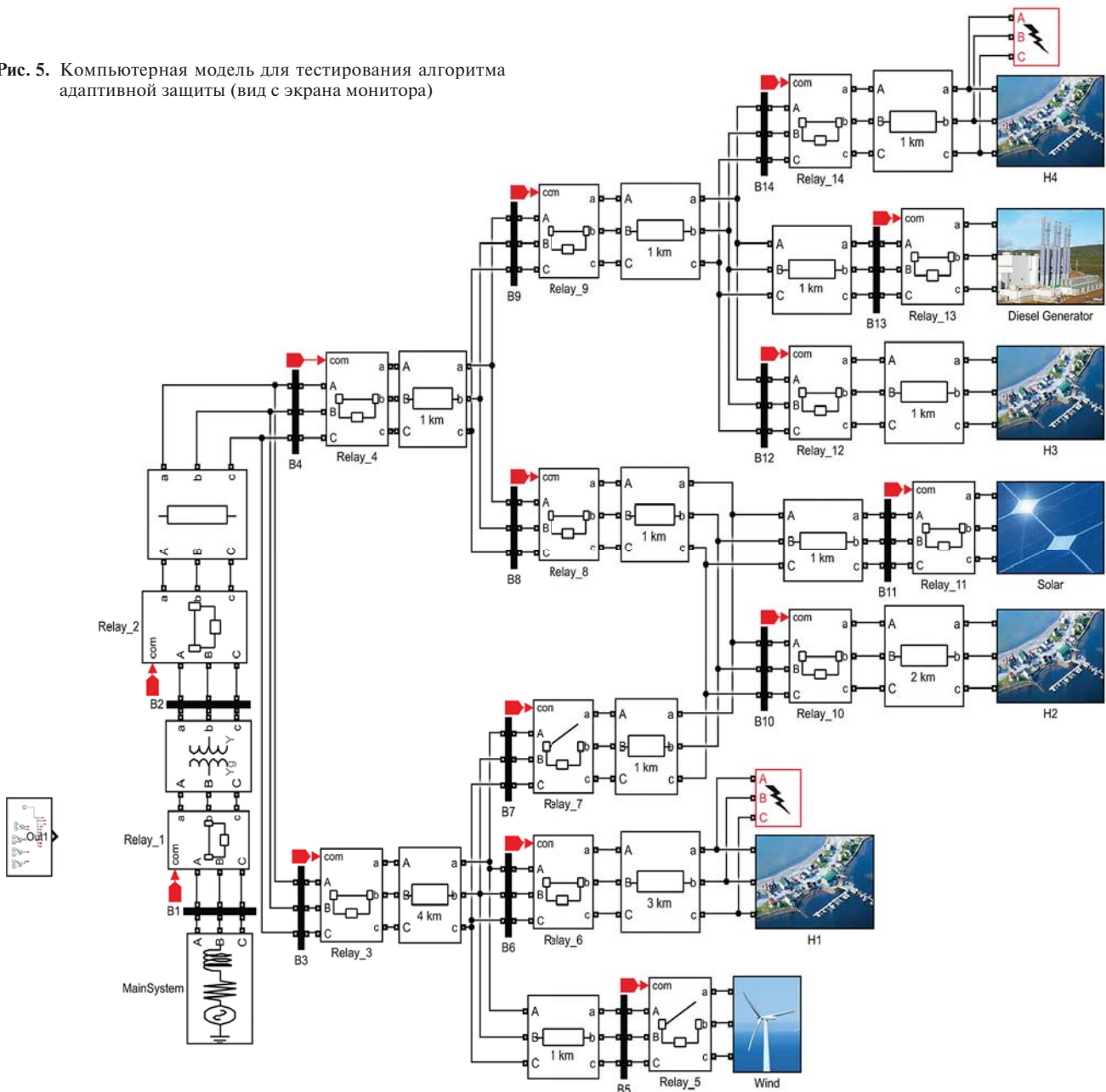
$$Z_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{Z_i Z_j}{Z_k}, \quad (5)$$

где Z_k — сопротивления ветвей по схеме «звезда».

После преобразования каждой звезды цикл начинается заново.

Алгоритм завершает работу, если в результате преобразований в графе остается одна ветвь и ее вершины соответствуют точкам, между которыми определяется сопротивление. Сопротивление этой ветви соответствует искомому значению сопротивления. В случае если в результате работы алгоритма остаются две ветви, не имеющие общей точки,

Рис. 5. Компьютерная модель для тестирования алгоритма адаптивной защиты (вид с экрана монитора)



то электрическое сопротивление будет стремиться к бесконечности.

Разработанный алгоритм позволяет выполнять вычисления для различных условий расчета и исходных данных, что является его главным преимуществом. Например, рассчитывать сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности или отдельно вычислять активные и индуктивные составляющие полного сопротивления [38, 39]. Поскольку алгоритм разработан на основе теории графов и в качестве входных параметров принимает массив структуры сети, это позволяет интерпретировать его для расчета уставок релейной защиты, так как основным параметром при расчете токов КЗ и уставок срабатывания является сопротивление между источником и местом КЗ.

Обсуждение результатов исследований

Проверку работоспособности алгоритма выполняли на компьютерной модели распределительной сети с несколькими генераторами и потребителями (рис. 5), которая имитировала различные сценарии изменения выходной мощности, топологии сети и возникновения трехфазного КЗ. Главная задача построения модели состоит в имитации динамических режимов сети металлургического предприятия. Модель включает в том числе нелинейные электрические нагрузки различного типа, неуправляемый выпрямитель, тиристорный выпрямитель, тиристорный регулятор мощности и смешанную эквивалентную нелинейную нагрузку [40], которые реализованы в блоках нагрузок модели. Таким образом, нагрузка Н2 представляет собой основное технологическое оборудование цеха металлургического производства (дуговые, индукционные печи), Н3 и Н4 — вспомогательное оборудование (освещение, конвейерные установки и т. п.), а Н1 — моделирует отдельное производство в рамках предприятия. В качестве дополнительных источников используют дизель-генератор, солнечную и ветряную подстанции, обеспечивающие плавность динамических режимов в сети.

На рис. 6 отображены изменения тока срабатывания уставки токовой защиты на подстанциях В6, В7 с помощью разработанного алгоритма, отслеживающего состояние режимов работы сети и выходной мощности источников.

На 0,62 с имитируется КЗ (рис. 7), у нагрузки Н1 срабатывает защита, отключая неисправный участок и ликвидируя КЗ. Кроме того, срабатывает защита на В7 для отключения смежного участка с потребителями для поддержания бесперебойной работы от других источников электроэнергии, а также корректной работы системы автоматического повторного включения. Тестирование адаптивной системы защиты при различных сценариях работы сети показало эффективность предложенного алгоритма и позволяет обеспечить чувствительность защиты и бесперебойную работу сети с несколькими генераторами электроэнергии.



Рис. 6. Изменения тока срабатывания защиты в зависимости от состояния сети

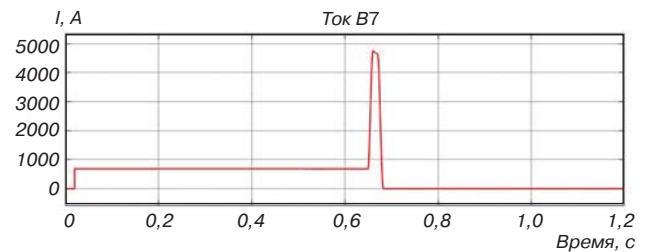


Рис. 7. Измерения тока короткого замыкания на подстанции В7 во время короткого замыкания

Реализовать алгоритм планируется в централизованном микропроцессорном блоке сбора и обработки информации о текущей конфигурации сети, который будет производить расчет уставок защиты для конкретных устройств и обеспечивать передачу информации. Оценку требований по быстродействию не производили, поскольку для централизованных устройств управления требования к вычислительной мощности и ширине канала передачи информации будут обусловлены размером и структурой сети, числом устройств релейной защиты и контролирующих устройств. В перспективе предполагается создание распределенных систем, в которых системы релейной защиты будут обмениваться между собой и получать информацию о структуре сети, а также самостоятельно производить расчет уставки за счет собственных вычислительных мощностей.

Дальнейшие исследования направлены на сравнение существующих и перспективных алгоритмов адаптивной защиты и их оптимизацию, а также изучение совместной работы токовой защиты с другими видами защит в сетях с РГ для комплексного подхода к интеллектуальному проектированию систем защиты промышленных предприятий.

Создание систем РГ является одной из основных задач в соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации и позволяет обеспечить надежное и энергоэффективное электроснабжение, что особенно актуально для предприятий цветной металлургии. Проведенные исследования являются ключевыми для решения задачи внедрения систем РГ в реальных условиях.

Заключение

Рассмотренные ограничения по применению традиционных устройств РЗА в сетях с источниками РГ позволили выделить основные факторы, которые влияют

на правильную работу защиты. На основе анализа результатов моделирования и предлагаемых методов решения проблемы применения устройств РЗА в сетях с источниками РГ показано, что РЗА должны быть адаптивными для обеспечения чувствительности основной и резервной защиты согласно требованиям ПУЭ. Предложен адаптивный алгоритм корректировки уставок срабатывания РЗА, который был протестирован

на компьютерной модели распределительной сети для различных сценариев изменения параметров источников и показал эффективность работы в сетях с дополнительными источниками энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2023. No. 4. pp. 24–31
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.03

ADAPTIVE RELAY PROTECTION OF METALLURGICAL ELECTRIC POWER GRIDS WITH DISTRIBUTED ENERGY SOURCES

Information about authors

D. I. Ivanchenko, Associate Professor¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: ivanchenko_di@pers.spmi.ru
A. I. Smirnov, Assistant Lecturer¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: smirnov_ai@pers.spmi.ru

¹Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

Today's metallurgical industry is characterized with a growing consumption of electric power necessary to maintain production. According to the Energy Strategy of the Russian Federation till 2035, one of the basic solutions for efficient and uninterrupted power supply for (metallurgical) production sites includes the use of distributed generation systems. Such systems require highly reliable relays and controls ensuring reliability of power grids and power supply to production sites.

This paper analyzes certain issues that may occur with relays and controls being a part of distributed generation systems. The authors simulated activation of overcurrent relays as the result of changed power grid topology and accounting for the impact of distributed generation sources. The study reflected limitations on the application of conventional relays and controls in grids with distributed generation sources and helped identify key factors affecting the overcurrent protection. Having analyzed the simulation outcomes, as well as the proposed solutions for the use of relays and controls in grids with distributed generation sources, the authors demonstrate that such relays and controls should be adaptive.

To solve the problem of dynamic adaptation of relays to changed short circuit currents, the authors propose an adaptive algorithm for choosing the short circuit protection actuation setpoints. The algorithm was tested on a computer model of a distribution system comprising several generators and consumers, which simulated the dynamic modes of the electric power system of a metallurgical site. The algorithm proved effective.

Key words: distributed generation, relay protection, overcurrent protection, short, adaptive protection, grid automation.

References

1. Savchenkov S., Bazhin V. Y., Volkova O. Tendencies of innovation development of the Russian iron and steel industry on the base of patent analytics for the largest national metallurgical companies. *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 20. pp. 76–82. DOI: 10.17580/cisir.2020.02/16.
2. Veselov F. V., Kulagin V. A., Makarova A. S. Prospects of the global and Russian electric power industries amid technological development. *Electric Power NEWS*. 2019. No. 4. pp. 4–16.
3. Gorshkova N. A., Gurevich Yu. E., Ilyushin P. V. Innovative areas in the automation of distributed generation facilities integrated into distribution grids. *Relay protection and automation*. 2013. No. 1. pp. 48–55.
4. Kuznetsov N., Konovalova O. Development of distributed power generation in the Murmansk Region. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2021. No. 5. pp. 122–127.
5. Samylovskaya E., Makhovikov A., Lutonin A., Medvedev D., Kudryavtseva R. Digital technologies in Arctic oil and gas resources extraction: global trends and Russian experience. *Resources*. 2022. Vol. 11, No. 3. p. 29.
6. Shklyarskiy Y. E., Guerra D. D., Tavoleva E. V. et al. The influence of solar energy on the development of the mining industry in the Republic of Cuba. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 249. pp. 427–440.
7. Martynov S. A., Bazhin V. Yu., Petrov P. A. A digital control system designed for ore thermal furnaces producing metallurgical silicon. *Tsvetnye Metally*. 2021. No. 1. pp. 70–76. DOI: 10.17580/tsm.2021.01.08.

8. Ilyushin P. Distributed generation facilities as part of a power grid: Technical issues and possible solutions. *Energoekspert*. 2015. No. 1. pp. 58–62.
9. Varganova A. V., Goncharova I. N., Bayramgulova Yu. N., Efimova V. A. A procedure for assessing the deployment efficiency of distributed generation sources. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2019. Vol. 19, No. 4. pp. 52–58.
10. Nagay V. Remote backup protection of transmission substations of radial overhead circuits. *Elektrichestvo*. 2002. No. 4. pp. 2–7.
11. Nagay V. Relay protection of tapping stations. Moscow : Energoatomizdat, 2002. 311 p.
12. Nagay V., Chizhov K. V., Sarry S. V., Kotlov M. M. et al. Optimization of directional overcurrent relays for remote backup of radial overhead lines with transformers on taps. *Electrical stations*. 1998. No. 11. pp. 39–43.
13. Mazakov E., Matrokhina K., Trofimets V. Traffic management at the enterprises of the mineral industry. Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. London : CRC Press, 2020. pp. 397–405.
14. Safullin R., Afanasiev A., Reznichenko V. Further development of monitoring and control systems for smart production complexes. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 237. pp. 322–330.
15. Kryltsov S., Makhovikov A., Korobitsyna M. Novel approach to collect and process power quality data in medium-voltage distribution grids. *Symmetry*. 2021. Vol. 13, No. 3. p. 460.
16. Zhukovskiy Yu. L., Lavrik A. Yu., Semenyuk A. V., Vasilkov O. S. Potential control over electric power consumption in an isolated power grid of a remote community. *Sustainable Development of Mountain Territories. Series: Earth and Planetary Sciences*. 2020. Vol. 12, No. 4. pp. 583–591.
17. Zatsepina E. P., Klimentiev V. V., Lykov N. A. Overcurrent protection and current cutoff on the ATmega series microcontrollers. *News of higher educational institutions of the Chernozem region*. 2020. No. 2. pp. 52–56.
18. Shestakov D. N. Design of overcurrent protection and current cutoffs of 6, 10, 35 kV lines. 2007. Available at: <https://www.studmed.ru/shestakov-d-n-raschet-maksimalnoy-tokovoy-zaschity-i-tokovyh-otsechek-linii-6-10-35-kv-6a63d5037ae.html>.
19. Eroshenko S. A., Egorov A. O., Senyuk M. D. et al. Calculation of short circuit currents in power grids: Learner's guide. Publishing House of the Ural University, 2019. 104 p.
20. Serebryakov A. S., German L. A., Osokin V. L. et al. Analysis of methods for calculating the short circuit currents for a Y/Δ-11 transformer. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2017. No. 5. pp. 19–25.
21. Brahma S. M., Girgis A. A. Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19, No. 1. pp. 56–63.
22. Yang H., Wen F., Ledwich G. Optimal coordination of overcurrent relays in distribution systems with distributed generators based on differential evolution algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems. Wiley Online Library*, 2013. Vol. 23, No. 1. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/etep.635>.
23. Yazdanpanahi H., Li Y. W., Xu W. A new control strategy to mitigate the impact of inverter-based DGs on protection system. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3, No. 3. pp. 1427–1436.
24. Alam M. N. Adaptive protection coordination scheme using numerical directional overcurrent relays. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. Vol. 15, No. 1. pp. 64–73.
25. Baran M., El-Markabi I. Adaptive over current protection for distribution feeders with distributed generators. *Power Systems Conference and Exposition*. 2004. pp. 715–719.
26. Mahat P. et al. A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011. Vol. 2, No. 3. pp. 428–437.
27. Sulaiman M., Muhammad S., Khan A. Improved solutions for the optimal coordination of doers using firefly algorithm. *Hindawi*. 2018. Vol. 2018. Article ID 7039790.
28. Karrizosa M. Kh., Stankovich N., Baydarov A. I. et al. A control system for trunk DC power line with modular multilevel converters. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 243. pp. 357–370.



29. Klyuev R., Bosikov I., Gavrina O. A. Enhanced efficiency of relay protection and controls at a mining and processing facility. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 248. pp. 300–311.
30. Bedekar P. P., Bhide S. R., Kale V. S. Optimum coordination of overcurrent relay timing using simplex method. *Electric Power Components and Systems*. 2010. Vol. 38, Iss. 10. pp. 1175–1193.
31. Irfan M., Oh S.-R., Rhee S.-B. An effective coordination setting for directional overcurrent relays using modified harris hawk optimization. *Electronics*. 2021. Vol. 10, No. 23. p. 3007.
32. Huynh D. H., Tran X. K. A modeling of distance protection relay based on Kalman filter: An application for Vietnam's 500kV power transmission lines. *2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*. 2017. pp. 157–161.
33. Brigadnov I., Lutonin A., Bogdanova K. Error state extended Kalman filter localization for underground mining environments: 2. *Symmetry*. 2023. Vol. 15, No. 2. p. 344.
34. Su C. et al. An adaptive control strategy of converter based DG to maintain protection coordination in distribution system. *5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*. 2014. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7028900>.
35. Javadian S., Haghifam M.-R. Implementation of a new protection scheme on a real distribution system in presence of DG. *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*. 2008. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4745215>.
36. Ulakhovich D. A. Fundamentals of linear electric circuits. St. Petersburg: BkhV-Peterburg, 2009. 816 p.
37. Atkins K. et al. The structure of electrical networks: a graph theory based analysis. *International Journal of Critical Infrastructures*. Inderscience Publishers, 2009. Vol. 5, No. 3. pp. 265–284.
38. Shcherbinin A., Naumov M., Subbotin E. Direct, reverse and zero sequence resistances determined with the help of mathematical modelling of electromagnetic processes. *Elektrotehnika*. 2021. No. 11. pp. 24–28.
39. Nurmatov O., Muminova M. Symmetrical component method applied for transient process studies: Analysis. *Power Industry and Energy Conservation: Theory and Practice: Proceedings of the 4th National Russian Conference*. 2018. 243–1.
40. Skamyin A., Shklyarsky Ya., Dobush V., Dobush I. Experimental determination of parameters of nonlinear electrical load. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 22. p. 7762.

Цифровая модель конвертера с регулируемыми водоохлаждаемыми фурмами

УДК 669.02.09



В. Ю. Бажин,
заведующий кафедрой металлургии,
профессор,
докт. техн. наук,
эл. почта: bazhin_vyu@pers.spmi.ru



Т. Р. Косовцева,
доцент кафедры информатики
и компьютерных технологий,
канд. техн. наук,
эл. почта: Kosovtseva_TR@pers.spmi.ru



А. З. Музипов,
аспирант кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
эл. почта: s225026@stud.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Вопросы ресурсо- и энергосбережения при переработке полиметаллического и техногенного сырья являются первостепенными при решении проблем минерально-сырьевого комплекса [1]. В связи с этим разработка новых технологий, основанных на фундаментальных научных подходах, может иметь большую практическую значимость как для развития металлургической отрасли, так и для подготовки молодых специалистов соответствующей направленности [2]. В целях снижения объемов техногенных отходов и улучшения экологической обстановки необходимо было разработать способ, при котором отходы одного

Конвертирование медных штейнов успешно применяют в течение длительного времени на многих предприятиях по всему миру. Для устойчивой работы печей и конвертеров необходим рациональный подбор режимов дутья, направленных на снижение потерь сырья и количества вредных выбросов. В целях развития программы ресурсоэнергосбережения, а также для решения экологических задач рассмотрена цифровая модель конвертера с регулируемыми водоохлаждаемыми фурмами. Предложен вариант переработки медьсодержащей шихты, основанный на принципиально новом способе подачи кислородно-воздушной смеси в расплав — пространственно-ориентированном, который позволяет максимально совместить в агрегате зоны теплогенерации и теплообмена. Экспериментально подтверждено многократное увеличение удельной дутьевой нагрузки по сравнению с известными способами подачи дутья. При помощи математического моделирования и построения 3D-моделей доказана целесообразность увеличения удельной производительности автогенной функции конвертера с цилиндрическим профилем при снижении потерь капель расплава и теплового излучения путем формирования пространственно-ориентированных струй, исходящих из фурм конвертера. Полученные математические модели указывают на возможность обеспечения устойчивой работы конвертера при регулярном, управляемом тепломассопереносе за счет создания центробежного эффекта газовой фазы над расплавом и при его заданном движении внутри рабочей зоны конвертера. С учетом размеров агрегата для плавки и, соответственно, различных значений кинетической энергии струй, новых условий поведения расплава исследованы процессы изменения поля скоростей вращения расплава. Разработанная схема может быть применена для вертикальных конвертеров, что обеспечит более эффективную переработку медьсодержащей шихты. Представленную цифровую модель возможно адаптировать и для других печей, в частности при переработке медьсодержащего сырья.

Ключевые слова: кислородный конвертер, фурма, направленные струи, медьсодержащее сырье, шлак, цифровая модель, CFD-моделирование.

DOI: 10.17580/tsm.2023.04.04