

СЕЛЕКТИВНОСТЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

А.В. Шмойлов

Томский политехнический университет

E-mail: shm_av@rambler.ru

Представлена классификация устройств и систем релейной защиты и автоматики, других средств контроля, произведен анализ их селективности, разработана вероятностная теория технического эффекта с учетом свойств функционирования контролируемого объекта. Это позволяет целенаправленно производить выбор, проектирование и разработку названных средств контроля.

Введение

Главное свойство релейной защиты и автоматики (РЗА) селективность в настоящее время недостаточно полно развито в части приспособленности к характеристикам контролируемого объекта [1–3]. Это обуславливает отсутствие однозначного знания о функциональных возможностях аппаратуры РЗА к особенностям конкретного защищаемого элемента в составе электрической сети и, как следствие, не совсем адекватную свойствам контролируемого объекта настройку выпускаемых промышленностью аппаратуры, а также разработку такой аппаратуры для удовлетворения специфических требований некоторых особых, уникальных и сложных объектов энергосистем. Ниже приведены результаты анализа селективности РЗА и представлены вероятностные методы, позволяющие количественно учесть свойство селективности.

Анализ свойств селективности

Средства релейной защиты и автоматики (РЗА) как и другие устройства и системы контроля и сигнализации должны быть отстроены от помех и тем самым могут претендовать на получение свойства селективности аварийного состояния автоматизируемого объекта, которое целесообразно назвать первым свойством селективности. Это свойство зависит от величины помех и от используемого вида параметра реагирования. Очевидно, чем меньше величина помех, тем выше селективность и наоборот. Что касается вида параметра реагирования, то последний обеспечивает тем большую селективность аварийного состояния, чем больше связан с контролируемым аварийным состоянием защищаемого объекта.

В качестве параметров реагирования для РЗА принимают как базовые электрические величины: ток и напряжение (чаще всего модули), так и всевозможные функции от этих величин. Достаточно часто из фазных электрических величин получают симметричные составляющие разных последовательностей. При этом составляющие нулевой и обратной последовательности в рабочих симметричных режимах имеют малые значения, а при несимметричных коротких замыканиях большие. Это различительное свойство обеспечивает сильную связь названных параметров реагирования с аварийным состоянием автоматизируемого объекта при коротком замыкании (КЗ), как правило, несимметричном и соответственно слабую связь в эксплуатационных рабочих режимах, что позволяет для

ряда электроустановок построить качественную защиту от КЗ. Автор разработал математический аппарат оценки взаимосвязи в чистом виде [4] и применил его для анализа взаимосвязи параметра реагирования РЗА с аварийным состоянием ряда релейных защит [5].

Другие функции базовых электрических величин, например, в виде произведения напряжения на ток (мощность) или отношения напряжения к току (сопротивление) также широко используются в РЗА для построения органов направления мощности и измерительных релейных органов сопротивления для дистанционных релейных защит и других средств автоматики.

Последние как показал анализ их помех являются весьма эффективными с точки зрения отстроенности от помех. Действительно, отношение напряжения к току, в том числе остаточного напряжения к току КЗ, является сопротивлением электрической цепи от места установки аппаратуры до нейтралей нагрузки, либо до места КЗ. Так получается потому, что и рабочие и остаточные напряжения формируются как произведения токов через аппаратуру дистанционной защиты на указанные сопротивления. Токи концентрируют в себе помехи, а напряжения содержат в своем составе помехи опосредованно через токи. Поэтому в отношении остаточного напряжения к току КЗ выявляется сопротивление или схемно-конструкторский параметр практически в чистом виде в случае контроля двухконцевых участков сети, частично зависящим от отношения токов: на контролируемом и противоположных концах в случае многоконцевых участков, на защищаемом объекте и внешних элементах в случае включения последних в область действия дистанционного релейного измерительного органа второй, третьей и т. д. ступеней защищаемого объекта. В целом дистанционный принцип в части помех лучше отстроен по сравнению с реагированием отдельно на токи или напряжения, т. к. помехи при этом в значительной степени оказываются скомпенсированными.

Для большого числа средств контроля параметром реагирования являются значения некоторой распределенной в пространстве контролируемого объекта физической величины в заданном месте (точке) этого пространства. Такие параметры реагирования целесообразно назвать полевыми. Устройства и системы, реагирующие на полевые параметры реагирования также целесообразно назвать полевыми. К ним относятся всевозможные сигнализа-

ции, защиты и автоматики в электрической части энергосистем: 1) сигнализация замыканий на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью, измерительные органы которой реагируют на распределенное практически равномерно по пространству сети напряжение нулевой последовательности и контролируется поэтому в любой удобной точке сети; 2) автоматики повышения и понижения рабочего напряжения сети, измерительные органы которых реагируют на распределенное по узлам и линиям сети в порядке нарастания или убывания напряжения и фиксируют последнее в заданных интересующих узлах; 3) автоматики частотной разгрузки путем отключения неответственной нагрузки при понижении одинаковой по всей энергосистеме статической частоты, а потому измеряемой в любой точке сети, 4) автоматической частотной компенсации путем снижения загрузки или отключения агрегатов соответственно при повышении указанной статической частоты и измеряемой аналогично в любой точке сети; 5) пожарной сигнализации, датчики которой реагируют на распределенную по пространству контролируемого оборудования или помещений температуру, излучение, продукты термической деструкции, задымленность и другие параметры реагирования в выбранных местах этого оборудования или помещений.

Кроме полевых средств контроля в силу сетевой структуры контролируемых объектов РЗА широко используются так называемые потоковые устройства и системы контроля, реагирующие не на значения полевого параметра в определенной точке пространства автоматизируемого объекта, а на потоки (токи или мощности) в ветвях электрической сети. К ним относятся все токовые РЗА, реагирующие на полные или симметричные составляющие токов, также на известные функции мощности и сопротивления, в состав аргументов которых входят токи.

Благодаря обязательному наличию коммутационных аппаратов, с помощью которых элементы (электрооборудование, двухконцевые и многоконцевые линии, секции и сборные шины) присоединяются к сети своими выводами или концами, имеется возможность выделить и отключить любой поврежденный элемент сети. Поскольку в качестве современных коммутационных аппаратов в подавляющем большинстве используются выключатели, способные отключать мощности или токи КЗ, возникает возможность ликвидации КЗ путем отключения от сети поврежденного элемента. Эта возможность может быть реализована автоматически, если аппаратура различает КЗ на элементе и вне его. Данное свойство оказывается достижимым, как показывает анализ, только у потоковых средств контроля. Такая потоковая аппаратура в виде РЗ в настоящее время повсеместно применяется, и это достигнуто в большинстве современных средств РЗ благодаря свойству селективно (правильно) отключать поврежденный элемент. Данное свойство селективности отличается от ранее определенного первого свойства селективности аварий-

ного состояния. Это другое свойство селективности, состоящее в способности выявлять поврежденный элемент с помощью разных мероприятий контроля потоков в поврежденных и неповрежденных элементах, можно назвать вторым свойством селективности поврежденных или ответственных за аварийное состояние компонентов.

Первое свойство селективности аварийного состояния как выше отмечено реализовано во всех средствах контроля. Второе же свойство селективности поврежденного элемента возможно лишь в потоковых устройствах и системах РЗА. При этом однако должны быть соблюдены также следующие требования. С одной стороны, должен быть правильно выбран параметр или критерий реагирования, обеспечивающий первое свойство селективности, а с другой стороны, этот параметр или критерий реагирования должен позволять разработать или применить мероприятия, позволяющие различать, где произошло КЗ на защищаемом или внешнем элементе, т. е. обеспечить выполнение второго свойства селективности.

В существующих средствах РЗА последнее требование осуществлено с помощью такого технического способа как блокирование действия релейных измерительных органов при КЗ вне автоматизируемого объекта. Прямая реализация этого способа возможна для случаев, когда просто, однозначно и в темпе реального времени можно сформировать блокирующий сигнал, запрещающий действие РЗ при КЗ на внешних элементах. Выполняется это с помощью дополнительной блокирующей системы контроля, подключенной к датчикам тока на концах (выводах) защищаемого объекта, фиксирующей направления потоков (токов) при внешних КЗ и передающей запрещающие сигналы на комплекты РЗ на всех концах (выводах) защищаемого объекта. Такое формирование блокирующего сигнала реализовано в РЗ линий с обменом информацией между комплектами на ее концах (варианты с блокирующим сигналом, разрешающим сигналом, контролем заданного полупериода промышленного тока в средствах, действующих по дифференциально-фазному принципу). При использовании дифференциального принципа запрещающий сигнал формируется неявным образом, т. е. схемным путем соединения датчиков на концах (выводах) защищаемого объекта. В ступенчатых токовых и дистанционных РЗ блокирование действия вторых и других ступеней осуществляется путем замедления их действия на время действия первых ступеней и других быстродействующих РЗ внешних элементов при КЗ на них, т. е. временное разделение действия ступеней РЗ автоматизируемого объекта и более быстродействующих РЗ внешних элементов.

Следует отметить, что разные блокирующие мероприятия, обеспечивающие второе свойство селективности РЗ, могут изменять требуемые свойства РЗ. Так, временное разделение действия аппаратуры ступенчатых РЗ автоматизируемых объектов при внешних повреждениях следует квалифицировать как неоптимальное или вынужденное, использование которой обеспечивает свойство селективности

за счет снижения качества РЗ (увеличения времени действия). Однако блокирование действия РЗ при внешних КЗ путем обмена информацией между комплектами на концах линий и схемным путем при использовании дифференциального принципа не ущемляют свойства быстродействия РЗ.

Анализ показывает, что второе свойство селективности потоковых систем автоматики позволяет также обеспечить или увеличить их свойство селективности. Однако достижение этого эффекта реализуется иначе по сравнению с РЗ.

Так, в случае автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ), контролирующей активную мощность в сечении электропередачи, найдено такое решение. Отличительной особенностью этого решения является использование потоков мощности, как обычно, но не в сечениях электропередачи, весьма инвариантных к процессам потери устойчивости конкретных синхронных машин. В сечениях как фактические, так и предельно-допустимые (ПД) мощности всех агрегатов смешаны и весьма опосредованно связаны с аварийным состоянием каждого из агрегатов (генераторов). Измеренные непосредственно в цепях каждого агрегата фактическая активная мощность, а также смоделированная ПД активная мощность в каждой генераторной ветви жестко и однозначно связаны с аварийным состоянием этого же агрегата. Хотя при таком подходе не удается физически разграничить элементы электропередачи с внешними элементами, но динамические элементы, ответственные за синхронный режим, оказываются выделенными четко и однозначно, т.е. они по логике вещей рассматриваются как элементы электропередачи, ответственные за ее состояние, а все остальное, инвариантное к решаемой проблеме, можно считать как бы внешними элементами. Таким образом, потоковый параметр или критерий активной мощности становится подходящим параметром реагирования для разработки и построения АПНУ, но уже совсем в другой интерпретации селективности по сравнению с потоками через сечения.

Обсуждаемые мероприятия, будь они реализованы, обеспечили бы с точки зрения сохранения синхронного режима как бы разделение сложной структуры электропередачи на компоненты, непосредственно ответственные за состояние данного режима, и которые можно рассматривать как внутренние или принадлежащие электропередаче, и остальные или внешние элементы, которые хотя физически (по конструкции и даже по электрическим величинам характеризующего их режима) принадлежат электропередаче, но безразличные к ее состоянию. Таким образом, обеспечивается сохранение синхронного режима электропередачи путем форсирования отдаваемой электрической мощности синхронных машин, имеющих ресурс по токам статора и ротора или путем сбалансированного отключения синхронных машин вместе с относящейся к ним нагрузкой, исчерпавших названные ресурсы. Такое решение осуществлять контроль фактической и ПД активной мощности для

каждой синхронной машины позволяет разработать новый вариант АПНУ с достижением второго принципа селективности, который реализован не через блокирование действия РЗ при КЗ на внешних элементах, а путем выделения синхронных динамических элементов, ответственных за сохранение синхронного режима электропередачи.

Аналогичный анализ, проведенный для полевых систем контроля показывает, что в рамках этих систем пока невозможно предложить пути реализации второго свойства селективности, однако можно в определенной степени придать им свойства селективного реагирования на внешние повреждения или возмущения путем использования для этой цели потоковых систем контроля, которые применяются по своему назначению на автоматизируемых объектах совместно с полевыми системами контроля. Так, в случае устройств контроля повышения или понижения напряжения в узле можно использовать в качестве блокирующего фактора задержку действия полевого устройства на время работы потоковых РЗ присоединений, отходящих от узла контроля. В случае полевых систем контроля понижения или повышения частоты целесообразны дополнительные подсистемы, контролирующие величину и направление потоков активных мощностей в связях, позволяющих заранее выявить в динамике электрохимического переходного процесса резервные и дефицитные районы и обеспечить воздействия на резервы и нагрузку для компенсации дефицитов или излишков мощностей с упреждением соответственно до снижения или повышения статической частоты. Для реализации динамического балансирования в темпе текущих процессов в настоящее время в энергосистемах практически нет ничего за исключением быстродействующего торможения при сбросах мощности. Да и то его подключение самими быстродействующими современными коммутаторами (0,04...0,08 с) позволяет торможению включиться в работу лишь после названного замедления. Для указанной цели необходимы включенные через непрерывно управляемые выпрямительно-инверторные резервно-потребляющие подсистемы генерации и диссипации активной мощности или энергии фактически в составе или в непосредственной пространственной близости от указанных подсистем. В определенной мере быстродействующее балансирование можно осуществлять с помощью регулирования параметров современных гибко настроенных линий или электропередач.

В случае контроля продуктов деструкции, задымленности или запыленности в ответственных помещениях и отсеках для придания свойства селективности используют искусственные потоки специализированной циркуляции воздуха по контуру за панелями с приборами и оборудованием и в пространстве обитания между лицевыми частями панелей.

Свойство селективности потоковых систем контроля в чистом виде, как это понимается в РЗ, а, именно, второе свойство селективности, определяется потерями излишних действий при поврежде-

дениях и возмущениях на внешних элементах. Однако для всех средств контроля как потоковых, так и полевых свойственны также и другие потери, такие как ложные действия и отказы срабатывания. Ложные действия аналогичны излишним, но возникают не вследствие КЗ или других возмущений на внешних элементах, а из-за собственных помех, от которых недостаточно полно отстроены средства контроля. Отказы срабатывания обусловлены конечной чувствительностью к повреждениям или возмущениям, на которые должны реагировать устройства и системы контроля. Ложные действия непосредственно связаны и определяются первым свойством селективности, а отказы срабатывания опосредовано зависят как от первого, так и второго свойств селективности в том же направлении, т.е. при ухудшении свойств селективности объем отказов срабатывания также падает. Однако при надежном блокировании действий систем контроля при внешних повреждениях или возмущениях зависимость отказов срабатывания от второго свойства селективности может быть устранена.

Следует отметить, что попытка достижения второго свойства селективности у потоковой системы контроля АПНУ такого сложного объекта как электропередача через выделение компонентов, ответственных за состояние электропередачи, не позволяет сформировать понятие физических внешних элементов, а, следовательно, определить потери излишних действий. Потоковая система контроля, с выделением ответственных компонентов в контролируемом объекте, с точки зрения потерь аналогична полевой системе при используемом параметре реагирования в виде активной мощности, т.е. излишние действия в такой системе определить либо весьма сложно, либо невозможно. Однако с точки зрения учета или снижения потерь излишние и ложные действия по своему удельному весу практически равнозначны. Главное при этом то, что при данных потерях нет разрушения контролируемого объекта. Поэтому при анализе и расчетах их можно практически суммировать. Существенно больший удельный вес имеют отказы срабатывания, т.к. при этом происходит разрушение оборудования или синхронного режима. По этой причине экспертная оценка определяет удельный вес отказов срабатывания не менее, чем в $10^3 \dots 10^4$ раз выше по сравнению с излишними или ложными действиями.

Технический эффект и количественная оценка селективности

Из изложенного следует, что наиболее полноценное и качественное решение проблемы селективности при построении, настройке и эксплуатации систем РЗА может быть получено в рамках обобщенного показателя, выраженного либо в минимуме потерь, либо в максимуме технического эффекта [6].

Алгоритмы определения технического эффекта целесообразно рассматривать, как показывает анализ, в последовательности следующих этапов:

1. Определение областей действия и недействия каналов РЗА в координатах параметра реагирования.
2. Формирование выражений технического эффекта каналов РЗА.
3. Первоначальное задание уставок всех каналов РЗА.
4. Последующее (оптимизационное) изменение уставок интересующих каналов РЗА.
5. Определение для каждого канала РЗА методом селекции границ интервалов данных (СГИД) [1] условных вероятностных характеристик в виде законов распределения вероятностей (ЗРВ) для указанных областей действия и недействия с учетом заданных уставок и одновременным усреднением по пространству контролируемого объекта и другим факторам: режимам источников, состояниям электрической сети, видам повреждений и возмущений, параметрам окружающей среды.
6. Определение для каждого канала РЗА параметров потоков и установившихся (финитных) безусловных вероятностей состояний КЗ, асинхронных и неполнофазных режимов на защищаемом объекте, также возмущений: набросов или сбросов мощностей, обуславливающих условия отказов срабатывания и ложных действий.
7. Определение для каждого канала РЗА с учетом заданных уставок условных вероятностей отказов срабатывания в условиях повреждений или возмущений, ложных действий в условиях асинхронных и неполнофазных режимов на защищаемом объекте, также безусловных названных вероятностей для всех оптимизируемых каналов РЗА.
8. Определение для каждого канала РЗА параметров потоков и установившихся (финитных) безусловных вероятностей состояний внешних КЗ относительно защищаемого объекта, и вероятности состояния эксплуатационных режимов как противоположного события состояниям повреждений и возмущений на контролируемом объекте и его внешних элементах, если последние оказались включенными по параметру реагирования в область действия измерительного релейного органа (другими словами, как разности единицы и вероятностей всех остальных состояний, кроме состояния эксплуатационных режимов).
9. Определение для каждого канала РЗА с учетом принятых уставок условных вероятностей излишних действий релейной защиты (РЗ) при КЗ на внешних элементах, начиная с каждого из предыдущих или смежных элементов, в границах области действий измерительного органа каждого оптимизируемого канала РЗ и в направлении (направлениях) действия этих каналов, ложных действий в условиях эксплуатационных

режимов, асинхронных и неполнофазных режимов на внешних относительно защищаемого объектах, также безусловных вероятностей или параметров потоков названных событий).

10. Формирование значения технического эффекта для каждого канала РЗА и каждого параметра реагирования как разности потенциально-возможного эффекта (безусловной вероятности или параметра потока повреждений или возмущений контролируемого объекта) и потерь (безусловных вероятностей или параметров потоков событий отказов срабатываний, ложных и излишних действий).

Опыт применения данного алгоритма выявил противоречия при определении потерь излишних действий. С одной стороны, необходимы знания уставки измерительных органов внешних компонентов электрической сети, а, с другой стороны, уставки в соответствии с предлагаемым алгоритмом должны быть найдены путем оптимизации технического эффекта. Поэтому принята к применению итерационная процедура оптимизации, которая начинается с первоначального задания уставок. Она может быть выполнена произвольно, либо можно воспользоваться также некоторыми рекомендациями. Например, для первых ступеней РЗ уставки определять, исходя из условия предельно возможной фиксации КЗ на противоположных концах линии. Для дифференциальных защит сосредоточенных внешних элементов можно принять равными уставкам чувствительных каналов дифференциальных защит в координатах сквозных токов. Для защит с обменом информацией между комплектами на концах линий принимаются путем отстройки от уставок отключающих измерительных органов, активизирующих каналы информационного обмена. Для блокирующих измерительных органов отстраиваются от рабочих режимов. Уставки вторых ступеней РЗ предыдущих (смежных) линий можно принять, исходя из условия чувствительности при КЗ на противоположных концах защищаемой линии с гарантированным запасом по экспертно-руководящему методу (ЭРМ). Аналогично можно задать также первоначальные уставки резервирующих ступеней (чувствительных каналов этих защит), исходя из условия чувствительности при КЗ на удаленных концах резервируемых линий. Уставки противоаварийной автоматики могут быть приняты по методу ЭРМ путем отстройки от рабочих режимов.

При первоначально заданных уставках определяются технические эффекты для каждого канала РЗА энергосистемы и задаются новые их значения для одного, нескольких или всех каналов, для которых необходимо получить оптимальные уставки, соответствующие максимумам технических эффектов. После этого следует вторичное задание уставок, которое выполняется произвольно относительно первоначально заданных. При этом для каждого интересующего канала РЗА производится запоминание уставок как первоначально, так и вторично

заданных. Также запоминаются технические эффекты для каждого интересующего канала РЗА при первоначально заданных уставках. Полученные технические эффекты при вторично заданных уставках для каждого интересующего канала РЗА также запоминаются и сравниваются с аналогичными техническими эффектами при первоначально заданных уставках. На основании этого для каждого интересующего канала РЗА решается вопрос о направлении третьего изменения уставок, исходя из увеличения технического эффекта по каждому оптимизируемому каналу РЗА. Третье изменение уставок и полученные технические эффекты аналогично запоминаются и сравниваются, чтобы решить вопрос о четвертом изменении уставок. Далее описанная итерационная процедура приведенного алгоритма выполняется многократно. При малом или допустимом отличии уставок текущей итерации от предыдущей принимаются уставки текущей итерации как оптимальные. Технические эффекты интересующих оптимизируемых каналов при этом близки или равны максимумам.

При такой итерационной процедуре оптимизации уставок рассматриваемых РЗ не будет ограничена неправильным или неоптимальным выбором РЗ предыдущих (смежных) компонентов электрической сети. Однако рекомендуемые первоначальные уставки предыдущих компонентов участвуют только в определении излишних действий, а на отказы срабатывания, тем более ложные действия контролируемого объекта, они не влияют. Поэтому приближенное задание уставок, равных первоначальному, для неинтересующих каналов вполне возможно. Также нет запрета на уточнение принятых уставок путем использования расширенной или дополнительной итерационной процедуры оптимизации после проведения оптимизационного выбора уставок. Такой подход особенно целесообразен при выборе оптимальной уставки одного канала. В этом случае процедура оптимизации вырождается в безитерационный алгоритм определения максимума технического эффекта одного канала РЗА.

Для реализации алгоритмов оптимизации эффективности РЗ целесообразен был бы сквозной пакет специализированных программ. Однако разработка такого пакета требует больших ресурсов. Поэтому в рамках настоящей работы принято решение использовать как существующие математические прикладные пакеты, например, Mathcad, Matlab; так и различные энергетические специализированные вычислительные расчетные комплексы (ВРК), например ВРК для расчетов рабочих режимов «Космос», «Мустанг», «Дакар», «Анарес», «Растр» и др.; для расчетов параметров электрических величин при повреждениях, например ТКЗ-3000. Реализация представленного алгоритма осуществлялась для ступеней токовой защиты нулевой последовательности и дистанционной защиты линий с применением энергетических ВРК ТКЗ-3000, Дакар и прикладного пакета Mathcad.

В качестве защищаемых объектов выбраны линии 500 кВ Сургутская ГРЭС-2 – Ильково и Сургутская ГРЭС-2 – Трачуковская Тюменской энергосистемы. Первая линия достаточно длинная и проходит по удаленной от других линий трассе, вторая имеет среднюю длину и проходит по трассе, взаимодействуя с другими линиями 500 и 220 кВ, размещенными в коридоре трассы. В направлении действия защит, расположенных на Сургутской ГРЭС-2, от приемных подстанций Ильково и Трачуковская отходит по одной линии и по два автотрансформатора. В противоположном направлении для защит, расположенных на названных подстанциях, от противоположной Сургутской ГРЭС-2 отходит пять линий разной длины и трансформаторы энергоблоков. Ниже приводятся результаты расчетов для первой ступени дистанционных защит от междуфазных КЗ и КЗ на землю линии Сургутская ГРЭС-2 – Ильково со стороны Сургутской ГРЭС-2 в предположении реагирования на полное сопротивление. В качестве исходных данных использованы обычные схемно-конструкторские параметры и схемы замещения, определяемые требованиями применяемых ВРК.

Согласно предлагаемым алгоритмам, использована только весьма надежная статистика по повреждаемости линий и оборудования (автотрансформаторов). Параметры потоков междуфазных повреждений и КЗ на землю подразделены в отношении 0,3 и 0,7. В качестве условных законов распределения вероятностей (ЗРВ) приняты равномерная аппроксимация замеряемого сопротивления при КЗ вдоль линий и на разных выводах оборудования, а также нормальные ЗРВ замеряемых нагрузочных сопротивлений в эксплуатационных режимах. Причем нормальная аппроксимация определялась через максимально- и минимально-наблюдаемые значения, которым приписывался статус квантилей порядков соответственно 0,9987 и 0,0013. Излишние действия для первой ступени сформированы как половина случаев действия быстродействующих защит предыдущих силовых компонентов в областях, захватываемых измерительным органом интересующей первой ступени, а также все случаи отказов названных быстродействующих защит предыдущих элементов в тех же областях. Причем как те, так и другие указанные события имеют место в совмещении с КЗ в представленных областях.

Далее представлены результаты расчетов в соответствии с выражением технического эффекта

$$E = p(A) - p(O/A)p(A) - k_{0-л}[p(Л/АР)p(АР) + p(Л/Э)p(Э)] - k_{0-н} \sum_{n=1}^{n_n} \left[\frac{1}{2} p(D_n/BK_n) + p(O_n/BK_n) \right] p(BK_n) = p(A) - p(O) - k_{0-л}[p(Л^{ар}) + p(Л^3)] - k_{0-н}p(И),$$

где $p(A)$ – вероятность повреждения на защищаемой линии, $p(АР)$, $p(BK_n)$, $p(Э)$ – вероятности асинхронного режима на защищаемой линии, КЗ на n -м предыдущем элементе, эксплуатационных режимов защищаемой линии, определяемые (кроме $p(Э)$), как произведения параметров потоков соответствующих событий на среднюю продолжительность активного состояния защиты (время обнаружения и отключения КЗ); $p(O/A)$, $p(Л/АР)$, $p(Л/Э)$, $p(D_n/BK_n)$, $p(O_n/BK_n)$ – условные вероятности событий отказов срабатывания, ложных действий РЗ защищаемой линии, правильных действий D_n и отказов срабатывания O_n быстродействующей защиты предыдущего n -го элемента, определяемые при принятых уставках в интервалах параметра реагирования ранее найденных ЗРВ с помощью метода СГИД, простейший вариант которого состоит в вычислении параметров ЗРВ по квантилям экстремальных порядков; $n_n=3$ – число предыдущих компонентов, одна линия и два автотрансформатора; $k_{0-л}$, $k_{0-н}$ – экспертно определяемые коэффициенты приведения ложных и излишних действий к отказам срабатывания, в расчетах приняты одинаковыми и равными соответственно 0,001 и 0,0001 для дистанционных защит от многофазных и однофазных КЗ; $p(O)$, $p(Л^{ар})$, $p(Л^3)$, $p(И)$ – безусловные вероятности отказов срабатывания, ложных действий при асинхронном и в эксплуатационных режимах, излишних действий.

Результаты вычислений даны для первоначального задания уставок для случаев:

- многофазных КЗ

$$\begin{aligned} E &= 10^{-10} \left[48,9 - 7,335 - 0,001 \times \right. \\ &\quad \left. \times (0,000819 + 11226) - 0,001 \cdot 0,736 \right] = \\ &= 30,335 \cdot 10^{-10}, \\ p(A) &= \omega m(T^I) = \\ &= 0,3 \cdot 1,206 \cdot \frac{0,12}{8760 \cdot 3600} = \\ &= 48,9 \cdot 10^{-10}, \\ p(O) &= p(O/A)p(A) = \\ &= 0,15 \cdot 48,9 \cdot 10^{-10} = 7,335 \cdot 10^{-10}, \\ p(Л^{ар}) &= p(Л/АР)p(АР) = \\ &= 0,00023263 \cdot 3,52 \cdot 10^{-10} = 0,000819 \cdot 10^{-10}, \\ p(Л^3) &= p(Л/Э)p(Э) = \\ &= 11226 \cdot 10^{-10} \cdot 0,999999835 = 11226 \cdot 10^{-10}, \\ p(И) &= \left(\frac{1}{2} \cdot 0,0804 + 0,0804 \right) \cdot 5,82 \cdot 10^{-10} + \\ &\quad + 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 0,1 + 0,1 \right) \cdot 0,1142 \cdot 10^{-10} = \\ &= 0,736 \cdot 10^{-10}; \end{aligned}$$

- однофазных КЗ

$$\begin{aligned}
 E &= 10^{-10} \left[107 - 16,05 - 0,0001 \times \right. \\
 &\quad \left. \times (1,04 + 4920000) - 0,0001 \cdot 4,518 \right] = \\
 &= -401 \cdot 10^{-10}, \\
 p(A) &= \omega m(T^1) = \\
 &= 0,7 \cdot 2,814 \cdot \frac{0,12}{8760 \cdot 3600} = 107 \cdot 10^{-10}, \\
 p(O) &= p(O/A) p(A) = \\
 &= 0,15 \cdot 107 \cdot 10^{-10} = 16,05 \cdot 10^{-10}, \\
 p(L^{ap}) &= p(L/AP) p(AP) = \\
 &= 0,2958 \cdot 3,52 \cdot 10^{-10} = 1,04 \cdot 10^{-10}, \\
 p(L^3) &= p(L/\mathcal{E}) p(\mathcal{E}) = \\
 &= 4920000 \cdot 10^{-10} \cdot 0,9999999835 = \\
 &= 4920000 \cdot 10^{-10}, \\
 p(I) &= \left(\frac{1}{2} \cdot 0,2137 + 0,2137 \right) \cdot 13,58 \cdot 10^{-10} + \\
 &+ 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 0,143 + 0,143 \right) \cdot 0,3805 \cdot 10^{-10} = 4,518 \cdot 10^{-10}.
 \end{aligned}$$

Получение отрицательного эффекта при однофазных КЗ, как видно из представленных вычислений, обусловлены очень большим числом ложных действий, которое может быть снижено путем загрузки уставки. Оптимальные значения уставок в обоих случаях имеют место при снижении уставок относительно первоначальных, равных сопротивлению линии: для защиты от междуфазных КЗ эта величина получилась равной 0,975 от сопротивления прямой последовательности линии 125,6 Ом, а для защиты от КЗ на землю – 0,91 от сопротивления линии 186,1 Ом с учетом влияния от нулевой последовательности. Следует отметить незначительный

удельный вес излишних действий при принятых коэффициентах приведения их к отказам срабатывания. При этом имеет место явная зависимость от количества и номенклатуры предыдущих присоединений, что не учитывается в отчетной и справочной статистике. Незначительной является составляющая ложных действий при асинхронном режиме, причем блокирующее действие блокировки от качаний не учтено. В противном случае этой составляющей следует пренебречь. Влияние неполнофазного режима учтено только при определении вероятности эксплуатационных режимов, а при вычислении технического эффекта не учитывается в предположении вывода из работы дистанционных защит устройством избирательными органами однофазного автоматического повторного включения.

Заключение

Представленная классификация средств контроля силовых объектов электрических сетей энергосистем и приведенный анализ их селективности позволяет целенаправленно вести поиск для них критериев реагирования, структурные, функциональные и принципиальные схемы для их реализации – все, что в наибольшей степени связано с контролируемым аварийным состоянием объекта. Разработанная вероятностная теория технического эффекта позволяет достаточно полно учесть свойства контролируемого объекта и произвести объективный выбор средств контроля из используемой в практической деятельности и вновь разработанной аппаратуры, также обеспечить оптимальную настройку уставок названных средств контроля. Разработка программы, автоматизирующей алгоритмы оптимизации технического эффекта каналов РЗА, позволит организовать непрерывное получение в темпе процесса оптимальных уставок, а при использовании микропроцессорных средств также выставлять эти уставки на аппаратуре автоматически.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
2. Смирнов Э.П., Федосеев А.М. Об основных свойствах релейной защиты электроэнергетических систем от коротких замыканий // Труды МЭИ. – 1974. – Вып. 199. – С. 3–8.
3. Басс Э.И., Дорогунцев В.Г. Релейная защита электроэнергетических систем / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 296 с.
4. Shmoilov A.V. Probability technologies in electric power industry // Proc. 6-th Russian-Korean Int. Symp. on Science and Technology KORUS-2002. – Novosibirsk, 2002. – V. 2. – P. 421–424.
5. Шмойлов А.В., Стародубцева С.А., Князева Н.В., Богданова О.Н. Применение коэффициента взаимосвязи для анализа чувствительности и селективности устройств релейной защиты и автоматики // Электричество. – 2004. – № 3. – С. 9–22.
6. Shmoilov A.V. Probability Setup and Technical Efficiency of Relay Protection and Automatics // Proc. 12-th Russian-Korean Int. Symp. on Science and Technology KORUS-2005, Novosibirsk. – 2005. – P. 382–386.

Поступила 23.04.2008 г.