ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 20 КВ МЕГАПОЛИСА ПРИ ВНЕДРЕНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

АВТОР:

А.В. МАЙОРОВ,
К.Т.Н.,
ПАО «РОССЕТИ»

Распределительные электрические сети низкого и среднего напряжения составляют основную часть фондов энергосистемы России, поэтому надо с особым вниманием подходить к развитию надежной и эффективной системы защит и автоматики таких сетей.

Ключевые слова: распределительные электрические сети; дифференциальная защита; надежность; коэффициент неготовности; граф состояния системы; марковский процесс.

Огни ночного мегаполиса. Москва

Активное внедрение и развитие на территории мегаполиса новой электрической сети напряжением 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали требует согласованного построения и развития надежной и эффективной системы защит и автоматики.

Основными направлениями развития системы защит и автоматики сети 20 кВ мегаполиса являются [1]:

1. Повышение быстродействия отключения повреждений в сети.
2. Увеличение допустимого количества независимых селективных зон питающей части электрической сети.
3. Повышение наблюдаемости электрической сети.
4. Сохранение в работе максимального количества потребителей, запитанных от трансформаторных пунктов, не имеющих силовых выключателей и устройств защиты в распределительной сети.
5. Разработка технических решений, допускающих наличие режима многостороннего питания.
6. Повышение быстродействия возобновления электроснабжения при повреждениях в сети.

В настоящее время защита распределительных электрических сетей 20 кВ на территории мегаполиса реализована посредством последовательно установленных на присоединениях максимальных токовых защит, селективность действия которых обеспечивается ступенчатым выбором параметров срабатывания по току и времени [2].

Для обеспечения селективности действия ступенчатых защит в них вводятся выдержки на срабатывание. Разница по времени срабатывания между двумя соседними защитами называется ступенью селективности (Δt). На практике ступень селективности принимают в размере не менее 0,25–0,3 с. Максимальная временная уставка соответствует защите, установленной на отходящих от питающего центра фидерах, и выбирается исходя из допустимой продолжительности аварийных нагрузок на кабельную изоляцию. Обычно данный параметр составляет примерно 2,0 с, а параметр срабатывания защиты — не более 1,7 с.

Защиты минимального напряжения также организованы по ступенчатому принципу, с разделением по времени. При исчезновении напряжения на вводной линии объекта 20 кВ сначала сработают устройства автоматического повторного включения (АПВ) высоковольтных линий 110–220 кВ, при неуспешной работе этих АПВ сработает защита минимального напряжения шин 20 кВ питающего центра, и только потом, в случае отсутствия напряжения на вводной линии, — защита минимального напряжения объекта 20 кВ. Критерием выбора уставок здесь является условие, что схема конечного объекта не должна изменяться в процессе ожидания возникновения напряжения от всех предыдущих питающих линий. В разветвленных и длинных сетях с большим количеством промежуточных объектов и линий выдержки времени автоматического ввода резерва (защиты минимального напряжения) конечного объекта могут достигать до 16 с, что недопустимо для ответственных потребителей.

В соответствии с ГОСТ Р 53480-2009 [3], устройства защиты должны обеспечивать максимально возможную селективность, поэтому установка защит производится на все силовые выключатели энергообъекта. Данное обстоятельство серьезно сокращает потенциальное количество независимых селективных зон срабатывания системы защиты и автоматики распределительных сетей.

Одним из способов повышения быстродействия и надежности защиты элементов распределительной сети мегаполиса является дополнение существующей архитектуры системы защиты и автоматики защитами с абсолютной селективностью [2]. При этом на электрических присоединениях будут организованы дополнительные защиты, играющие роль основных, а функции резервных перейдут к ступенчатым, по аналогии с высоковольтными электрическими сетями.

При использовании микропроцессорной техники дополнительно к функции дифференциальной защиты линии (ДЗЛ) в устройстве может быть реализована трехступенчатая максимальная токовая защита, защита от несимметричного режима (обрыв фаз), программная блокировка при насыщении трансформаторов тока (ТТ). Защита пофазно вычисляет дифференциальные токи, позволяет использовать характеристику с торможением и отстраиваться от короткого замыкания (КЗ) на ответвлениях, работать с различными коэффициентами ТТ за счет цифрового выравнивания коэффициентов трансформации, имеет низкое потребление по цепям тока, контроль исправности токовых цепей и контроль превышения дифференциального тока в нормальном режиме.

Для организации дифференциальных защит кабельных линий электропередачи необходимо наличие волоконно-оптических каналов связи. В настоящее время внутренними нормативными документами сетевых организаций г. Москвы регламентирована необходимость прокладки ВОЛС при строительстве новых объектов питающей сети, при этом к настоящему времени в значительной степени уже реализована цифровая транспортная сеть на основе ВОЛС.

Преимуществами внедрения дифференциальных защит в электрической сети 20 кВ мегаполиса являются:

- сокращение времени устранения повреждения в сети (дифференциальная защита является защитой с абсолютной селективностью и по принципу действия срабатывает без выдержки по времени);
- увеличение надежности системы защиты и автоматики электрической сети (переход на два комплекта защит каждого присоединения значительно увеличивает надежность технического решения);
- возможность организации в сети режима многостороннего питания.

Следует отметить, что проблема количественного определения надежности системы защиты является достаточно сложной задачей, в настоящее время не существует точной методики расчета данных показателей. В рамках решения данной задачи выбран способ построения графов состояния системы и определения расчетных показателей, характеризующих время нахождения системы в неработоспособном состоянии (коэффициент неготовности).

В соответствии с ГОСТ Р 53480-2009 [3], под надежностью системы защиты принято понимать способность изделия выполнять требуемые функции в заданных условиях, а также способность к поддержанию или восстановлению состояния, в котором оно может выполнить требуемую функцию (ремонтопригодность).

Исходя из технических особенностей, выполняемых устройствами защиты и автоматики функций, для них характерны следующие виды неправильной работы: отказ срабатывания, ложное срабатывание и излишнее срабатывание [3].

Отказ срабатывания — это отсутствие срабатывания в соответствии с заложенной логикой действия при наличии требования срабатывания для конкретной функции, устройства релейной защиты и автоматики (РЗА), а также отсутствие в тех же условиях заданного выходного сигнала от конкретной функции, устройства РЗА.

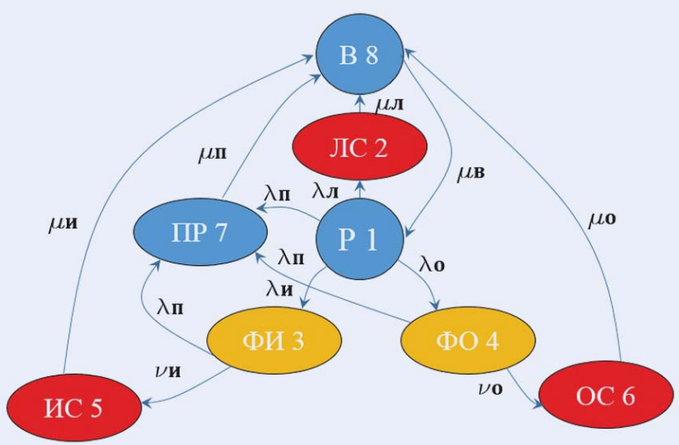
Ложное срабатывание — это срабатывание устройства РЗА или реализованных в его составе функций РЗА, исходя из заложенной логики действия при отсутствии требования срабатывания для конкретного устройств РЗА, а также передача в этих же условиях сигнала на другое устройство РЗА.

Излишнее срабатывание — это срабатывание устройства РЗА или реализованных в его составе функций РЗА в соответствии с заложенной логикой действия при отсутствии требования срабатывания для данного устройства РЗА или реализованной в его составе функции РЗА, но при наличии требования срабатывания для других устройств РЗА или других функций РЗА.

Для оценки работы РЗА используют комплексный показатель надежности [4], представляющий собой вероятность того, что оборудование будет неработоспособно в произвольный момент времени — коэффициент неготовности.

Применение различных технических решений (архитектур) для защиты электрических присоединений оказывает влияние на надежность системы защиты и соответствующие коэффициенты неготовности.

ГРАФ ВОЗМОЖНЫХ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ДЗЛ



Обозначения: Р 1 — работоспособное состояние системы РЗА; ЛС 2 — ложное срабатывание защиты; ФИ 3 — функционирование системы с дефектом, приводящим к излишнему срабатыванию; ФО 4 — функционирование системы с дефектом, приводящим к отказу срабатывания; ИС 5 — излишнее срабатывание; ОС 6 — отказ срабатывания; ПР 7 — плановые проверки в процессе технического обслуживания; В 8 — восстановление работоспособности системы РЗА

Рис. 1

ИЗДАЕТСЯ С 1954 Г.

РУМ

РУКОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Научно-технический журнал

Приглашаем экспертов в области электроэнергетики стать постоянными авторами журнала «Руководящие материалы по проектированию и эксплуатации электрических сетей»

«РУМ — ЕДИНЫЙ ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ОБ АКТУАЛЬНЫХ ТЕНДЕНЦИЯХ В ОБЛАСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РОССИЙСКОГО ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА».

Д.А. Воденников, Заместитель Председателя Правления — Главный инженер ПАО «ФСК ЕЭС»

ЧИТАЙТЕ РУМ

Сайт: http://cis-ees.ru/RUM
Страница в ФБ: https://www.facebook.com/RUMNTC/
Телеграмм-канал: https://t.me/ntcfsk

реклама

Рассмотрим сравнительную оценку коэффициентов неготовности используемой в настоящее время архитектуры, представляющей собой совокупность ступенчатых защит на каждом присоединении, и предлагаемую архитектуру, состоящую из двух комплектов защит — ступенчатой и дифференциальной, организованных на различных принципах и обеспечивающих резервирование по логической схеме «или» на отключение силового выключателя.

В процессе эксплуатации имеют место следующие события: отказы элементов и восстановление их работоспособности в моменты проведения работ по техническому обслуживанию или ремонту.

Отказы являются случайными событиями, время и вероятность возникновения которых распределены по экспоненциальному закону. Работы по техническому обслуживанию являются регулярными, и моменты возникновения данных событий определены заранее. Таким образом, вероятности перехода между событиями описываются различным образом, при этом они полностью независимы друг от друга. Исходя из этого, процесс функционирования системы защит можно считать марковским процессом [5, 6, 7]. Провести анализ таких процессов можно при помощи построения графа состояния и перехода системы, на котором должны быть отражены все возможные события для системы защит (появление внутреннего дефекта, варианты неправильной работы, проверки технического состояния, работы по восстановлению работоспособности).

Проведем сравнительный анализ двух архитектур на примере одного присоединения отходящей кабельной линии электропередачи (КЛ). В настоящее время для защиты отходящей КЛ 20 кВ используется один комплект токовой защиты, который резервирует комплект защиты вводного выключателя. При этом в случае отказа защиты отходящей КЛ обесточенными становятся все потребители, запитанные от соответствующей секции шин.

В соответствии с предлагаемой архитектурой на отходящей КЛ предполагается установка дифференциальной защиты, при этом защита КЛ будет осуществляться двумя независимыми элементами (защитами).

На рис. 1 изображен граф возможных состояний системы защит с одним комплектом защиты на присоединение. В данном графе вершинами приняты работоспособное состояние системы защит и события (случайные и периодические), которые имеют место при эксплуатации системы. Переходы между событиями характеризуются значениями интенсивности данных потоков.

Значения интенсивностей рассматриваемых потоков, определенные на основе накопленного опыта эксплуатации, приведены в табл. 1.

Расчет потока ложных срабатываний $W_{лс}(t)$, отказа в срабатывании $W_{ос}(t)$ и излишних срабатываний $W_{ис}(t)$ произведен на основании опыта эксплуатации оборудования РЗА в электрической сети Москвы в соответствии с СТО 34.01-4.1-008-2018 [8]:

$$W_{лс}(t) = \frac{N_{t2} - N_{t1}}{t2 - t1},$$

где N_{t2} — количество ложных срабатываний к моменту $t2$;

N_{t1} — количество ложных срабатываний к моменту $t1$;

$t1$ и $t2$ — интервалы наблюдения;

$$W_{ос}(t) = \frac{N_{t2} - N_{t1}}{t2 - t1},$$

где N_{t2} — количество случаев отказа в срабатывании к моменту $t2$;

N_{t1} — количество случаев отказа в срабатывании к моменту $t1$;

$t1$ и $t2$ — интервалы наблюдения;

$$W_{ис}(t) = \frac{N_{t2} - N_{t1}}{t2 - t1},$$

где N_{t2} — количество случаев излишних срабатываний к моменту $t2$;

N_{t1} — количество случаев излишних срабатываний к моменту $t1$;

$t1$ и $t2$ — интервалы наблюдения.

Интенсивность внутренних и внешних КЗ взяты исходя из накопленного опыта эксплуатации и анализа повреждаемости кабельных линий 20 кВ Москвы.

ЗНАЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СОБЫТИЙ

№	Наименование	Обозначение	Значение, 1/год
1	Интенсивность ложных срабатываний	λл	0,006
2	Интенсивность излишних срабатываний	λи	0,104
3	Интенсивность отказов срабатываний	λо	0,012
4	Интенсивность периодических проверок	λп	0,25
5	Интенсивность внутренних КЗ	νи	4
6	Интенсивность внешних КЗ	νо	4
7	Интенсивность восстановления	μп, μи, μо, μл	∞

Таблица 1

Следует отметить, что время нахождения системы в состояниях 2, 7, 5, 6, 8 (см. рис. 1) многократно меньше, чем в состояниях 1, 3, 4. Поэтому при расчете временем нахождения в этих состояниях можно пренебречь. Теоретически это означает, что интенсивность выхода из этих состояний бесконечно большая или μп = μи = μо = μл = ∞. Также при рассмотрении надежности системы целесообразно не учитывать нахождение системы в состоянии с дефектом, при котором возможно излишнее срабатывание по причине значительно менее опасных с точки зрения потенциального ущерба последствий. При этом принято, что интенсивность восстановления системы μв = 1.

Для определения коэффициента неготовности системы РЗА целесообразно использовать подход, описанный в статье А.С. Трофимова, Г.С. Нудельмана [6], в соответствии с которым путем решения графа состояния матричным методом определяется время нахождения системы в неработоспособных состояниях. Путем определения отношения данного времени к общему времени цикла технического обслуживания (4 года) определяется искомый показатель.

Методика расчета сводится к определению комплексного показателя надежности, представляющего собой вероятность того, что оборудование будет неработоспособно в произвольный момент времени. Строятся графы состояния систем защиты с указанием вариантов состояния: зеленый — исправное, желтый — работоспособное и красный — случаи неправильной работы или повреждения (неработоспособное состояние).

Таким образом, производится анализ состояния системы путем определения отношения времени нахождения в неработоспособных состояниях ($t_{нераб}$) ко всему времени нахождения в цикле (цикл — это переход состояния системы от начального исправного состояния до неработоспособного). Дополнительно учитывается время восстановления системы — время устранения повреждения t_v.

Значения $t_{нераб}$, t_u, t_v определяются из графов состояний систем защиты:

1. Строится матрица вероятностей перехода между состояниями системы.
2. Путем матричных операций определяется матрица частоты нахождения в состояниях системы или математического ожидания попадания в данное состояние.
3. Определяется матрица времени нахождения системы во всех состояниях.

В итоге определяется коэффициент неготовности как отношение среднего времени нахождения в неработоспособном состоянии ко всему времени цикла:

$$К_н = \frac{t_{нераб}}{t_{uv}},$$

где $t_{нераб}$ — время нахождения в неработоспособном состоянии;

t_{uv} — время цикла.

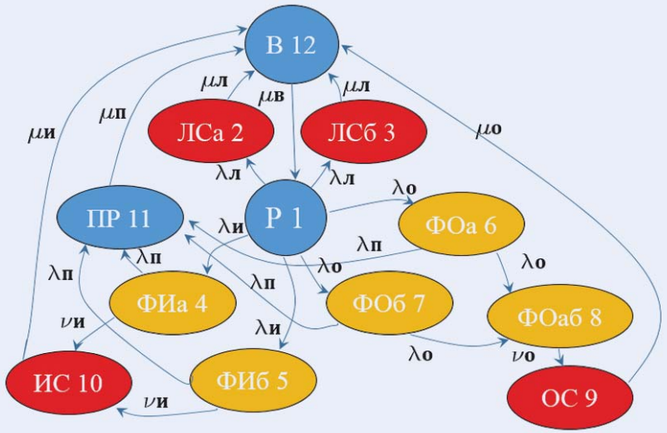
Проведение расчетов выполнялось с использованием пакета программ Mathcad.

На основании проведенных расчетов коэффициент неготовности для архитектуры без применения ДЗЛ составит:

$$К_{н1} = \frac{t_{нераб}}{t_{uv}} = 0{,}048.$$

Для данной системы время нахождения в состояниях 2, 3, 9, 10, 11, 12

ГРАФ ВОЗМОЖНЫХ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЗЛ



Обозначения: Р 1 — работоспособное состояние системы РЗА; ЛСа 2 — ложное срабатывание комплекта защиты А; ЛСб 3 — ложное срабатывание комплекта защиты Б; ФИа 4 — функционирование системы с дефектом, приводящим к излишнему срабатыванию комплекта А; ФИб 5 — функционирование системы с дефектом, приводящим к излишнему срабатыванию комплекта Б; ФОа 6 — функционирование системы с дефектом, приводящим к отказу срабатывания комплекта А; ФОб 7 — функционирование системы с дефектом, приводящим к отказу срабатывания комплекта Б; ФОаб 8 — функционирование системы с дефектом, приводящим к отказу срабатывания комплектов А и Б; ИС 10 — излишнее срабатывание; ОС 9 — отказ срабатывания; ПР 11 – плановые проверки в процессе технического обслуживания; В 12 — восстановление работоспособности системы РЗА

Рис. 2

(рис. 2) многократно меньше, чем в 1, 4, 5, 6, 7, 8. Временем нахождения в них, как и другими допущениями, по аналогии с первым случаем пренебрегаем, μп = μи = μо = μл = ∞. Интенсивность восстановления системы μв = 1.

Граф возможных состояний для архитектуры системы защиты с двумя комплектами защит на присоединение изображен на рис. 2. Проделав аналогичные действия, получаем, что коэффициент неготовности для архитектуры с применением ДЗЛ равен:

$$K_{н2} = \frac{t_{нерабI}}{t_{uv}} = 0{,}02.$$

Таким образом, при внедрении в электрической сети мегаполиса 20 кВ дифференциальных защит и организации резервирования каждого участка сети коэффициент неготовности системы защиты и автоматики сокращается в 2,4 раза (с 0,048 до 0,02), что свидетельствует о повышении надежности системы защиты и автоматики.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ надежности двух архитектур систем защиты и автоматики, проведенный на основе построения графов состояния и определения коэффициента неготовности каждой системы, показывает, что надежность системы с двумя комплектами на присоединение увеличивается в 2,4 раза по сравнению с используемой в настоящее время архитектурой с одним комплектом.

Одним из направлений развития системы защиты и автоматики электрической сети 20 кВ мегаполиса является дополнение существующей архитектуры построения защит дифференциальными защитами, что позволяет:

- повысить быстродействие при определении и отключении поврежденного участка;
- увеличить потенциальное количество независимых селективных зон срабатывания;
- повысить надежность системы защиты и автоматики распределительной электрической сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майоров А.В. Особенности построения и направления развития системы защиты и автоматики электрической сети 20 кВ мегаполиса // Электрические станции. 2018. № 8. С. 25–30.
2. Майоров А.В. Применение защит с абсолютной селективностью и развитие автоматики в электрических сетях напряжением 20 кВ мегаполиса // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 6 (51). С. 32–37.
3. ГОСТ Р 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010.
4. Шалин А.И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002.
5. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. Киев: Наукова думка, 1976.
6. Трофимов А.С., Нудельман Г.С. Модель надежности резервированных устройств релейной защиты энергосистем // Релейщик. 2017. № 1. С. 22–27.
7. Дынкин Е.Б. Марковские процессы. М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1963.
8. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики. Методические указания по расчету надежности. Стандарт организации ПАО «Россети». СТО 34.01-4.1-008-2018.