

УДК 621.311.1

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Пискунов С.А.^{1,2}, Мокеев А.В.^{1,2}

Аннотация

В докладе представлен анализ эффективности устройств релейной защиты (РЗ) распределительных сетей среднего напряжения и рассмотрены направления по совершенствованию их основных характеристик на основе применения технологии синхронизированных векторных измерений. Предложены алгоритмы устройств РЗ на основе двух- и многосторонних измерений синхровекторов напряжения и тока, приведены преимущества сочетания работы локальных устройств РЗ с защитами на централизованном принципе и распределенными защитами.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения, синхровектор, релейная защита, многосторонние измерения.

Введение

Надежность работы электрических сетей среднего напряжения (СН) во многом зависит от применяемых типов релейной защиты. Электрические сети 6-10 кВ, прежде всего, городские и сельские, в большинстве случаев обеспечиваются устройствами защиты на токовых принципах [1]. В то же время, из-за значительной протяженности и разветвленности сетей СН, токовые защиты во многих случаях не обеспечивают требуемую чувствительность. В этой связи возникает вопрос о необходимости совершенствования устройств релейной защиты электрических сетей СН.

Одним из путей улучшения основных характеристик устройств релейной защиты электрических сетей СН по чувствительности, селективности и быстродействию является применение технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) [2-3]. При этом применение СВИ обеспечивает преимущества как для совершенствования простых типов защит на токовом принципе за счет реализации принципов двух- и многосторонних измерений, так и более сложных, например, дистанционной защиты [4]. Использование СВИ позволит более широко применять дифференциальные защиты в сетях СН [5].

Электрические сети 6-35 кВ, работающие с изолированной нейтралью либо с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, также требуют реализации селективной защиты от однофазных замыканий на

¹ ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия,

² Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, e-mail: s.piskunov@ens.ru, a.mokeev@ens.ru

землю (ОЗЗ). Токовые защиты от ОЗЗ, широко распространенные в сетях СН, имеют ряд недостатков, связанных со сложностью обеспечения корректной работы защиты при малых токах нулевой последовательности (НП) и при компенсации тока ОЗЗ [6]. Авторами предложено несколько подходов к реализации защиты от ОЗЗ на основе измерения синхровекторов тока и напряжения НП для локальных устройств РЗ, централизованных и распределенных защит, а также для их сочетания [7-8].

Защиты сетей среднего напряжения

Выполнение защит сетей СН требует учета ряда особенностей, в первую очередь, из-за низкого уровня автоматизации городских и сельских сетей 6-10 кВ. Указанные кабельные и воздушные сети традиционно выполняются радиальными с односторонним питанием, и для защиты от коротких замыканий (КЗ) чаще всего применяют токовые ступенчатые защиты [1]. Для повышения надежности сетей применяют автоматический ввод резервного питания от другой секции подстанции (АВР), автоматическое повторное включение (АПВ) поврежденной воздушной линии. Таким образом, неселективная работа защит линий 6-10 кВ допускается в сочетании с АВР и АПВ [1]. Защита от ОЗЗ выполняется, как правило, на контроле параметров токов и напряжений нулевой последовательности.

Сети 20-35 кВ имеют тот же тип заземления нейтрали, что и сети 6-10 кВ, но помимо радиального исполнения с односторонним питанием также зачастую выполняются кольцевыми. Токовые ступенчатые направленные защиты в таких сетях не всегда обеспечивают требуемую чувствительность [1]. Поэтому в ряде случаев используются дистанционные защиты с исполнительным органом полного сопротивления.

Эффективность токовых защит во многом зависит от режимов работы энергосистемы, которые могут значительно отличаться. Как пример рассмотрим данные для городских и промышленных распределительных сетей нескольких субъектов РФ с учетом работы их энергосистем в минимальном и максимальном режиме (табл.1). В качестве объектов сети рассматриваются трансформаторные подстанции 6-10 кВ, распределительные пункты 10-35 кВ и понижающие подстанции 35-110 кВ. В табл.1 параметр k – это отношение трехфазного тока КЗ в максимальном режиме к двухфазному току КЗ в минимальном режиме. Анализ данных показывает, что токи КЗ могут значительно отличаться в зависимости от расположения места КЗ (вблизи от источника питания или в удаленной точке), топологии сети (городская или промышленная), номинального напряжения. В некоторых случаях коэффициент k в несколько раз отличается в различных точках сети, поэтому условия для работы токовых защит неодинаковы. Следует также отметить то, что коэффициент k постепенно увеличивается с ростом номинального напряжения.

Таблица 1. Максимальные и минимальные токи КЗ

Место КЗ в сети	Параметр	Номинальное напряжение сети, кВ						
		городская сеть			промышленная сеть			
		6	10	110	6	10	35	110
начало	$I_{к.маx}^{(3)}$, кА	16,9	13,1	32,1	16,5	2,73	9,61	16,5
конец	$I_{к.маx}^{(3)}$, кА	1,97	0,98	1,2	10,5	1,06	4,95	-
начало	$I_{к.мин}^{(2)}$, кА	13,9	8,06	5,19	9,35	0,98	3,7	4,63
конец	$I_{к.мин}^{(2)}$, кА	1,7	0,82	0,24	6,06	0,63	2,13	-
-	$k_{маx}$	1,22	1,63	6,18	1,76	2,79	2,60	3,56
-	$k_{мин}$	1,16	1,20	5,00	1,73	1,68	2,32	-

На основе выражений для расчета тока срабатывания токовой отсечки (ТО) и оценки ее чувствительности [1] можно показать, что в общем случае для эффективной работы ТО требуется выполнение условия:

$$\frac{|\underline{Z}_{сmax} + \underline{Z}_л|}{|\underline{Z}_{сmin} + 0,2\underline{Z}_л|} \geq k_1, k_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} k_{отс}, \quad (1)$$

где $\underline{Z}_{сmin}$, $\underline{Z}_{сmax}$ - сопротивление эквивалентной энергосистемы в минимальном и максимальном режиме, $\underline{Z}_л$ - сопротивление линии, $k_{отс}$ - коэффициент отстройки ТО.

Если обозначить λ относительную зону действия ТО (от 0 до 1), то на основе выражения (1) можно получить уравнение, описывающее зависимость λ от коэффициента k , тока $I_{к.маx}^{(3)}$ и длины линии L :

$$\lambda^2 + \lambda \frac{2kX_{сmax}X_{уд}}{LZ_{уд}^2} + \frac{(k_1^2 k^2 - 1)X_{сmax}^2 - 2LX_{уд}X_{сmax} - L^2Z_{уд}^2}{k_1^2 L^2 Z_{уд}^2} = 0, \quad (2)$$

где $X_{уд}$, $Z_{уд}$ - удельные параметры линии.

Положительные действительные корни уравнения (2) характеризуют зону действия ТО в зависимости от различных условий. На рис.1-2 приведены соответствующие значения λ для кабельных и воздушных линий 10 кВ при различных сочетаниях k , $I_{к.маx}^{(3)}$ и L . Анализ данных (рис.1-2) показывает, что для сетей 10 кВ существует значительная зависимость λ от сечения линии, при малых токах КЗ λ варьируется в широких пределах и для большого ряда соотношений k , $I_{к.маx}^{(3)}$ и L условие $\lambda > 0,2$ не выполняется. Аналогичные выводы можно сделать на основе анализа уравнения (2) для сетей СН других номинальных напряжений. Наименьшая эффективность ТО наблюдается для воздушных линий 35-110 кВ, так как здесь сопротивление линии слабо зависит от выбранного сечения, а коэффициент k варьируется в наиболее широких пределах.

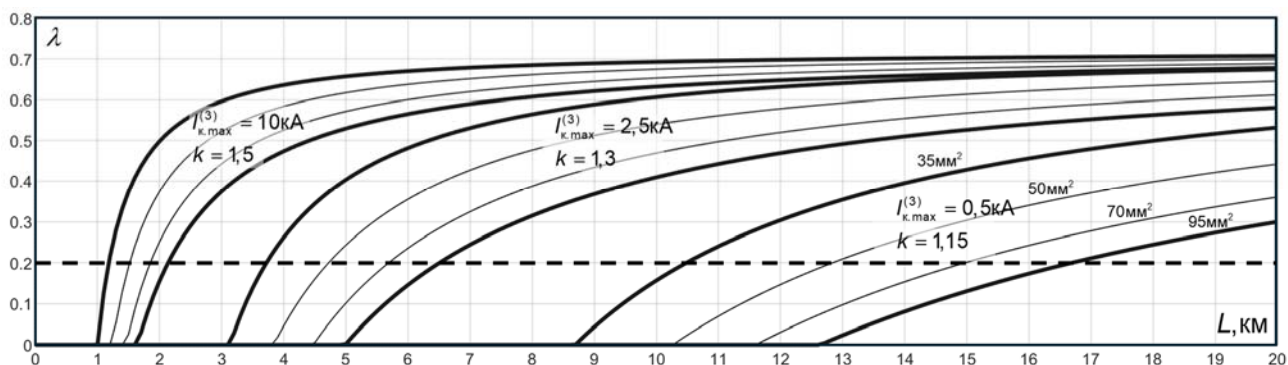


Рис. 1 – Относительная зона действия ТО для воздушных линий 10 кВ.

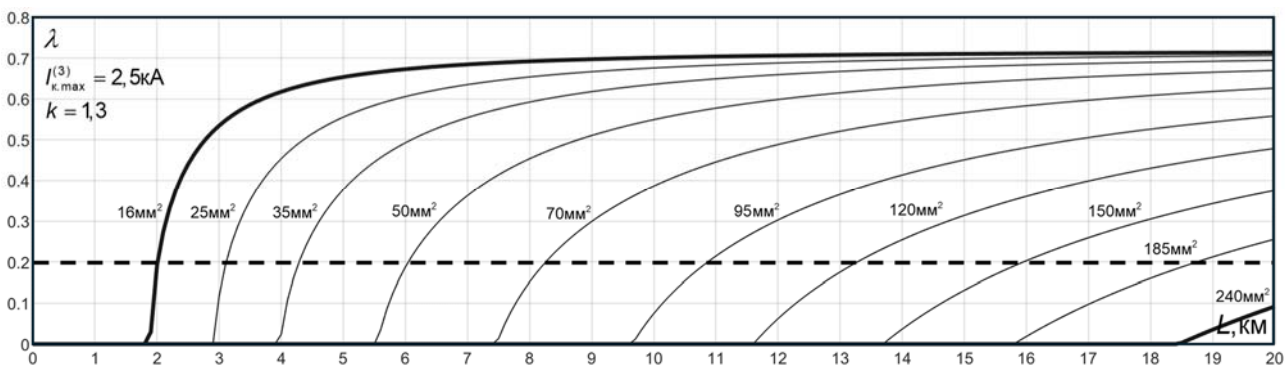


Рис. 2 – Относительная зона действия ТО для кабельных линий 10 кВ.

Выражения, подобные (1) и (2), могут быть получены для ТО с выдержкой времени и максимальной токовой защиты (МТЗ). В общем случае можно сделать вывод о том, что эффективность токовых ступенчатых защит достаточно сложно обеспечить в сетях СН с разветвленной и неоднородной структурой, например, когда смежной для защищаемой длинной линии оказывается короткая линия, или для линий с несколькими отпайками. Увеличение числа ступеней может частично улучшить чувствительность токовых защит [1], но не решает проблему полностью.

В современных условиях при анализе защит сетей СН необходимо также рассматривать развитие и значительное увеличение сетей с распределенной генерацией (РГ) и возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) [9]. В таких сетях обеспечить эффективность токовых ступенчатых защит практически невозможно, так же как в кольцевых сетях 20-35 кВ. В связи с этим требуются новые подходы к построению защит сетей СН.

Совершенствование защит от междуфазных КЗ

Применение технологии СВИ позволяет рассматривать новые подходы к построению и совершенствованию защит сетей СН [2-3]. На основе синхровекторов тока и напряжения могут быть рассчитаны как параметры режима работы сети, так и произведена оценка параметров элементов самой сети. При этом появляется возможность использовать наборы перечисленных выше параметров для более быстрого и точного распознавания повреждений.

Можно выделить два основных направления совершенствования РЗ: первое, касающееся реализации классических принципов защит на основе СВИ (токовые ступенчатые защиты, дифференциальные защиты и т.д.), и второе, основанное на развитии теории СВИ, прежде всего, на анализе дифференциальных уравнений защищаемого объекта (линии, трансформатора) в синхровекторах напряжения и тока и в условиях электромеханических и электромагнитных переходных процессов. Это направление особенно перспективно для совершенствования дистанционных защит [4].

Для токовых защит сетей СН наиболее очевидным преимуществом СВИ является применение принципа многосторонних измерений, когда для эффективной работы защиты используются дополнительные признаки распознавания места и вида повреждения. Во многих случаях значительный эффект может обеспечить простой принцип логической селективности, когда за счет данных измерений других присоединений распределительного устройства или данных СВИ со смежного объекта сети обеспечивается эффективная работа токовой защиты. При этом для ТО с выдержкой времени и МТЗ такой принцип может быть наиболее эффективным и доступным, так как в этом случае не требуется высокое быстродействие, что позволяет использовать различные каналы связи для передачи данных между устройствами измерений.

Наличие двух- и многосторонних измерений позволяет рассматривать дифференциальные принципы защиты сетей СН. На основе измерений синхровекторов тока распределительного устройства или синхровекторов тока линии/трансформатора может быть реализована эффективная дифференциальная защита с абсолютной селективностью [5].

Важное значение для развития защит сетей СН является совершенствование дистанционной защиты, как на основе односторонних измерений (в случае локальной работы устройства защиты), так и двухсторонних измерений синхровекторов тока и напряжения.

На основе анализа дифференциального уравнения линии в синхровекторах переходных процессов авторами были предложены алгоритмы для совершенствования дистанционной защиты линии [4]. Рассматриваемые принципы односторонних и двухсторонних измерений могут быть так же эффективны и для защиты силового трансформатора (табл.2).

Ключевой особенностью разработанных алгоритмов дистанционной защиты (табл.2) является обеспечение точной и стабильной оценки полного сопротивления защищаемого объекта при наличии нелинейного сопротивления дуги в месте КЗ, а также при сочетании электромагнитных и электромеханических переходных процессов (рис.3).

Таблица 2 Выражения для дистанционной защиты на основе СВИ

№ п/п	Наименование	Выражение
1	Общее выражение для одностороннего замера	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + \underline{k}\dot{I}'(t)}, \dot{I}'(t) = \frac{d\dot{I}(t)}{dt}, \underline{k} = \frac{L_{yd}}{Z_{yd}}$
2	Компенсация сопротивления дуги	$\hat{R}_d(t) = \text{Re}(\hat{z}(t)) - \text{Im}(\hat{z}(t)) \frac{R_{yd}}{L_{yd}}, \hat{z}_k(t) = \hat{z}(t) - \hat{R}_d(t)$
3	Общее выражение для двухстороннего замера	$\hat{z}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) + \underline{z}\dot{I}_2(t) + L\dot{I}_2'(t)}{\dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t) + \underline{k}[\dot{I}_1'(t) + \dot{I}_2'(t)]}$
4	Оценка расстояния до точки КЗ	$\hat{I}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) + \underline{z}\dot{I}_2(t) + L\dot{I}_2'(t)}{Z_{yd}[\dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t)] + L_{yd}[\dot{I}_1'(t) + \dot{I}_2'(t)]}$
5	Выражение для оценки сопротивления в нормальном режиме и при внешнем КЗ	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \underline{k}\dot{I}_1'(t)}$

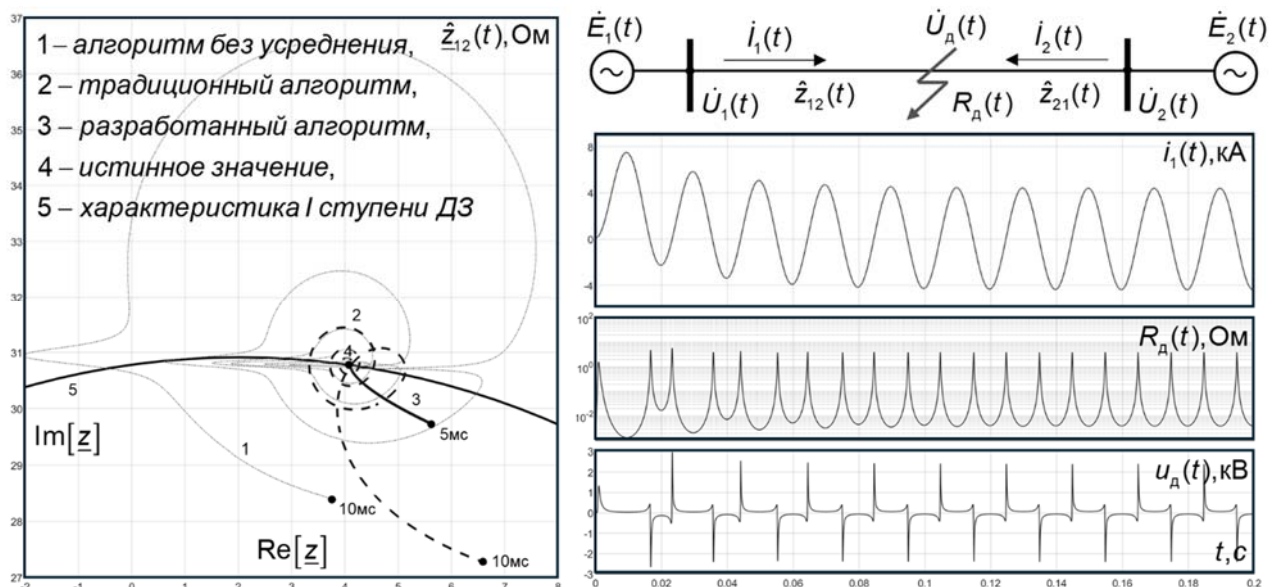


Рис. 3 – Дистанционная защита линии на основе СВИ.

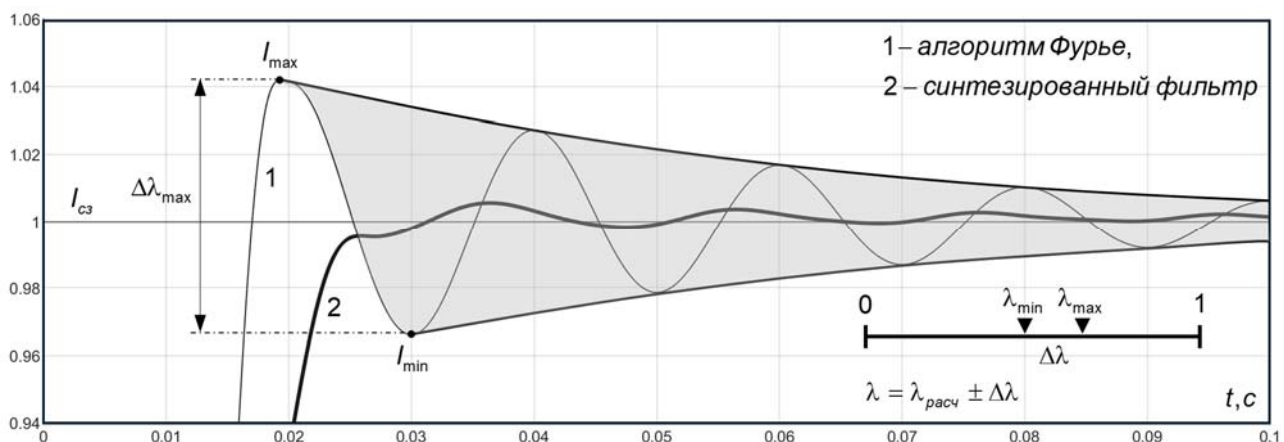


Рис. 4 – Влияние методов обработки сигнала на токовую защиту.

Важной задачей при совершенствовании защит от КЗ является разработка эффективных алгоритмов обработки сигналов. Так, например, мгновенные значения тока КЗ, содержащие искажения из-за наличия нелинейного сопротивления дуги, могут быть некорректно обработаны с помощью «быстрых» алгоритмов устройств РЗ, которые основаны на обработке двух или нескольких отсчетов. Для таких сигналов предпочтительным является применение алгоритмов на основе усредняющих фильтров, например, алгоритма Фурье. Наиболее эффективным является применение специально разработанных цифровых фильтров. Это позволяет учитывать сопротивление дуги как постоянную величину при выборе характеристик срабатывания защиты [10]. В то же время, при некоторых постоянных времени энергосистемы алгоритм Фурье в первые 30-40 мс от начала КЗ может обуславливать значительные колебания оцениваемой огибающей сигнала, что значительно влияет на зону действия токовой защиты (рис.4). Поэтому синтез цифровых фильтров для микропроцессорных устройств релейной защиты в сочетании с применением технологии СВИ [11] позволяет улучшить характеристики как простых токовых защит сетей СН, так и более сложных, таких как дифференциальная и дистанционная защита.

Совершенствование защиты от ОЗЗ

В области совершенствования защит от однофазных замыканий на землю ведутся разработки по различным научным направлениям [12-13]. Одним из наиболее перспективных путей для совершенствования защиты от ОЗЗ, как в отношении принципов построения защиты, так и разработки алгоритмов работы защиты, является измерение синхровекторов тока и напряжения НП [7-8].

Во-первых, следует отметить, что на основе СВИ могут быть реализованы различные принципы защиты от ОЗЗ: локальный, когда требуется реализовать алгоритмы защиты на основе измерений синхровекторов одного присоединения; централизованный, когда существует возможность для сравнения и обработки данных измерений нескольких присоединений на подстанции; распределенный, когда работа устройств защиты на различных объектах сети осуществляется независимо, но в случае необходимости осуществляется обмен данными измерений между ними. Все три указанные направления для совершенствования принципов работы защиты от ОЗЗ на основе СВИ являются перспективными, поскольку сети СН работают в различных условиях и имеют разную степень автоматизации.

Во-вторых, для локального, централизованного и распределенного принципа защиты от ОЗЗ могут быть использованы различные алгоритмы, предполагающие оценку тех или иных параметров на основе использования синхровекторов тока и напряжения НП [7-8].

Наиболее простым способом реализации защиты от ОЗЗ на основе

СВИ является измерение синхровекторов тока НП промышленной частоты. Сравнение синхровекторов тока НП по различным участкам сети обеспечивает работу централизованной защиты от ОЗЗ. Указанный способ защиты был реализован на нескольких объектах отечественных электрических сетей 10 кВ и показал свою эффективность [3]. Тем не менее, недостатком измерений синхровекторов НП промышленной частоты является менее эффективная работа защиты в сетях с компенсацией тока ОЗЗ и его малой активной составляющей, поэтому данный способ более эффективен в кабельных сетях, чем в воздушных.

Другой способ защиты от ОЗЗ, предложенный авторами [7], связан с оценкой эквивалентных синхровекторов высших гармоник (ЭСВГ):

$$i_{0e}(t) = \sum_{m=1}^M i_{0(2m+1)}(t), \dot{U}_{0e}(t) = \sum_{m=1}^M \dot{U}_{0(2m+1)}(t), \dot{U}_{0me}(t) = \sum_{m=1}^M (2m+1) \dot{U}_{0(2m+1)}(t), \quad (3)$$

где $\dot{U}_{0me}(t)$, $\dot{U}_{0e}(t)$, $i_{0e}(t)$ - эквивалентные синхровекторы НП.

Преимуществом данного способа является независимая работа алгоритма (3) от уровня и состава гармоник и возможность реализации разных принципов защиты от ОЗЗ (рис.5).

Третье направление для совершенствования защиты от ОЗЗ на основе СВИ связано с оценкой адмиттанса (комплексной проводимости) присоединения и его составляющих (емкости присоединения) [8]:

$$\hat{C}_0(t) = \frac{i_{0e}(t)}{j\omega_0 \dot{U}_{0me}(t) + \dot{U}'_{0e}(t)}. \quad (4)$$

Данный способ наиболее адаптирован для локальной работы защиты, так как оценка теоретической емкости присоединения и задание уставки срабатывания защиты может быть произведена заранее по известным параметрам линии.

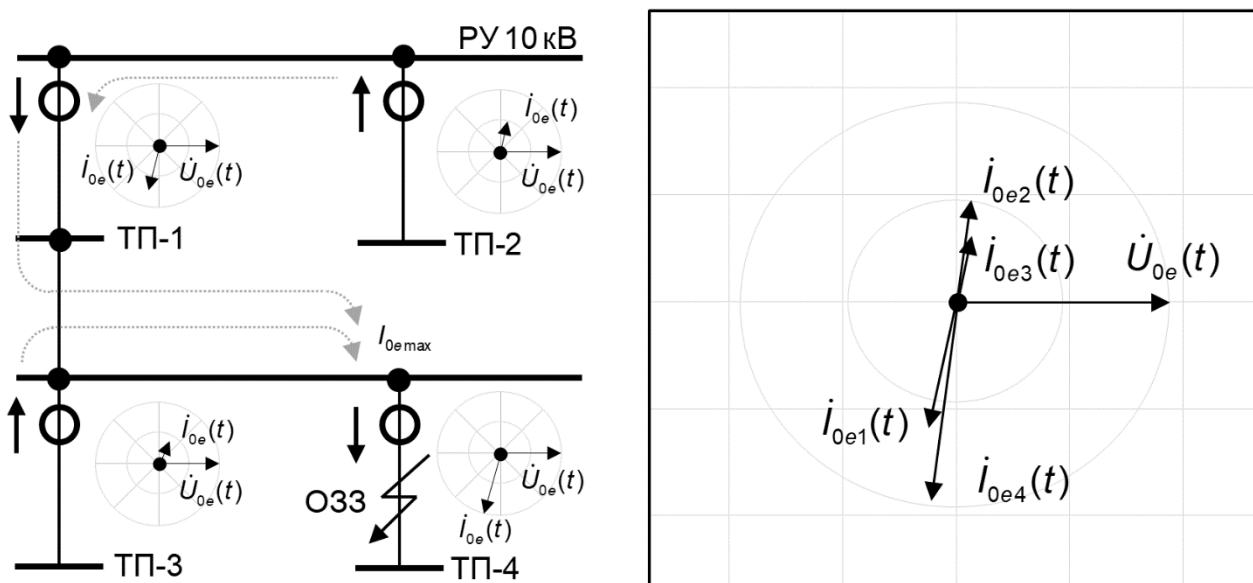


Рис. 5 – Защита от ОЗЗ на основе оценки ЭСВГ.

Адмиттансный принцип выполнения защиты от ОЗЗ на основе измерения синхровекторов тока и напряжения НП позволяет реализовать те же преимущества, что и дистанционный принцип защиты линии от КЗ (рис. 6).

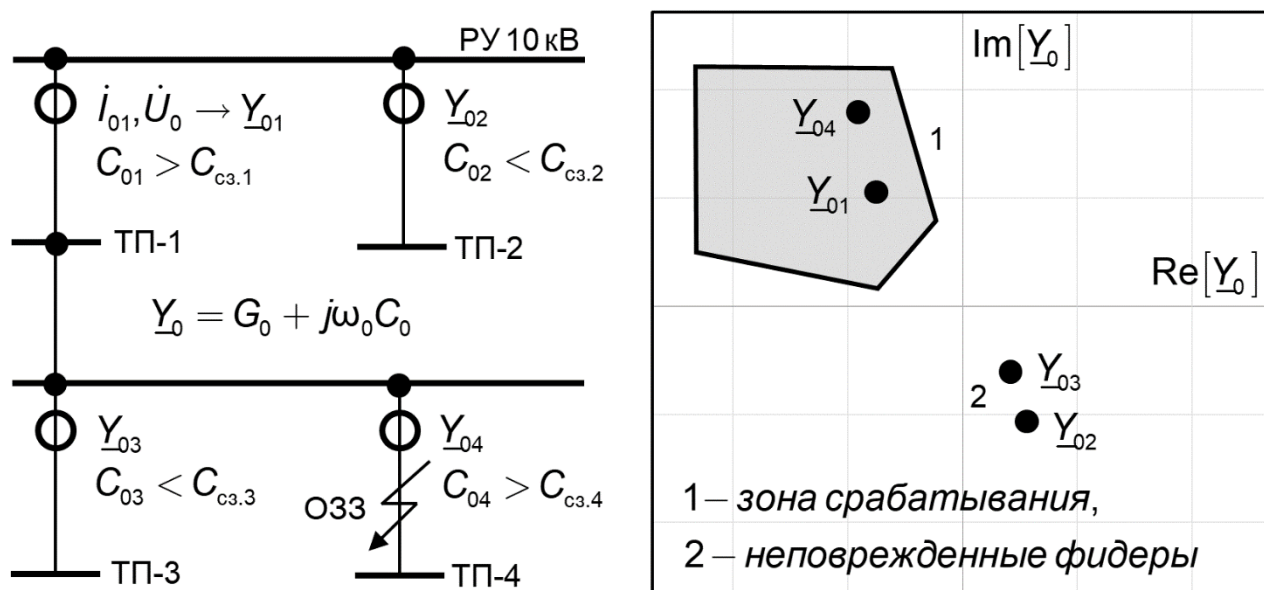


Рис. 6 – Адмиттансный принцип выполнения защиты от ОЗЗ.

На рис.6 представлена характеристика срабатывания защиты от ОЗЗ, которая позволяет разделить зону с параметрами неповрежденных присоединений и зону с параметрами поврежденного фидера. Адмиттансный принцип выполнения защиты от ОЗЗ обеспечивает гибко настраиваемую характеристику срабатывания защиты в зависимости от многих влияющих факторов, например, от погрешности измерений.

Технология СВИ позволяет также рассматривать применение централизованных принципов защиты для построения систем локализации ОЗЗ и определения участка повреждения в сети. Данные принципы были успешно протестированы на математических моделях и на нескольких объектах отечественных электрических сетей [2, 5].

Заключение

Анализ работы электрических сетей среднего напряжения показал, что во многих случаях широко распространенные токовые принципы выполнения защиты не обеспечивают требуемый уровень чувствительности, а также необходимо их совершенствование в новых условиях, в частности, с учетом развития сетей с распределенной генерацией и ВИЭ.

Одним из направлений по совершенствованию защит сетей СН является применение технологии СВИ. Результаты исследований авторов подтверждают, что измерение синхровекторов тока и напряжения в устройствах релейной защиты позволяет существенно улучшить характеристики срабатывания традиционных токовых защит сетей СН, а также расширить области применения более совершенных принципов защиты,

таких как дифференциальный и дистанционный.

В работе представлено несколько направлений для совершенствования защит от КЗ и защит от ОЗЗ на основе технологии СВИ.

Литература

1. Федосеев А. М. Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов // М.: Энергоатомиздат. 1992.
2. Piskunov S., Mokeev A., Ulyanov D. Application of WAMPAC principles in distribution networks // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2023.
3. Мокеев А. В., Пискунов С. А. Развитие теории синхронизированных векторных измерений для совершенствования систем управления, мониторинга, релейной защиты и автоматики // Релейщик. 2023. №. 1. С. 12-19.
4. Мокеев А.В., Пискунов С.А. Дистанционная защита на основе одностороннего и двухстороннего измерения синхровекторов // Релейная защита и автоматизация. № 1 (54). 2024. С. 8-15.
5. Мокеев А. В. и др. Повышение эффективности и надежности РЗА цифровых подстанций и цифровых РЭС // Вестник КГЭУ. 2020. Т. 12. №. 3 (47). С. 92-100.
6. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ // М.: НТФ «Энергопрогресс». 104 с.
7. Piskunov S. A., Mokeev A. V., Ulyanov D. N. Improvement of Ground Fault Protection Based on Equivalent Synchrophasors // 2023 6th Int. Sc. and Tech. Conf. RPA. IEEE, 2023. Т. 1. С. 1-14.
8. Piskunov S. A., Mokeev A. V., Ulyanov D. N. Application of Equivalent Synchrophasors for Admittance Based Ground Fault Protection // 2024 6th Int. Conf. REEPE. IEEE, 2024. С. 1-6.
9. Илюшин, П. В. Развитие распределенных энергетических ресурсов в перспективе до 2050 года в России: проблемные вопросы и пути их решения // 15 лет НТС ЕЭС. Перспективы развития энергетики России до 2050 года: проблемы и пути их решения. Москва. 2022. С. 105-130.
10. Титов И. Т., Бычков А. В., Дони Н. А. Учет влияния открытой электрической дуги на параметры срабатывания дистанционной защиты // Труды НГТУ им. ПЕ Алексеева. 2020. №. 2 (129). С. 85-93.
11. Мокеев А.В. Совершенствование алгоритмов функционирования УСВИ // Релейная защита и автоматика энергосистем. Санкт-Петербург. 25-28 апреля 2017 г.
12. Лачугин В.Ф., Иванов С.В., Белянин А.А. Разработка импульсных защит от замыканий на землю. Релейная защита и автоматизация. 2012. №03(08). С. 50-57.
13. Шуин В. А. и др. Адаптивные токовые защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // Электрические станции. 2018. №. 7. С. 38-45.