

Показаны необходимость и возможность повышения надежности защиты электрических сетей 0,4 кВ при переходе к комплексным критериям срабатывания защиты, сформированным из совокупности нескольких параметров защищаемой электрической цепи. Повышение надёжности обеспечивается за счет повышения показателя безотказности работы в результате реализации режима резервирования отказов.

Рассмотрены новые технические решения, позволяющие формировать в режиме скользящего мониторинга различные типы комплексных критериев срабатывания защит.

**УДК 621.316.13:
621.316.95**

А. С. Кобозев,
канд. техн. наук,
А. Г. Серeda,
канд. техн. наук
Национальный
технический
университет
«Харьковский
политехнический
институт»

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ОБЛЭНЕРГО 0,4 кВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ КРИТЕРИЕВ СРАБАТЫВАНИЯ

1. Существующие проблемы в системе защиты электрических сетей 0,4 кВ

Надёжность защиты электрических сетей, если рассматривать этот термин как более широкое понятие, включающее в себя несколько критериев, определяется не только показателем безотказности работы при выполнении конкретных защитных функций, но и количеством тех защитных функций, которые обеспечивает система защиты.

Действительно, в реальных электрических сетях, в частности в электрических сетях 0,4 кВ, возникает достаточно большое число нештатных ситуаций, которые могут приводить к тем или иным негативным последствиям, поэтому, чем больше защитных функций, реагирующих на нештатные ситуации, имеет система защиты, тем выше надёжность такой защиты. В то же время, очевидно, что если показатель безотказности выполнения защитных функций невысок, то и надёжность защиты не может быть высокой. Поэтому только сочетание расширения перечня защитных функций и повышения вероятности безотказной работы системы защиты позволяет обеспечить современные, более высокие, требования надёжности защиты электрических сетей 0,4 кВ.

В настоящее время при защите электрических сетей 0,4 кВ по-прежнему широко используются автоматические выключатели с аналоговыми электронными расцепителями, в которых, как правило, перечень защитных функций ограничен защитой от токов перегрузки и токов короткого замыкания (КЗ). Ни перечень существующих в указанных аппаратах защит, ни их качество не позволяют решить существующие проблемы повышения надёжности защиты электрических сетей. Следует отметить, что в новых сериях выключателей, уже с микропроцессорными расцепителями, в большинстве зарубежного производства, возможности микропроцессорной техники используются, в основном, для расширения информационно-измерительных и коммуникативных функций: фиксации величины аварийных токов, количества срабатывания и т.д. В то же время для более глубокого

анализа процессов в электрических сетях путём непрерывного мониторинга параметров указанных сетей, характеризующих аварийную ситуацию, возможности микропроцессорной техники используются не в полном объеме.

Отсутствие в существующих автоматических выключателях всех необходимых для надёжной защиты электрических сетей видов защит, обусловило разработку и реализацию в этих сетях дополнительных устройств с теми видами защит, которых нет в выключателях. Так, например, из-за отсутствия в питающих сетях 0,4 кВ защиты от возможных перенапряжений у потребителей при обрыве нулевого провода разработаны и применяются приборы защиты релейные (ПЗР), в которых предусмотрена защита конкретного потребителя от перенапряжения свыше 242 В [1].

Из-за отсутствия в выключателях защиты от удалённых КЗ и возможности реализации режима «дальнего» резервирования в России разработаны микропроцессорные терминалы БМРЗ-0,4 [2]. Они устанавливаются в КТП в дополнение к выключателям, в том числе и с микропроцессорными расцепителями (фирм АВВ, Schneider Electric, Siemens), но не имеющих необходимых видов защит. С помощью терминалов БМРЗ-0,4 может быть решена проблема защиты от удалённых КЗ и режим дальнего резервирования. Аварийными параметрами режима дальнего резервирования при защите от удалённых КЗ в терминалах БМРЗ-0,4 являются соотношения между приращениями активной и реактивной составляющих тока прямой последовательности. Идентификация по указанным параметрам пусковых токов и блокировка в этом случае максимальной токовой защиты, позволяет повысить чувствительность защиты именно к токам КЗ, и тем самым выполнить одно из необходимых условий надёжного резервирования вышестоящим выключателем нижестоящего при отказе последнего.

Следует отметить, что одно только увеличение чувствительности к токам КЗ вышестоящего выключателя, не позволяет в полной мере использовать возможности режима резервирования для повышения надёжности защиты. Чтобы в полной мере добиться повышения надёжности, необходимо обеспечить и малое время срабатывания вышестоящего выключателя. Последнее затруднительно без применения быстродействующей селективной защиты, в которой нет преднамеренных задержек срабатывания. А реализация быстродействующей селективной защиты невозможна без решения проблемы быстрого, ещё на начальном этапе возникновения возмущения цепи, идентификации вида тока возмущения по нескольким параметрам защищаемой цепи (действующего значения тока возмущения, коэффициента мощности, вида тока возмущения-2-х или 3-х фазное КЗ). Все вышеизложенное относится к повышению качества защит от токов междуфазных КЗ (защита «отсечки» – защита I и защита от КЗ – защита S).

Аналогичные проблемы быстрого определения параметров цепи существуют и для идентификации аварийных ситуаций в четырех проводной цепи с N -проводником. К защитам, которые должны реагировать на аварийные ситуации в цепи с N -проводником, относятся защита от обрыва N -провода (защита N), от однофазных КЗ на землю (защита G), от возникновения перенапряжений у однофазных КЗ (защита UN).

Анализ параметров цепи, необходимых для построения защиты от обрыва N -проводника, уже был рассмотрен в работе [3]. Однако в указанной публикации эта проблема рассматривалась для электрических сетей с линейными нагрузками. Однако для сетей со значительной долей нелинейных нагрузок, а таких с каждым годом становится все больше, построения защит без учета такого параметра цепи, как спектр гармоник тока, не может обеспечить высокую эффективность таких защит.

Цель настоящей статьи – показать, что обеспечение высокой надёжности защиты электрических сетей возможно только при использовании комплексных

критериев срабатывания, включающих в себя совокупность значений ряда параметров цепи, наиболее полно характеризующих ту или иную аварийную ситуацию в электрической сети. К таким параметрам, совокупность значения которых должны использоваться при формировании комплексных критериев срабатывания тех или иных видов защит, должны быть не только действующие значения токов возмущения в фазах $\Delta I_{\phi(a,b,c)}$ и $\cos\varphi$, но и действующие значения наиболее значимых гармоник токов в фазах (I_1, I_3, I_5) и в нулевом проводе (I_{01}, I_{03}, I_{05}).

Другая задача, решаемая в настоящей статье – дать научное обоснование новых технических решений, позволяющих, путем использования простых алгоритмов интегрирования квадратов дискретных значений тока, соответствующих разным частотам дискретизации исходных аналоговых зависимостей тока от времени, быстро определять параметры цепи и формировать, на их основе, комплексные критерии срабатывания.

2. Комплексные критерии срабатывания защит от междуфазных КЗ и методы их формирования

В техническом решении [4] определение значения $\cos\varphi$ предлагается на основании соотношения максимального S_{\max} и минимального S_{\min} значений силовой функции цепи $S(t)$ – зависимости от времени суммы квадратов мгновенных значений фазных токов $i_{j(a,b,c)}^2$ симметричной трехфазной системы:

$$S(t) = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t). \quad (1)$$

Выражение силовой функции представленное выражением (1) позволяет определить указанную зависимость $S(t)$, используя фактические мгновенные значения токов в фазах, получаемые от датчиков тока на выходе АЦП. Аналитическое же выражение силовой функции, которое получено в результате подстановки в выражение (1) известных зависимостей для токов в 3-х фазной цепи, после всех преобразований имеет следующий вид:

$$S(t) = 3I_{\phi}^2 \left[1 - 2e^{-\frac{t}{T}} \cos\varphi + e^{-\frac{2t}{T}} \right], \quad (2)$$

где I_{ϕ} – действующее значение периодической составляющей фазного тока симметричной трехфазной системы, T – постоянная времени цепи, определяющая $\cos\varphi$.

Сопоставление найденной по дискретным значениям фазных токов $i_{j(a,b,c)}^2$ зависимости силовой функции $S(t)$ с её аналитическим выражением позволяет, используя особенности силовой функции, быстро (не дожидаясь завершения переходного процесса изменения тока) и точно (без погрешности, обусловленной влиянием случайной фазы возникновения тока возмущения на его величину) определить значение $\cos\varphi$.

Так как минимальное значение функции S_{\min} достигается только в течение второго полупериода тока, время определения величины $\cos\varphi$ составляет порядка 20 мс. Такое время вполне допустимо для идентификации по величине $\cos\varphi$ удалённого КЗ – величина $\cos\varphi$ должна быть не более 0,5 ($\cos\varphi \leq 0,5$). Но малое значение $\cos\varphi$ возможно и в случае, если КЗ в электрической цепи произошло на отводящих зажимах выключателя, расположенного вблизи питающего трансформатора, то есть когда

должна быть реализована защита «отсечки» – защита *I*. Поэтому, в общем случае, для быстрой и надёжной идентификации различных видов междуфазных КЗ необходимы комплексные критерии срабатывания, которые, учитывая и реализацию защиты «отсечки», должны определяться достаточно быстро.

Уменьшить время определения величины $\cos\varphi$ до 10мс можно, если использовать не оба экстремальных значений *S*-функции, а только максимальное значение S_{\max} .

На рис. 1 приведены зависимости силовой функции *S*(*t*) для двух значений $\cos\varphi$: 0,3 и 0,7. Как видно из рисунка, графики зависимостей *S*(*t*) и их экстремальные значения в наибольшей степени отличаются в интервале (0÷10)мс. Поэтому, как показал анализ, соотношение интеграла силовой функции *S*(*t*) в интервале времени (0÷10)мс к её максимальному значению S_{\max} , (см. рис. 1), а это не что иное, как соотношение суммы интегралов Джоуля всех фаз к максимальному значению указанной суммы, является достаточно значимым показателем для определения величины $\cos\varphi$.

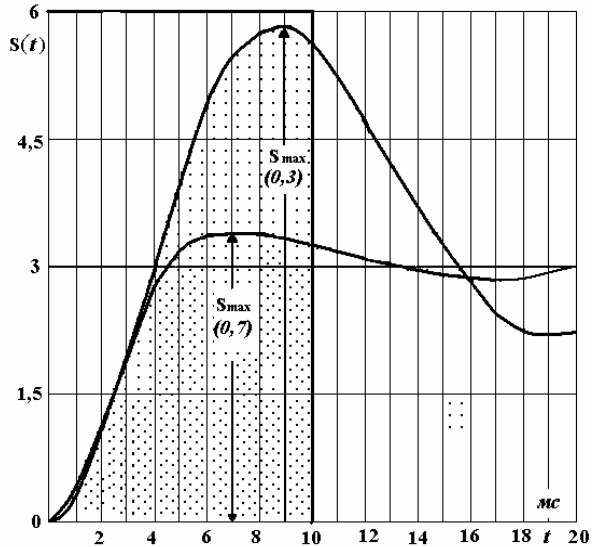


Рис. 1

После того, как определено значение $\cos\varphi$, нетрудно вычислить и действующее значение тока I_{ϕ} из выражения: которое однозначно связано с коэффициентом ударности цепи K_y выражением:

$$S_{\max} = 3DI_{\phi}^2 \cdot K_y^2, \tag{3}$$

где K_y – коэффициент «ударности» тока в трехфазной электрической цепи, зависимость которого в функции $\cos\varphi$ приводится в справочной литературе.

Приведенная методика определения параметров цепи имеет следующие достоинства:

- позволяет использовать один унифицированный, достаточно простой, математический аппарат для реализации различных видов защит, поскольку при построении защиты от удалённых КЗ (защита S_1) и при построении быстродействующей селективной защиты (защита S_2) используются интегралы Джоуля в каждой фазе и их сумма. Как будет показано ниже, такой же не сложный математический аппарат интегрирования дискретных значений тока, но для разных интервалов дискретизации, может быть использован и при определении спектра гармоник тока;
- не требуются дополнительные датчики – напряжения, реактивной мощности и т.д., а, следовательно, и дополнительный математический ресурс для обработки дополнительных входных сигналов;

- не требуется задержка времени для того, чтобы закончились переходные процессы, вызванные током возмущения цепи, с тем, чтобы точно определить действующее (установившееся) значение тока, реактивную мощность и др.

По совокупности значений трех параметров цепи ($\cos\phi$, ΔI_ϕ и тип междуфазного КЗ) могут быть идентифицированы следующие виды тока возмущения:

- пусковой ток, если $\cos\phi=0,2\div 0,4$ и $\Delta I_\phi \geq I_{sd}$, где I_{sd} – токовая уставка с учетом возможности нормального пуска электродвигателей.
- удаленное трехфазное КЗ, если $\cos\phi=0,6\div 1,0$ и $\Delta I_\phi \geq I'_{sd}$, где I'_{sd} – токовая уставка удалённого КЗ или режима резервирования;
- трехфазное междуфазное КЗ на отводящих зажимах выключателя, если $\Delta I_\phi \geq I_i$, где I_i – токовая уставка «отсечки».

На рис. 2 приведен фрагмент блок-схемы работы микропроцессорного устройства расцепителя при реализации защиты от междуфазных КЗ с использованием комплексных критериев срабатывания защиты. В зависимости от совокупности значений трех параметров защищаемой электрической цепи (ΔI_ϕ , $\cos\phi$ и типа междуфазного КЗ) в логических модулях «И»-«И» формируются 3 комплексных критерия, в соответствии с которыми вырабатываются необходимые управляющие сигналы на исполнительный элемент защиты.

В модуле 1 определяются значения интегралов Джоуля для токов возмущения в фазах – Q_a ; Q_b и Q_c .

В модуле 2 на основе сравнения текущих значений

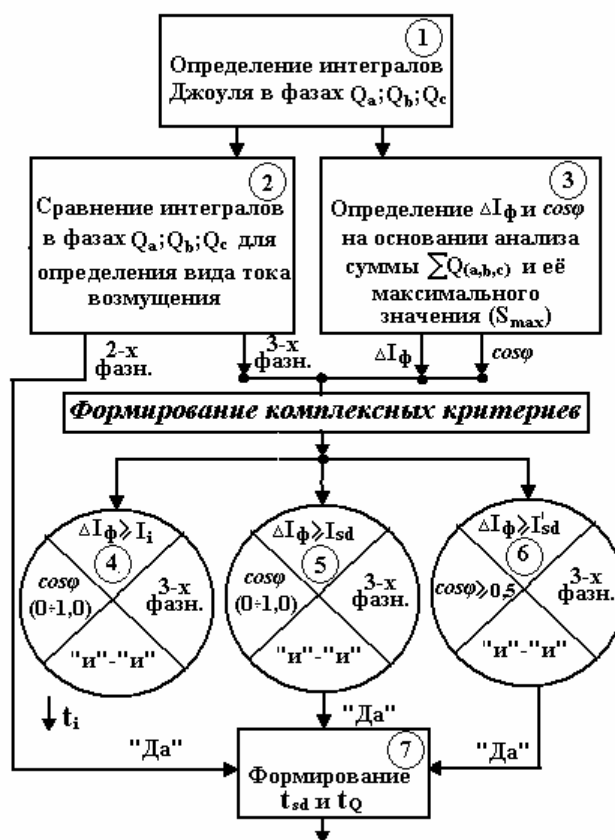


Рис. 2

интегралов Джоуля в фазах определяется вид тока возмущения – 2-х или 3-х фазный.

В модуле 3 на основании анализа текущих значений суммы интегралов Джоуля

$$\sum_0^t Q_{(a,b,c)}(t), \text{ т.е. силовой функции } S(t), \text{ и максимального её значения } S_{max}$$

определяются значения ΔI_ϕ , $\cos\phi$ и тип междуфазного КЗ. В модулях 4, 5 и 6 по совокупности значений трех параметров защищаемой электрической цепи (ΔI_ϕ , $\cos\phi$ и тип междуфазного КЗ) формируются комплексные критерии срабатывания защиты и соответствующий управляющий сигнал на исполнительный элемент.

Так как параметры цепи при пуске электродвигателя не соответствует ни одному из 3 сформированных комплексных критериев, защита на пусковой ток не реагирует.

3. Комплексные критерии срабатывания защит от аварийных ситуаций, обусловленных обрывом нулевого провода

Кроме проблем с защитой от междуфазных КЗ, в реальных сетях 0,4кВ существуют проблемы с защитой от других аварийных ситуаций. К защитам, обусловленным обрывом N -провода, относятся защиты от обрыва нулевого провода (защита N) и от возможных перенапряжений у однофазных потребителей (защита UN).

При построении указанных защит, как это было рассмотрено в [2], критерием обрыва N -провода, по своей технической сути, служит результат сравнения «штатного» и аварийного «образов» электрической цепи. При этом физическим эквивалентом «штатного образа» цепи выступает ожидаемое значение тока в N -проводнике I'_0 , а эквивалентом аварийного «образа» цепи – фактическое значение тока в N -проводнике – I_0 .

Под ожидаемым током I'_0 понимается такое значение тока, которое должно быть при неповрежденном нулевом проводнике. Значение ожидаемого тока I'_0 определяется как сумма трех векторов фазных токов:

$$I'_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c. \quad (4)$$

В исправной электроустановке углы между векторами фазных токов составляют, практически 120° , даже при наличии несимметрии. Поэтому, если фазные токи синусоидальные, определение тока I'_0 из уравнения (4) не представляет трудностей.

Но в случае нелинейных нагрузок, когда фазные токи несинусоидальные и в результате искажения кривой фазных токов, кроме первой, появляются более высокие гармоники тока, определение значения ожидаемого тока I'_0 , исходя только из несимметрии фазных токов, невозможно. Обусловлено это тем, что даже в «штатном» режиме работы цепи (без обрыва N -провода) и при симметрии фазных токов, в N -проводе будут протекать, в ряде случаев достаточно значительные, токи 3-й гармоники. Поэтому, при наличии в сети нелинейных нагрузок, а значит, и наличии в фазах токов 3-й гармоники I_3 , при анализе величины ожидаемого тока в N -проводе необходимо, кроме геометрической суммы гармоник, некратных 3, учитывать и арифметическую сумму токов 3-й гармоники и гармоник кратных 3.

В реальных электрических сетях наиболее значимыми по влиянию на величину общего тока являются 3 первые нечетные гармоники тока. В этом случае значение ожидаемого тока в N -проводе I'_0 может быть представлено следующим выражением:

$$I'_0 = \sqrt{(\sum \bar{I}_{1(a,b,c)})^2 + (\sum I_{3(a,b,c)})^2 + (\sum \bar{I}_{5(a,b,c)})^2}, \quad (5)$$

где $\bar{I}_{1(a,b,c)}$ и $\bar{I}_{5(a,b,c)}$ – вектора токов 1-й и 5-й гармоник, а $I_{3(a,b,c)}$ – модули векторов токов 3-й гармоники.

Таким образом, величина ожидаемого тока представляет собой достаточно сложный комплексный критерий, по которому оценивается целостность N -проводника в разветвленной электрической цепи. Для его формирования необходимо знать не только значения токов в фазах, но и спектральный гармонический состав этих токов.

Существует достаточно много методов определения спектра гармоник любого несинусоидального сигнала. Наиболее известным является преобразование Фурье. Для решения прикладных задач, как правило, используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ). При использовании ДПФ непрерывная функция, например, зависимость

тока во времени $i(t)$, умножается на решетчатую дельта-функцию (δ -функцию), значения которой определены только в дискретные моменты времени:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0; \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases} \quad (6)$$

В результате такого умножения непрерывная функция $i(t)$ преобразуется в дискретную функцию $i_d(t)$:

$$i_d(t) = i(t) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - n \cdot \Delta t_d) = \sum_{n=0}^{N-1} i(t) \cdot \delta(t - n \cdot \Delta t_d), \quad (7)$$

где N – число дискретных отсчетов, Δt_d – интервал дискретизации.

Для спектрального анализа с использованием ДПФ требуется достаточно большое число математических операций умножения, сложения и возведение в квадрат, т. к. для определения величины даже одной из гармоник тока требуется провести расчет всего спектра гармоник данного сигнала. Поэтому разработаны альтернативные методы дискретного разложения в ряды Фурье, позволяющие определять фиксированные гармоники, без определения всего гармонического спектра.

Одним из таких альтернативных методов разложения в ряды Фурье является алгоритм Герцеля [6]. При его использовании, за счет реализации ДПФ в виде так называемого фильтра с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтра), упрощается расчет спектра гармоник, а значит, заметно уменьшается число необходимых математических операций. Однако, и в случае применения алгоритма Герцеля, для непрерывного мониторинга гармонического состава тока требуется достаточно значительный ресурс микропроцессора по быстродействию, а значит и по стоимости.

Для возможности быстрого скользящего мониторинга спектра гармоник сигнала разработан метод, который назван модифицированным алгоритмом Герцеля [7]. Метод позволяет пересчет значения одной гармоники, найденной на предыдущем временном шаге скольжения, в значение этой же гармоники при следующем шаге скольжения, что снижает требования к ресурсу микропроцессора по его быстродействию. Однако, как показал опыт, вышеуказанные методы все же являются излишне сложными и избыточными для устройств защиты. Поэтому более целесообразным представляется использовать метод, специально разработанный для конкретной задачи определения значений только первых трех нечетных гармоник фазного. Суть предлагаемого метода определения спектра гармоник заключается в совместном использовании результатов расчетов действующих значений тока по дискретным значениям i_j , полученных при трёх разных частотах дискретизации f_d исходной аналоговой зависимости тока от времени – при $f_d = 750$ Гц; 500 Гц и 300 Гц. Для лучшего понимания предлагаемого метода на рис. 3 приведены зависимости от времени мгновенных дискретных значений несинусоидального тока $i(t)$, а также зависимости изменения во времени значений токов 1, 3 и 5-й гармоник – $i_1(t)$, $i_3(t)$, $i_5(t)$, соответственно. Рассмотрим, как влияет на величину действующего значения фазного тока I_ϕ частота дискретизации f_d , или соответствующий интервал дискретизации Δt_d .

При частоте дискретизации $f_d = 750$ Гц, которая в 3 раза больше частоты 5-й гармоники, согласно требованиям ГОСТа на качество электроэнергии [9], рассчитанное действующее значение тока будет полностью учитывать все 3 гармоники

тока (1, 3 и 5-ю). В нижней части рис. 3 для наглядности учета всех 3 гармоник тока (I_1, I_3, I_5) в общем токе I_ϕ , показано сечение проводника, через который протекают токи всех трех гармоник. Для этого случая, вычисленная по дискретным значениям тока, величина фазного тока определяется следующим выражением:

$$I_\phi = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} . \tag{8}$$

Величина фазного тока I_ϕ по (8) включает в себе все 3 гармоники тока (I_1, I_3, I_5).

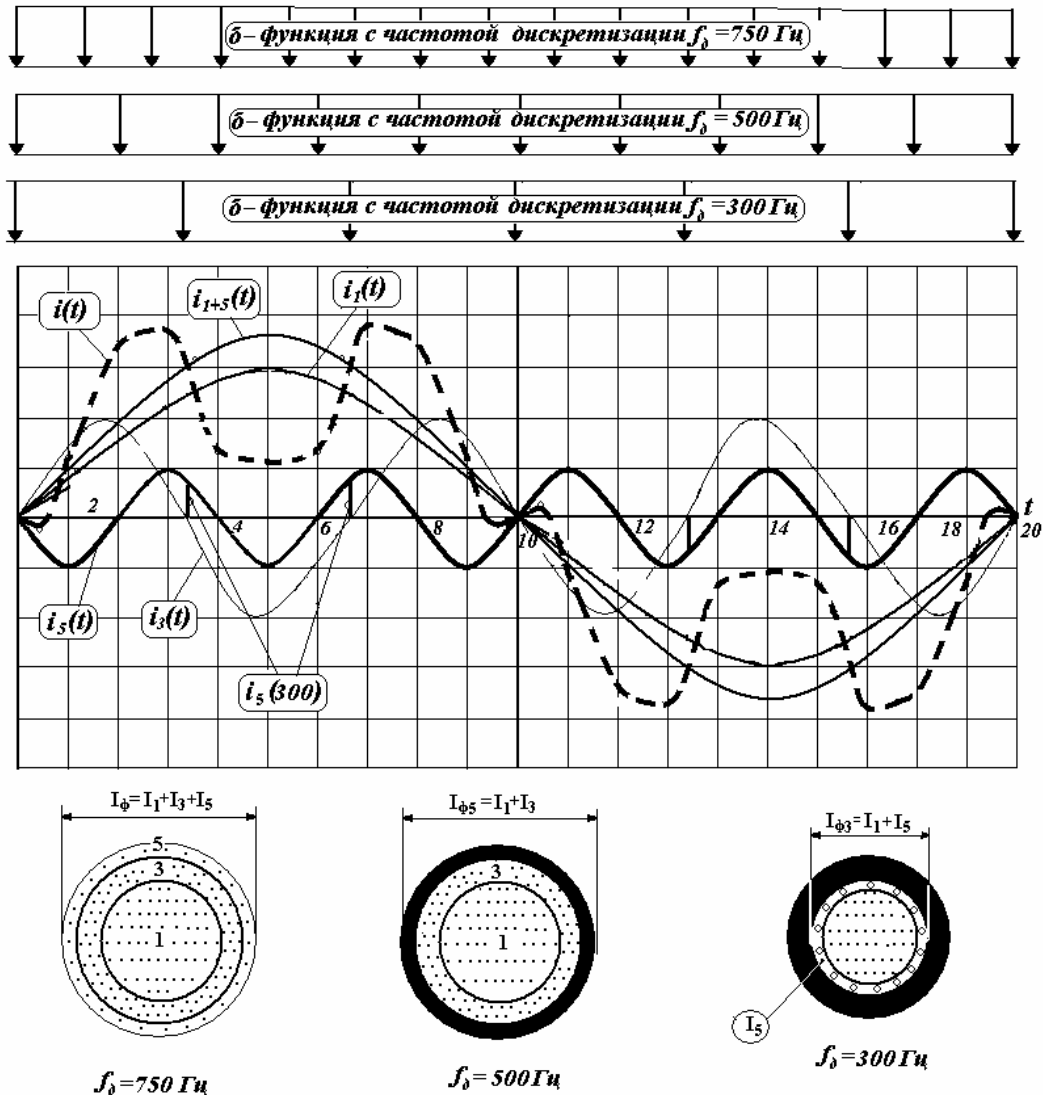


Рис. 3

При частоте дискретизации $f_d = 500$ Гц, а эта частота в 2 раза больше частоты 5-й гармоники, если действительные значения решетчатой δ -функции совпадают с моментом прохождения тока 5-ой гармоники через 0, как это и показано на рис. 3, то в действующем значении фазного $I_{\phi 5}$ тока не будет учтена 5-я гармоника тока I_5 . Факт отсутствия в фазном токе 5-ой гармоники на рис. 3 показан так, что соответствующая 5-й гармонике часть сечения проводника залита черным цветом. Для этого случая,

подсчитанная по дискретным значениям тока, величина фазного тока $I_{\phi 5}$ включает в себе 2 гармоники тока 1 и 3-ю (I_1 и I_3).

При частоте дискретизации $f_d=300$ Гц, которая в 2 раза большей частоты 3-й гармоники, в действующем значении фазного тока $I_{\phi 3}$ не будет учтена 3-я гармоника I_3 . Что касается тока 5-й гармоники, то при частоте 300 Гц её точное восстановление по дискретным значениям невозможно, так как указанная частота меньше требуемого по ГОСТу на качество электроэнергии [9].

На рис. 4 приведены зависимости изменения токов 1 и 5-й гармоник во времени – $i_1(t)$ и $i_5(t)$, соответственно. Здесь же показаны дискретные значения тока 5-й гармоники, полученные при частоте дискретизации $f_d=300$ Гц (соответствующий интервал дискретизации $\Delta t_d=3,33$ мс). Как видно из рисунка, в моменты прохождения тока 3-й гармоники через 0, т.е. когда решетчатая δ -функция имеет действительные значения, дискретные значения тока 5-й гармоники (отрезки 2 и 3) имеют тот же знак, что и дискретные значения тока 1-й гармоники. Это означает, что при частоте дискретизации 300Гц, восстановленная по дискретным значениям, соответствующим $\Delta t_d=3,33$ мс, зависимость тока 5-й гармоники, по существу, трансформируются в зависимость некоторого фиктивного тока 1-й гармоники, величина которого определяется по дискретным значениям тока 5-ой гармоники – ток $i_{1(5)}(t)$. Как показали расчеты, действующее значение этого фиктивного тока равно величине тока 5-ой гармоники $I_{1(5)}=I_5$. Поэтому действующее значения тока $I_{\phi 3}$ следует определять как сумму двух векторов токов 1-й гармоники т.е., если перейти к модулям указанных векторов, то $I_{\phi 3}=I_1+I_5$.

Это и отражено на рис. 4, где зависимость фазного тока $i_{\phi 3}(t)$, восстановленного по дискретным значениям, соответствующим частоте 300 Гц, показана с большей амплитудой, чем зависимость тока 1-й гармоники $i_1(t)$.

С учетом вышеизложенного метод расчета первых 3 гармоник тока сводится к следующим простым арифметическим операциям с действующими значениями фазного тока, подсчитанных по дискретным значениям тока с частотами дискретизации $f_d=750, 500$ и 300 Гц – токи I_{ϕ} , $I_{\phi 5}$ и $I_{\phi 3}$.

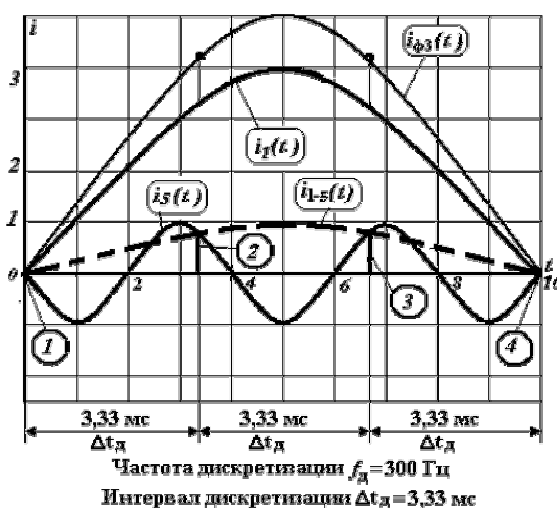


Рис. 4

Определение действующего значения тока 5-й гармоники:

$$I_5 = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_{\phi 3}^2} \tag{9}$$

Определение действующего значения тока 1-й гармоники:

$$I_1 = I_{\phi 3} - I_5 \tag{10}$$

Определение действующего значения тока 3-й гармоники:

$$I_3 = \sqrt{I_\phi^2 - I_5^2 - I_1^2} \quad (11)$$

Рассмотренный выше метод спектрального анализа нижних, наиболее значимых для построения защит, гармоник является лишь частью алгоритма защиты от обрыва нулевого проводника (защиты N) для правильной работы которой требуется формирование комплексного критерия срабатывания.

Как указывалось ранее, при обрыве нулевого проводника в любом месте по длине линии с распределёнными нагрузками идентификация аварийной ситуации производится по несоответствию фактического образа цепи её «штатному» образу. Это означает, что для правильного срабатывания защиты N необходимо формирование достаточно сложного комплексного критерия - ожидаемого тока в нулевом проводнике I'_0 .

На рис. 5 приведен алгоритм формирования такого критерия.

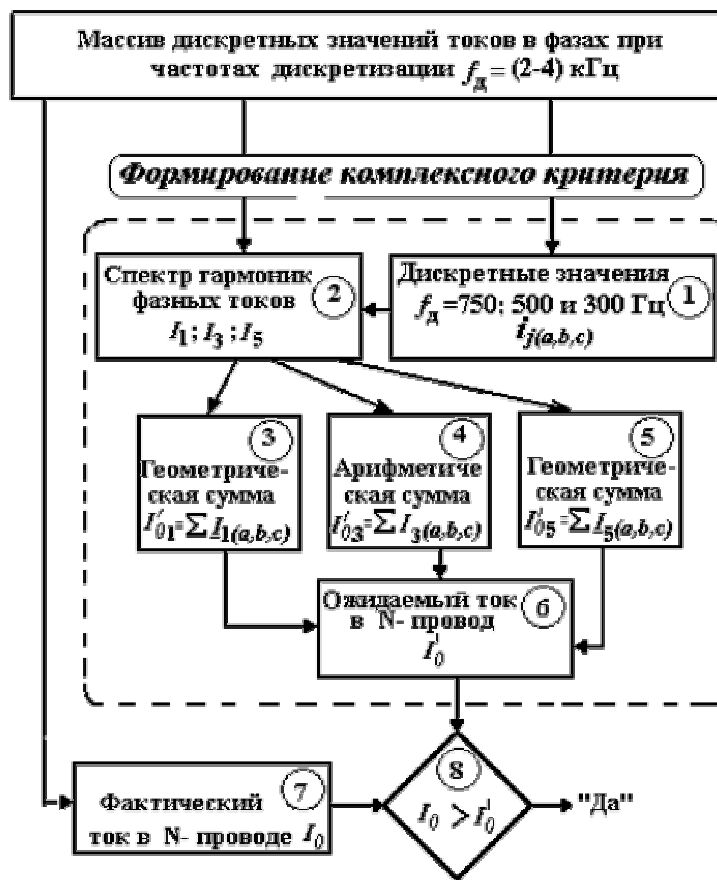


Рис. 5

В модуле 1 из массива дискретных значений фазных токов $i_{j(a,b,c)}$ полученных за счет умножения исходных аналоговых зависимостей тока от времени в фазах на решетчатую δ -функцию с частотой дискретизации $f_д = (2\div 4)$ кГц извлекаются дискретные значения, соответствующие частотам дискретизации $f_д = 750; 500$ и 300 Гц.

В модуле 2 вычисляются действующие значения 1, 3 и 5-й гармоник фазных токов.

В модуле 3 вычисляется 1 гармоника ожидаемого значения тока в нулевом проводнике, как геометрическая сумма 1-х гармоник фазных токов – I'_{01} .

В модуле 4 определяется 3-я гармоника ожидаемого тока в нулевом проводнике, как арифметическая сумма 3-х гармоник фазных токов – I'_{03} .

В модуле 5 вычисляется 5-я гармоника ожидаемого тока в нулевом проводнике, как геометрическая сумма 5-х гармоник фазных токов – I'_{05} .

В модуле 6 определяется комплексный критерий срабатывания защиты – действующее значение ожидаемого тока в нулевом проводнике:

$$I'_0 = \sqrt{(I'_{01})^2 + (I'_{03})^2 + (I'_{05})^2} . \quad (12)$$

В модуле 7 по дискретным значениям фазных токов определяют фактический ток в нулевом проводнике I_0 , который в модуле 8 сравнивается с ожидаемым током I'_0 и, в случае аварийной ситуации, формируется сигнал на срабатывание защиты.

Следует отметить, что для построения другой защиты, обусловленной повреждением N -проводника, а именно защиты от возможных перенапряжений у однофазных потребителей (защиты UN) требуется формирование ещё более сложного комплексного критерия. Ведь для этого, как показано для электрических сетей без нелинейных нагрузок [3], необходимо контролировать не только целостность N -проводника, но и соотношение величин фазных токов в аварийной части сети. А так как в фазных токах аварийной части сети, где поврежден N -проводник, не будет токов 3-й гармоники, при формировании комплексного критерия срабатывания защиты UN без анализа спектра токов в аварийной части обойтись нельзя.

Кроме того, при построении защит сетей с не линейными нагрузками от других аварийных ситуаций, не обусловленных нарушением целостности N -проводника, требуется формирование комплексных критериев, включающих в себе не только величины фазных токов, но и их спектральный состав. Так, например, при линейных нагрузках в качестве критерия срабатывания защиты от однофазных КЗ на землю (защиты G) принято использовать величину тока в N -проводнике, т.к. в исправной сети он вызван несимметрией фазных токов и, как правило, не превышает (10-20)% рабочего фазного тока. Однако, в случае нелинейных нагрузок, защита G , реагирующая только на величину тока в N -проводнике, не может быть эффективной. Ведь 3-и гармоники фазных токов суммируются в N -проводнике даже при симметричной нагрузке. Поэтому даже в штатном режиме с нелинейными нагрузками величина тока в N -проводнике может быть даже больше величины рабочего тока фазы [10]. Поэтому для построения надёжной защиты от однофазных замыканий сетей с нелинейными нагрузками необходима идентификация вида тока в нулевом проводнике (ток КЗ или ток нагрузки). Не углубляясь в особенности построения такой защиты, укажем, что для её реализации необходимо формирование комплексных критериев, являющихся определённой совокупностью значений различных гармоник тока.

4. Резюме

1. Показано, что для повышения надёжности защит электрических сетей 0,4 кВ, включая сети с нелинейными нагрузками, необходим переход к комплексным критериям срабатывания защиты, включающих в себе, кроме величины тока и другие параметры защищаемой цепи – действующее значения тока возмущения цепи, коэффициент мощности, спектральный состав токов и др.

2. Разработаны и предложены новые технические решения по надёжному и быстрому формированию комплексных критериев срабатывания, необходимых для идентификации разных видов тока возмущения– междуфазного короткого замыкания, в том числе и удалённого, однофазного короткого замыкания на землю, пуска электродвигателя, перегрузки, обрыва нулевого провода и др.

3. Идентификация вида тока возмущения позволяет обеспечивать повышение чувствительность защиты к токам КЗ, что, в совокупности с быстродействием защиты, включая и селективную защиту, позволяет в полной мере использовать возможности режима резервирования для повышения показателя безотказной работы защиты. Это выгодно отличает предлагаемые технические решения от тех, в которых повышение чувствительности не сочетается с быстродействием.

5. Достоинством предлагаемых технических решений является также возможность определения достаточно большого числа параметров защищаемой цепи на основании анализа информации только от датчиков тока, без привлечения дополнительных датчиков напряжения, реактивной мощности и т.д.

6. Для определения параметров цепи, необходимых для формирования комплексных критериев и идентификации с их помощью различных видов аварийных ситуаций, предложен простой математический аппарат, в основе которого лежит расчет квадратов дискретных значений фазных токов, полученных при разных частотах дискретизации, а также простые арифметические операции с величинами, полученными в результате численного интегрирования указанных выше дискретных значений тока. Это позволяет реализовать предлагаемых технических решений не только в отдельных дополнительных устройствах к существующим выключателям, как, например, в ПЗР или терминалах БМРЗ-0,4, но и в расцепителях самих выключателей, для которых габаритные и стоимостные требования к микропроцессорному устройству более жесткие.

Список литературы

1. ПЗР (Приборы защитные, релейные), <http://www.smont.ru/production/pzr.html>.
2. Езерский В.Г. Уникальная отечественная защита дальнего резервирования для сетей 0,4 кВ, не имеющая мировых аналогов, http://market.elec.ru/nomer/8/zashita_setei/ «Электротехнический рынок» / №2 (8) февраль 2007 / Статьи и обзоры оборудования.
3. Байда Е.И., Гапоненко Г.Н., Кобозев А.С. Защита однофазных потребителей от перенапряжений при обрыве нулевого провода / *Электротехніка і електромеханіка*. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2010. – №1.
4. Пат. 81981 України МПК Н 02 Н 7/00, Н 01 Н 73/00 Система захисту розгалужених трифазних електричних кіл від струмів віддалених коротких замикань / Г.М. Гапоненко, В.В. Омельченко, О.С. Кобозев. – №а200604596. Заявлено 25.04.2006; Опубл. 25.02.2008, Бюл. №4..
5. Климов В.П., Москалев А.Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания, <http://www.tensy.ru/article01.html>
6. Алгоритм Герцеля (Goertzel algorithm). Теория и практика цифровой обработки сигналов, <http://www.dsplib.ru/content/goertzel/goertzel.html>
7. Динамический пересчет спектральных отсчетов на каждом такте дискретизации. Модифицированный алгоритм Герцеля», <http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html>.
8. Теорема Котельникова-Шеннона, www.graphicon.ru/oldgr/courses/cg_el00/kotelnikov.pdf
9. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
10. Григорьев О.А., Петухов В.С., Соколов В.А., Красилов И.А. Влияние "компьютерных" нагрузок на работу электрических сетей зданий / *Connect Мир связи!*, 2002. – № 12.

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ОБЛЕНЕРГО 0,4 кВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНИХ КРИТЕРІЇВ СПРАЦЬОВУВАННЯ

О. С. Кобозев, О. Г. Серета

Показана необхідність та можливість підвищення надійності захисту електричних мереж 0,4 кВ за рахунок переходу до комплексних критеріїв

спрацьовування захисту, що сформовані поєднанням декількох параметрів електричної мережі, що захищається. Підвищення надійності забезпечується як за рахунок розширення переліку аварійних ситуацій в електричній мережі, так і за рахунок підвищення показників безвідмовності захисту в результаті резервування відмов.

Розглянуті нові технічні рішення, які дозволяють в режимі ковзного моніторингу формувати різні типи комплексних критеріїв спрацьовування тих або інших видів захисту.

PROTECTION RELIABILITY INCREASING OF THE ELECTRIC NETWORKS OF THE REGIONAL DISTRIBUTIVE COMPANIES 0,4 kV BY MEANS OF THE USE THE COMPLEX CRITERIA OPERATION

A. S. Kobozev, A. G. Sereda

They are shown need and possibility of increase of the reliability of protection of the electric networks 0,4 kV by transition to the use of complex criteria of operation of the protection, formed from aggregate several parameters protectable electric circuit. Increasing of the reliability is provided as to account of the expansion of the list of the emergencies in electric network, on which reacts protection, so and to account of increasing of the factor faultlessness functioning the system of protection at realization of the mode of the standby refusal.

They are considered new technical decisions, allowing form in the mode of perpetual monitoring different types complex criteria operation that or other type of protection.