

УДК 621.316.925.2

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ШИН 110–220 кВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ДВОЙНОЙ ЗАПИСИ

А.Л. Куликов¹, В.Ю. Вуколов¹, А.А. Колесников², М.В. Шарыгин¹

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
г. Нижний Новгород, Россия

² Филиал Институт «Энергосетьпроект-НН-СЭШ»
ЗАО "ГК "Электрощит"-ТМ Самара", г. Нижний Новгород, Россия
inventor61@mail.ru, vvucolov@mail.ru, anton8094@mail.ru, sharygin.m.v@gmail.com

Резюме: Для повышения эффективности защиты шин 110–220 кВ предлагается применение алгоритмов, основанных на дифференциальном принципе в сочетании с методом двойной записи. Двойная запись – способ регистрации хозяйственных операций бухгалтерского учета, при котором каждое изменение состояния средств фиксируется на двух счетах, обеспечивая общий баланс. С помощью организации избыточной обработки информации о токах, измеренных на концах защищаемых объектов и сформированных в специальные матрицы, реализуется надежное функционирование дифференциальной защиты, исключая ее излишние действия при повреждениях трансформаторов тока.

Ключевые слова: двойная запись, дифференциальная защита, зона защиты, контроль исправности трансформаторов тока, матрица, теория графов.

DIFFERENTIAL PROTECTION OF BUSBAR 110-220 kV WITH APPLICATION OF METHOD OF DOUBLE ENTRY

A.L. Kulikov¹, V.Yu Vukolov¹, A.A Kolesnikov², M.V Sharyigin¹

¹Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev (NNSTU),
Nizhny Novgorod, Russia

²Branch office “Energosetproekt-NN-SESH”», CJSC “Group Of Companies
“Electroshield – TM Samara”, Nizhny Novgorod, Russia
inventor61@mail.ru, vvucolov@mail.ru, anton8094@mail.ru, sharygin.m.v@gmail.com

Abstract: For increase of efficiency protection of busbar 110-220 kV is proposed to use an algorithms, based on the differential principle, in combination with the method of double entry. Double entry it is method of registration of economic operations accounting, by which every change of the state funds recorded in two accounts, ensuring the overall balance. By providing redundant processing of information about currents measured at the ends of the protected object, and is formed in a special matrix that implements the reliable operation of the differential protection, eliminating its excessive action when damaged the current transformers.

Keywords: double entry, differential protection, protection zone, monitoring health of current transformers, matrix, graph theory.

Введение

Основными видами повреждения систем шин напряжением 110–220 кВ являются двух

и трехфазные короткие замыкания (КЗ), КЗ на землю одной, двух и трех фаз [1].

Для защиты шин 110–220 кВ от междуфазных КЗ, согласно нормативной документации (Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2007), (Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ СТО 56947007-29.240.10.028-2009. ОАО «ФСК ЕЭС» – 2009), применяется дифференциальная токовая защита. Принцип действия современной дифференциальной защиты шин (ДЗШ) изложен в литературе [1, 2].

При работе ДЗШ в случае обрыва или шунтирования фазы вторичной цепи трансформаторов тока (ТТ) одного из присоединений ток поврежденной фазы не поступает в защиту, в результате чего защита может неправильно сработать и отключить всю подстанцию. Следовательно, для правильной работы ДЗШ необходимо предусматривать устройство контроля исправности цепей переменного тока.

В качестве способов для предупреждения неправильной работы ДЗШ при неисправности ТТ применяются: отстройка от тока нагрузки наиболее загруженного присоединения, контроль дифференциального тока, реагирующий на ток небаланса, учет геометрической суммы токов фаз и нулевого провода ТТ. Данные решения не всегда могут достаточно быстро определить неисправность ТТ, при этом снижают чувствительность и селективность защиты.

Предлагаемая защита шин 110–220 кВ исключает указанные недостатки. Она основана на применении дифференциального принципа в сочетании с методом двойной записи [3, 4]. Для поиска места повреждения защита производит сравнение токов для отдельных участков, получая информацию от ТТ, установленных в различных точках, и выявляет потенциально поврежденный элемент. Далее защита определяет, вызвано ли срабатывание пускового органа коротким замыканием на рассматриваемом участке, либо имеет место неисправность ТТ. Неисправности выявляются с помощью метода двойной записи. Двойная запись – способ регистрации хозяйственных операций бухгалтерского учета, при котором каждое изменение состояния средств фиксируется на двух счетах, обеспечивая общий баланс [5, 6]. С помощью организации избыточной обработки информации о токах, измеренных на концах защищаемых объектов и сформированных в специальные матрицы, реализуется надежное функционирование дифференциальной защиты, исключая ее излишние действия при повреждениях ТТ.

При обнаружении КЗ и отсутствии неисправности происходит отключение поврежденного участка. При обнаружении неисправности ТТ выдается сигнал о ее возникновении.

Реализация защиты

Для описания принципа выполнения защиты рассмотрим распределительное устройство 110 кВ, выполненное по схеме 110–13 «две рабочие системы шин» (Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кв. Типовые решения. СТО 56947007-29.240.30.010-2008 ОАО «ФСК ЕЭС», 2007). Каждое из присоединений может быть подключено разъединителями как к первой, так и ко второй системе шин. Однолинейная схема с указанием мест установки ТТ, а также токов, протекающих в ветвях с предположительным направлением, показана на рис. 1.

Для схемы (рис. 1) построим однонаправленный граф (рис. 2) с вершинами и дугами [7; 8], где вершинами $V1–V10$ графа представляются шины, точки присоединения, а дугами $e_1–e_{13}$ – ветви трансформаторов тока и выключателей, ветви разъединителей. Дуги, характеризующие ветви трансформаторов тока и выключателей, отображают факты коммутации и имеют вес, представляющий собой информацию о величине протекающего по ветви тока. Дуги, представляющие разъединители, не имеют веса и отображают факты коммутации.

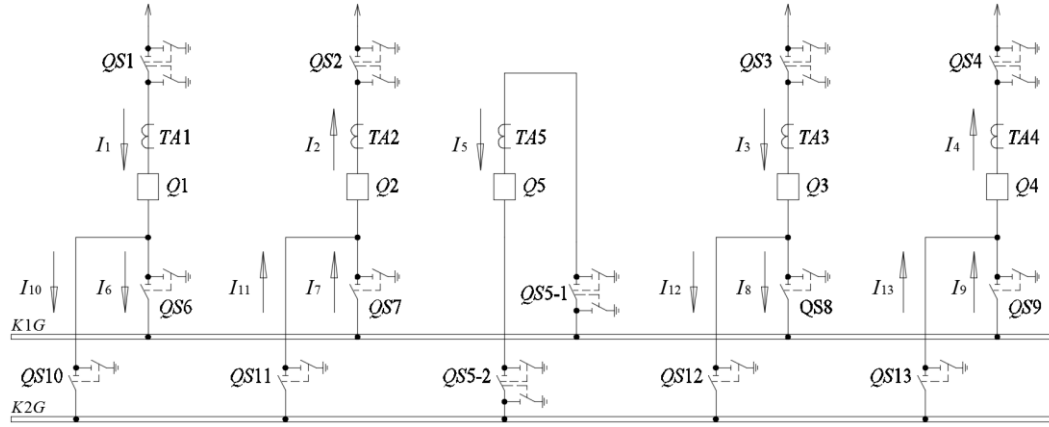


Рис. 1. Схема распределительного устройства 110 кВ.

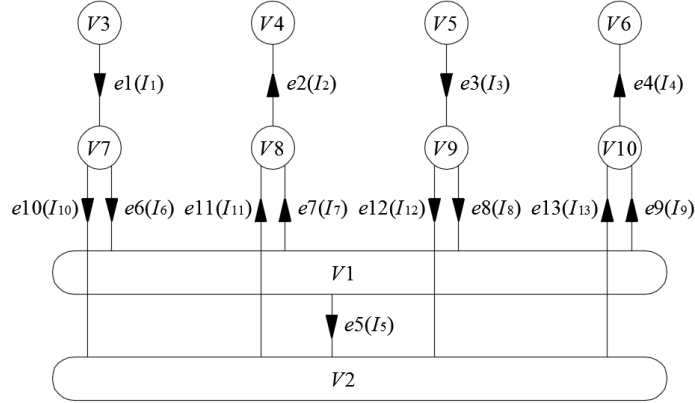


Рис. 2. Однонаправленный граф для распределительного устройства 110 кВ

Зададимся матричным представлением графа [9, 10]. Каждую вершину V_k (где k – номер вершины) графа будем представлять специальной матрицей $MV_k = \|mvk_{i,j}\|$ размером $p \times 2$, где p – число вершин графа. Количество строк матрицы соответствует числу вершин графа, а в столбцы вносится информация о дугах, смежных данной вершине, как направленных к ней, так и исходящих из нее. В первый (левый) столбец вносится информация о весах дуг, направленных к рассматриваемой вершине, а во второй (правый) – направленных от нее.

Элементы матрицы $mvk_{i,j}$, составленной для вершины V_k , определяются следующим образом:

$$mvk_{ij} = \begin{cases} I_q, & \text{если вершины } V_k \text{ и } V_i \text{ смежные и дуга } e_q, \text{ весом } I_q, \\ & \text{направлена от } V_i \text{ к } V_k \text{ для } j = 1 \\ I_q, & \text{если вершины } V_k \text{ и } V_i \text{ смежные и дуга } e_q, \text{ весом } I_q, \\ & \text{направлена от } V_k \text{ к } V_i \text{ для } j = 2 \\ 0, & \text{если вершины } V_k \text{ и } V_i \text{ не смежные.} \end{cases} \quad (1)$$

Для схемы (рис. 1) и соответствующего графа (рис. 2) имеем следующие матрицы токов:

$$\begin{aligned}
 MV1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_5 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_6 & 0 \\ 0 & I_7 \\ I_8 & 0 \\ 0 & I_9 \end{bmatrix} & MV2 &= \begin{bmatrix} I_5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_{10} & 0 \\ 0 & I_{11} \\ I_{12} & 0 \\ 0 & I_{13} \end{bmatrix} & MV3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 MV5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_4 & 0 \end{bmatrix} & MV7 &= \begin{bmatrix} 0 & I_6 \\ 0 & I_{10} \\ I_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV8 &= \begin{bmatrix} I_7 & 0 \\ I_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 MV9 &= \begin{bmatrix} 0 & I_8 \\ 0 & I_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_3 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV10 &= \begin{bmatrix} I_9 & 0 \\ I_{13} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} .
 \end{aligned}$$

Применение двойной записи обеспечивает взаимосвязь между вершинами графа, что позволяет объединить их в единую систему. Каждая дуга графа отражается с одинаковым весом в матрицах токов дважды: как дуга, связанная с вершиной и направленная к ней, одной матрицы, и как дуга, связанная с вершиной и направленная от нее, другой матрицы. Возможность введения контрольных операций метода двойной записи заключается в том, что, записывая значение каждого веса дуги для разных матриц дважды, можно осуществить проверку правильности данных о токах.

Для проверки правильности данных о токах составим матрицы входящих CI и исходящих CO токов. Матрица CI размерностью $p \times p$, где p – число вершин графа, формируется путем последовательного заполнения по столбцам из левых столбцов матриц токов, а CO – путем последовательного заполнения по столбцам из правых столбцов матриц токов:

$$CI = \sum_{k=1}^p (MV_k \times Ak), \quad (2)$$

$$CO = \sum_{k=1}^p (MV_k \times Bk), \quad (3)$$

где Ak – матрица размером $2 \times p$, служащая для преобразования матрицы MV_k в матрицу

размером $p \times p$, в которой $ak_{i,1} = 1$ при $i = k$, а остальные элементы равны нулю.

Bk – матрица размером $2 \times p$, служащая для преобразования матрицы MV_k в матрицу размером $p \times p$, в которой $bk_{2,j} = 1$ при $j=k$, а остальные элементы равны нулю.

Для рассматриваемого примера матрица входящих токов выглядит следующим образом:

$$CI = \begin{bmatrix} 0 & I_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_7 & 0 & I_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{11} & 0 & I_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_6 & I_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_8 & I_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

а матрица исходящих токов:

$$CO = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 & 0 & I_8 & 0 \\ I_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{10} & 0 & I_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_4 \\ 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_7 & I_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_9 & I_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Выражение для CO можно также получить путем транспонирования CI . Тогда в основе проверки правильности данных о токах будет лежать соблюдение равенства

$$CI^T - CO = 0, \quad (4)$$

где 0 – нулевая матрица, размером $p \times p$.

Следующим этапом является определение зоны действия защиты, исходя из топологии схемы с учетом положения разъединителей.

Зададим для рассматриваемого распределительного устройства (рис. 1) следующие положения разъединителей:

- QS1, QS2, QS3, QS4, QS5-1, QS5-2, QS6, QS7, QS12, QS13 – включены;
- QS8, QS9, QS10, QS11 – отключены.

Отключенное положение разъединителя, с точки зрения теории графов, характеризуется удалением соответствующей дуги. Для рассматриваемой схемы удаляются дуги e_{10} , e_{11} , e_8 , e_9 .

Включенное положение разъединителя, с точки зрения теории графов, характеризуется объединением вершин, инцидентных дуге, соответствующей разъединителю, выполняемым путем удаления соответствующей дуги и формирования единой вершины.

В результате возможен переход к новой форме графа (рис. 3) путем исключения дуг e_6 - e_{13} и объединения вершин V_1 , V_7 , V_8 (V_1^*) и V_2 , V_9 , V_{10} (V_2^*).

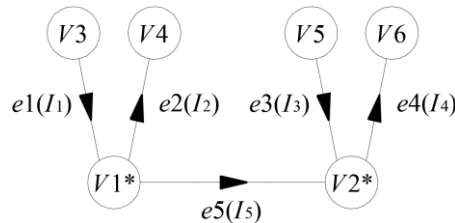


Рис. 3. Итоговый граф

С точки зрения матричных операций, при положении разъединителя «отключено», в матрице MV_k , имеющей в своем составе соответствующую дугу, присваивается значение равное «0» на соответствующей позиции. При положении разъединителя «включено» матрицы, имеющие в своем составе данную дугу, суммируются, а дуге присваивается значение равное «0» на соответствующей позиции.

Таким образом, получаем:

$$I_6 = I_7 = I_8 = I_9 = I_{10} = I_{11} = I_{12} = I_{13} = 0, \quad (5)$$

$$MV1^* = MV1 + MV7 + MV8, \quad (6)$$

$$MV2^* = MV2 + MV9 + MV10, \quad (7)$$

Матрицы $MV1^*$ и $MV2^*$ отражают зоны релейной защиты. Для рассматриваемого распределительного устройства и соответствующего графа (рис. 3) с принятыми положениями разъединителей, матрицы токов принимают вид:

$$\begin{aligned} MV1^* &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_5 \\ I_1 & 0 \\ 0 & I_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV2^* &= \begin{bmatrix} I_5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_3 & 0 \\ 0 & I_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV3 &= \begin{bmatrix} 0 & I_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \\ MV4 &= \begin{bmatrix} I_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I_4 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Определение поврежденной системы шин реализуется следующим образом.

Защитой производится сравнение токов по дифференциальному принципу для каждой зоны защиты. Защищаемые элементы представляются вершинами графа и описываются матрицами токов MV_k . В соответствии с дифференциальным принципом при отсутствии повреждения сумма токов, входящих и исходящих из узла, равна нулю. Сумма токов, не равная нулю, свидетельствует о наличии КЗ. Утверждение справедливо для всех вершин графа со степенью > 1 , представляющих зоны защиты. Применительно к рассматриваемой схеме такими вершинами являются $V1^*$ и $V2^*$.

Для проверки наличия тока короткого замыкания для всех вершин графа, представляющих шины распределительного устройства, составляются уравнения для суммы токов SMV_k в узле (вершине) V_k :

$$SMV_k = C \times MV_k \times D = 0, \quad (8)$$

где $C = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$ – матрица-вектор размером $1 \times p$, служащая для суммирования токов в различных узлах;

$D = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$ – матрица - вектор размером 2×1 , служащая для итогового суммирования в узле.

В развернутой форме выражение (8) принимает вид:

$$[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \times MV_k \times \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = 0. \quad (9)$$

Например, для вершины $V1^*$ графа (рис. 3) сумма токов в узле составляет:

$$SMV1^* = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \times \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_5 \\ I_1 & 0 \\ 0 & I_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = I_1 - I_2 - I_5.$$

Условиями наличия КЗ в соответствующей зоне действия защиты будут:

– на первой системе шин, соответствующей вершине графа $V1^*$,

$$SMV1^* = I_1 - I_2 - I_5 \neq 0; \quad (10)$$

– на второй системе шин, соответствующей вершине графа $V2^*$,

$$SMV2^* = I_3 + I_5 - I_4 \neq 0. \quad (11)$$

В качестве критерия проверки исправности трансформаторов тока применяется следующее соображение. Поскольку каждая дуга графа отражается с одинаковым весом (значением тока) в матрицах вершин дважды – как дуга, связанная с вершиной и направленная к ней одной матрицы, и как дуга, связанная с вершиной и направленная от нее другой матрицы, – то при неисправности сумма входящих и исходящих токов в двух матрицах нарушается, но суммарный дифференциальный ток всей сети остается равным нулю. При наличии КЗ и сохранении суммы токов для всей сети равной нулю определяется неисправность трансформаторов тока.

Запишем данное утверждение в матричной форме для вершин, представляющих собой защищаемые элементы сети.

Составим матрицу – вектор S , размером $n \times 1$, где n – число вершин графа со степенью > 1 . Строки матрицы представляют собой сумму токов в узлах защищаемых элементов сети SMV_k , то есть $S_{i,1} = SMV_k$ при степени вершины $V_k > 1$.

Применительно к рассматриваемой схеме

$$S = \begin{bmatrix} SMV1^* \\ SMV2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 - I_2 - I_5 \\ I_3 + I_5 - I_4 \end{bmatrix}.$$

При неверных показаниях ТТ, вызванных неисправностью ТТ, сумма токов SMV_k становится не равной нулю.

Для получения итогов матрицы SUM необходимо матрицу S умножить слева на единичный вектор-столбец E – матрица-вектор размером $1 \times n$ (где n – число вершин графа, степени > 1), все элементы которого единицы, служащая для суммирования токов в различных узлах:

$$SUM = E \times S. \quad (12)$$

Применительно к рассматриваемой схеме:

$$SUM = E \times S = [1 \ 1] \times \begin{bmatrix} SMV1^* \\ SMV2^* \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$SUM = [1 \ 1] \times \begin{bmatrix} I_1 - I_2 - I_5 \\ I_3 + I_5 - I_4 \end{bmatrix} = I_1 - I_2 - I_5 + I_3 + I_5 - I_4 = I_1 - I_2 + I_3 - I_4.$$

Признаки функционирования дифференциальной защиты шин при различных соотношениях токов и результатах выполнения матричных операций по выражениям (8) и (13) сведены в таблицу 1.

Таблица

Результаты матричных операций и признаки функционирования защиты

Резльтирующее значение матричной операции			Признаки функционирования дифференциальной защиты
$SMV1^*$	$SMV2^*$	SUM	
0	0	0	Ток КЗ отсутствует, ТТ исправны.
$\neq 0$	0	$\neq 0$	Ток КЗ на элементе, соответствующем вершине $V1^*$ (повреждение на системе шин $K1G$).
0	$\neq 0$	$\neq 0$	Ток КЗ на элементе, соответствующем вершине $V2^*$ (повреждение на системе шин $K2G$).
$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	Ток КЗ на элементе, соответствующем дуге e_5 графа - КЗ на перемычке между системами шин $K1G$ и $K2G$.
$\neq 0$	$\neq 0$	0	Неисправен трансформатор тока $TA5$ (дуга e_5 графа).
$\neq 0$	0	0	Неисправен ТТ, общий для $V1^*$ и $V3$ или $V4$ (дуга e_1 или e_2 графа).
0	$\neq 0$	0	Неисправен ТТ, общий для $V2^*$ и $V5$ или $V6$ (дуга e_3 или e_4 графа).

Выявление повреждения трансформатора тока отдельного присоединения можно осуществить путем дополнительной технической диагностики или автоматически путем формирования результирующих токов, характеризующих их исправность. Например, путем введения дополнительных условий к указанным в табл. 1, представленных добавочными матрицами токов.

В частности, для рассматриваемой схемы примем, что фидер выключателя $Q2$ представляет собой присоединение силового двухобмоточного трансформатора, с ТТ $TA7$ обмотки низшего напряжения, фиксирующим ток I_{14} . Трансформатор представляется дополнительной матрицей токов $MV11$. Соответственно, при изменении структуры схемы, изменится размерность матриц с 10×2 на 11×2 , а также описание матрицы $MV4$, степень которой станет равной 2.

Матрицы вершин $MV4$ и $MV11$ примут вид:

$$MV4 = \begin{bmatrix} I_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_{14} \end{bmatrix} \quad MV11 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_{14} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица SUM по выражению (14):

$$SUM = [1 \quad 1 \quad 1] \times \begin{bmatrix} I_1 - I_2 - I_5 \\ I_3 + I_5 - I_4 \\ I_2 - I_{14} \end{bmatrix} = \\ = I_1 - I_2 - I_5 + I_3 + I_5 + I_2 - I_{14} - I_4 = I_1 - I_{14} + I_3 - I_4.$$

Соответственно, при $SMV1^* \neq 0$, $SMV2^* = 0$, $SMV4 \neq 0$, $SUM = 0$ можно говорить о неисправности $TA2$ (дуга e_2 графа), а $SMV1^* \neq 0$, $SMV2^* = 0$, $SMV4 = 0$, $SUM = 0$ свидетельствует о неисправности $TA1$ (дуга e_1 графа).

Таким образом, в зависимости от соотношения токов на схеме распределительного устройства, а также результатов выполнения операций над матрицами можно реализовать надежное функционирование дифференциальной защиты шин 110–220 кВ. При этом обеспечивается не только действие защиты при повреждениях на каждом участке, но и исключаются ее излишние срабатывания при повреждениях трансформаторов тока.

Выводы

Разработаны основные принципы работы дифференциальной защиты шин 110–220 кВ с применением метода двойной записи. Реализация предлагаемого способа позволит повысить надежность и эффективность релейной защиты сетей 110–220 кВ.

Благодаря применению дифференциального принципа и метода двойной записи предлагаемая защита имеет высокую гибкость при изменении конфигурации рассматриваемой сети, а также надежную систему проверки исправности трансформаторов тока.

Разработанный принцип в перспективе может быть также применен для других видов защит, например дифференциальной токовой защиты шин (ошиновок) 330–750 кВ.

Литература

1. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты, принципы и применение. М.: Энергоиздат, 2005. 273 с.
2. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
3. Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Колесников А.А. Централизованная дифференциальная защита распределительных сельских сетей 6–35 кВ с применением метода двойной записи // Вестник НГИЭИ. 2017. № 2 (69). С. 71–81.
4. Вуколов В.Ю., Колесников А.А., Куликов А.Л. Применение метода двойной записи в дифференциальной защите распределительных сетей 6–35 кВ // Материалы двенадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017». ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», Иваново, 2017. Т. 3. С. 113–114.
5. Бачуринская И.Н., Горячих С.П. Элементы метода бухгалтерского учета // Вектор экономики. 2016. № 4.
6. Азиева З.И., Еремина Н.В., Абальмаз В.В., Сюсюра К.С. Возникновение двойной записи в бухгалтерском учете // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 14 (2016). № 2. С. 45–51.
7. Bondy A., Murty U.S.R. Graph Theory. Springer-Verlag London, 2008. Т. 244. (Graduate Texts in Mathematics). DOI:10.1007/978-1-84628-970-5. XII, 655
8. Diestel, R. Graph Theory. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017. Т. 173. (Graduate Texts in Mathematics). DOI: 10.1007/978-3-662-53622-3. XVIII, 428 p.
9. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. 5-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 560 с.

10. Андерсон Дж. А. Дискретная математика и комбинаторика. М.: Вильямс, 2004. 960 с.

Авторы публикации

Куликов Александр Леонидович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева. E-mail: inventor61@mail.ru.

Вуколов Владимир Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева. E-mail: vvucolov@mail.ru.

Колесников Антон Александрович – инженер отдела РЗА и вторичной коммутации филиала «Энергосетьпроект - НН - СЭЦ» г. Нижний Новгород, ЗАО «ГК «Электрощит» -- ТМ Самара». E-mail: anton8094@mail.ru.

Шарыгин Михаил Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева. E-mail: sharygin.m.v@gmail.com.

References

1. Tsigler G. Tsifrovyye ustroystva differentsial'noi zashchity, printsipy i primeneniye. M.: Energoizdat, 2005. 273 p.
2. Shneerson E.M. Tsifrovaya releinaya zashchita. M.: Energoatomizdat, 2007. 549 p
3. Kulikov A.L., Vukolov V.Yu., Kolesnikov A.A. Tsentralizovannaya differentsial'naya zashchita raspredelitel'nykh sel'skikh setei 6–35 kV s primeneniem metoda dvoynoi zapisi // Vestnik NGIEI. 2017. No. 2 (69). P. 71–81.
4. Vukolov V.Yu., Kolesnikov A.A., Kulikov A.L. Primeneniye metoda dvoynoi zapisi v differentsial'noi zashchite raspredelitel'nykh setei 6–35 kV // Materialy dvenadtsatoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Energiya-2017». FGBOU VPO «Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet im. V.I. Lenina», Ivanovo, 2017. Vol. 3. P. 113–114.
5. Bachurinskaya I.N., Goryachikh S.P. Elementy metoda bukhgalterskogo ucheta // Vektor ekonomiki. 2016. No. 4.
6. Azieva Z.I., Eremina N.V., Abal'maz V.V., Syusyura K.S. Vozniknoveniye dvoynoi zapisi v bukhgalterskom uchete // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 14 (2016). No. 2. P. 45–51.
7. Bondy A., Murty U.S.R. Graph Theory. Springer-Verlag London, 2008. Vol. 244. (Graduate Texts in Mathematics). DOI:10.1007/978-1-84628-970-5. XII, 655.
8. Diestel, R. Graph Theory. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017. T. 173. (Graduate Texts in Mathematics). DOI: 10.1007/978-3-662-53622-3. XVIII, 428 p.
9. Gantmakher F. R. Teoriya matrits. 5-e izd. M.: FIZMATLIT, 2004. 560 p.
10. Anderson Dzh. A. Diskretnaya matematika i kombinatorika. M.: Vil'yams, 2004. 960 p.

Authors of the publication

Kulikov Alexander Leonidovich – Dr. Sci. (Techn.), Prof. of the chair «Power Engineering, electricity supply and power electronics» Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU).

Vukolov Vladimir YU'evich – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of the chair «Power Engineering, electricity supply and power electronics» Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU).

© *А.Л. Куликов, В.Ю. Вуколов, А.А. Колесников, М.В. Шарыгин*

Kolesnikov Anton Aleksandrovich – engineer of the dep. «RPA», Branch office «Energosetproekt-NN-SESH», CJSC «Group Of Companies «Electroshield – TM Samara».

Sharygin Mikhail Valerievich – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of the chair «Power Engineering, electricity supply and power electronics» Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU).

Поступила в редакцию

16 июня 2017 г.