

Защита короткой сети руднотермических печей

НОВОЖИЛОВ Т.А.

ОмГТУ, Омск, Россия

НОВОЖИЛОВ А.Н., РАХИМБЕРДИНОВА Д.М.

ПТУ, Павлодар, Республика Казахстан

Защита от замыканий между трубошинами в коротких сетях руднотермических печей обеспечивается с помощью электрической изоляции. Разрушение изоляции приводит к возникновению дуги, а затем к полному разрушению дорогостоящего шинного пакета. Обрывы в элементах короткой сети вызывают перегрев неповрежденных элементов. В настоящее время аварийные режимы работы короткой сети определяют по косвенным признакам, так как использовать для этих целей токовую защиту нельзя из-за существующих ограничений по количеству трансформаторов тока и месту для их размещения. Авторами разработана токовая защита коротких сетей руднотермических печей от электрических повреждений на одном магнитном трансформаторе тока. Предлагаемая защита проста по конструкции, способна диагностировать обрывы элементов короткой сети и защитить их от замыканий. Место расположения магнитного трансформатора тока относительно шинного пакета определяется на основе моделирования магнитного поля. В статье рассмотрен метод определения составляющих магнитного поля пакета трубошин, позволяющий с погрешностью не более 10% моделировать их в эксплуатационных и аварийных режимах работы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: релейная защита, короткая сеть, магнитное поле, пакет трубошин

Короткая сеть является одним из наиболее важных элементов руднотермических печей и служит для передачи электрической энергии от печного трансформатора к электродам печи. Конструкция короткой сети сложна. Обычно она состоит из неподвижных элементов в виде шинного пакета и подвижных элементов в виде компенсатора, гибких связей, системы башмаков и контактных щек [1–6].

Рабочие токи в короткой сети достигают значений 35–150 кА, поэтому вторичную обмотку печного трансформатора выполняют расщепленной, а число пар трубошин в шинном пакете, проводников компенсатора и гибких связей короткой сети принимают равным числу этих расщеплений. Основными электрическими повреждениями в короткой сети являются обрывы в цепях этих расщеплений и замыкания между ними [3].

В настоящее время защита от замыканий между цепями расщеплений обеспечивается с помощью их изоляции [1–3]. Однако короткая сеть работает в условиях высоких температур и при наличии в воздухе большого количества угольной пыли и абразивных продуктов горения печи. Под воздействием окружающей среды в процессе эксплуатации происходит интенсивное разрушение изоляции. За счет проводящих мостиков из угольной пыли между трубошинами может произойти замыкание в паре трубошин и возникнуть электрическая дуга, которая при рабочих токах печи за доли секунды способна инициировать полное разрушение дорогостоящего шинного пакета. Поэтому своевременное обнаружение и отключение повреждения та-

кого вида позволят значительно сократить его размеры и стоимость ремонта.

Гибкие связи выполняются из медных лент или кабелей. Они служат для соединения неподвижного шинного пакета с подвижными башмаками [1, 2]. При возникновении обрыва одной из гибких связей ток в ее расщеплении становится равным нулю. При этом ток в остальных расщеплениях при сохранении передаваемой мощности возрастет, что приведет к их перегреву. При этом прямая сигнализация о появлении обрыва расщепления отсутствует. На практике диагностирование такого обрыва определяют по различным косвенным признакам.

Так как шинный пакет выполнен из нескольких пар трубошин [1, 2], то использовать токовую защиту на трансформаторах тока (ТТ) от коротких замыканий и обрывов в цепях расщеплений короткой сети практически нельзя из-за существующих ограничений по числу ТТ и месту для их установки [7–10]. В наибольшей степени для этих целей подходят токовые защиты на магнитных трансформаторах тока (МТТ) [8, 11–14]. Основным при реализации токовых защит на МТТ является определение места положения МТТ относительно шинного пакета, которое зависит как от числа трубошин и их размещения в шинном пакете, так и от числа используемых МТТ. Для решения этой проблемы определяют токи в расщеплениях в эксплуатационных и аварийных режимах работы. Затем по токам в трубошинах и их пространственному расположению в шинном пакете моделируют его магнитное поле и определяют место расположения МТТ.

Пример расположения трубошин в пакете при четырех расщеплениях во вторичной обмотке печного трансформатора и распределение токов в них в эксплуатационных режимах работы приведены на рис.1,а. Такое расположение трубошин с током в пакете применяют с целью уменьшения его магнитного поля и снижения потерь электроэнергии.

Моделирование токов в трубошинах однофазного печного трансформатора с четырьмя расщеплениями в эксплуатационных и аварийных режимах работы осуществляется с помощью схемы на рис. 1,б и математической модели, приведенной в [15]. На этой схеме обрыв гибких связей расщепления имитируется замыканием контакта K_1 , а замыкание в этом расщеплении – замыканием контакта K_2 .

На схеме (рис 1,б) приняты следующие обозначения: \dot{U}_1 – комплексное напряжение на первичной обмотке; \dot{I}_i – комплексные значения токов в обмотках; $Z_1 = R_1 + jX_1$ – полное, активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки; $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ и $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ – полное, активное и индуктивное сопротивления шинного пакета короткой сети и нагрузки неповрежденных расщеплений; $Z'_{5л} = R'_{5л} + jX'_{5л}$ и $Z''_{5л} = R''_{5л} + jX''_{5л}$ – полное сопротивление участков шинного пакета от трансформатора до точки замыкания и от точки замыкания до стержней поврежденного расщепления; R_d – сопротивление дуги. При этом для неповрежденных расщеплений вторичной обмотки i принимается равным 2–4, а для определения сопротивления расщеплений короткой сети используется методика, описанная в [11].

В соответствии со схемой (рис.1) в нормальном режиме работы короткой сети токи $I_2 - I_5$ в расщеплениях вторичной обмотки и присоединяемых к ним трубошинах равны и не превышают их номинального значения.

При обрыве цепи, например четвертого расщепления, ток в нем становится равным нулю. При сохранении передаваемой электрической мощности ток в цепи неповрежденных расщеплений должен возрасти на треть [15], что сопровождается перегревом всех элементов этих расщеплений.

Возникновение замыкания, например в цепи четвертого расщепления, сопровождается значительным увеличением тока в его частях и возникновением дуги в точке замыкания. Затем дуга достаточно быстро распространяется на остальные трубошины, что приводит к их расплавлению, а затем и к полному выходу из строя одной из фаз короткой сети.

Моделирование распределения магнитного поля пакета из N трубошин осуществляется по расчетной схеме, приведенной на рис.2,а. Если допустить, что n -я трубошина имеет бесконечную длину, ее диаметр стремится к нулю, а ток в ней равен $I_{эн}$, то в соответствии с законом Био–Савара–Лапласа составляющие ее магнитного поля можно определить как

$$B_{xA_n} = \frac{\mu_0 I_{эн}}{2\pi r_{эн}} \frac{|y_A - y_{эн}|}{r_{эн}} \quad \text{и} \quad B_{yA_n} = \frac{\mu_0 I_{эн}}{2\pi r_{эн}} \frac{|x_A - x_{эн}|}{r_{эн}}, \quad (1)$$

где x_A и y_A – координаты точки A ; $x_{эн}$ и $y_{эн}$ – координаты точки n -й трубошины; $r_{эн} = \sqrt{(y_A - y_{эн})^2 + (x_A - x_{эн})^2}$ – расстояние между n -й трубошиной и точкой A , в которой определяются эти составляющие.

При этом магнитное поле пакета трубошин определяется как

$$B_x = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_0 I_{эн}}{2\pi r_{эн}} \frac{|y_A - y_{эн}|}{r_{эн}} \quad \text{и} \quad B_y = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_0 I_{эн}}{2\pi r_{эн}} \frac{|x_A - x_{эн}|}{r_{эн}}, \quad (2)$$

Верификация предлагаемой математической модели осуществлялась путем сопоставления результатов расчета и эксперимента. Эксперименты проводились на короткой сети печного трансформатора марки ЭОЦНК 16000/10-К с семнадцатью ступенями регулирования. В качестве главного и вольтодобавочного трансформаторов использовались трансформаторы ЭОТЦ 10100/10 и ЭОЦ 5700/10. В шинном пакете величины $b_1 = b_2 = 0,08$ м, диаметр d_3 трубошины и ток I_3 в ней соответственно равны 0,06 м и 3750 А.

Результаты расчета распределения составляющих магнитного поля пакета трубошин вдоль оси Y при ко-

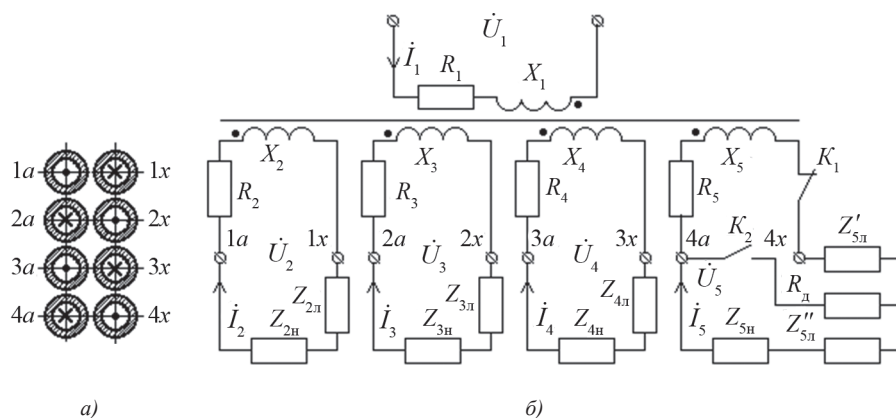


Рис. 1. Схема однофазного трансформатора при электрических повреждениях в цепи четвертого расщепления

Fig. 1. Diagram of a single-phase transformer in case of electrical damage in the fourth split circuit

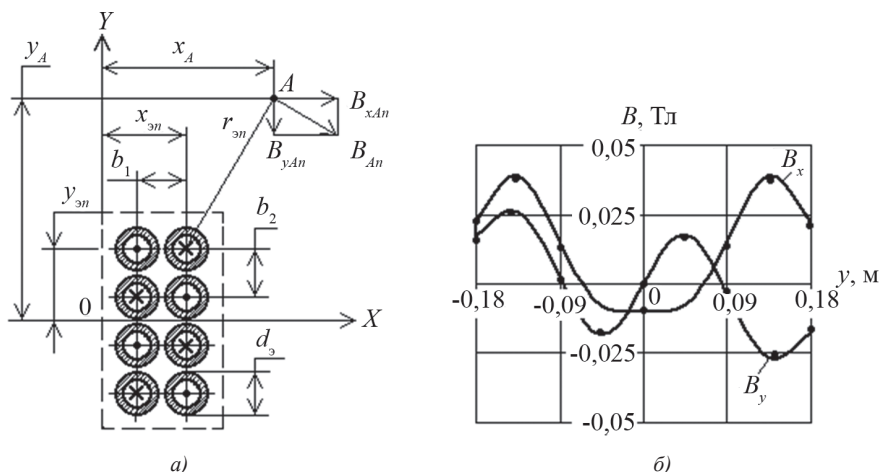


Рис. 2. Расчетная схема для моделирования магнитного поля пакета трубошин, а также результаты расчета и эксперимента его составляющих
Fig. 2. Calculation scheme for modeling the magnetic field of the bus tube package, as well as the results of the calculation and experiment of its components

ординате $x_A = 0,21$ м на первой ступени регулирования в нормальном режиме приведены на рис. 2,б. Результаты эксперимента показаны точками. Таким образом, погрешность моделирования не превышает 10%.

Из рис. 2,б также видно, что зависимость $B_x = f(y)$ симметрична относительно оси X , а зависимость $B_y = f(y)$ при координате $y = 0$ равна нулю.

Результаты расчета распределения составляющих магнитного поля пакета трубошин вдоль оси Y при обрыве гибкой связи и замыкании в цепи четвертого расщепления приведены на рис. 3,а и б соответственно. Есть все основания полагать, что и в этом случае погрешность моделирования не превысит 10%.

Из рис. 3,а и б следует, что зависимости $B_x = f(y)$ при таких повреждениях становятся несимметричными относительно оси X . В то же время зависимость при координате $y = 0$ в этих режимах отличается от нуля.

Эти особенности распределения составляющих индукции магнитного поля могут быть использованы

для диагностики и построения защиты шинного пакета короткой сети от электрических повреждений. Следовательно, защита короткой сети может обеспечиваться путем измерения разности составляющей $B_x = f(y)$ в области расположения верхней и нижней трубошин или измерением составляющей $B_y = f(y)$ в точке с координатой $y = 0$. В первом случае для реализации защиты потребуется два МТТ, а во втором – один.

Более проста защита шинного пакета от обрывов гибких связей и замыканий в цепях расщеплений на одном МТТ. На рис. 4,а приведены расположение МТТ возле шинного пакета и его конструкция, где 1 – обмотка МТТ; 2 – изолирующий корпус [16]. При реализации защиты используют схемы по переменному и постоянному оперативному току (рис. 4,б и в).

Если МТТ и шинный пакет изготовлены и установлены идеально, то при таком их взаимном расположении ЭДС, индуцируемая в обмотке МТТ, будет равна нулю. Однако на практике это не так, поэтому в обмотке МТТ будет индуцироваться ЭДС небалан-

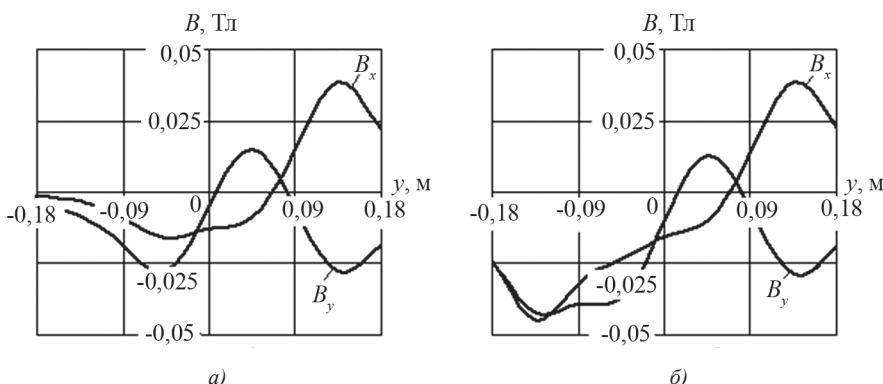


Рис. 3. Результаты моделирования составляющих магнитного поля пакета трубошин при обрыве гибкой связи и замыкании в цепи четвертого расщепления

Fig. 3. Results of modeling the components of the magnetic field of a bus tube package in the event of a break in the flexible coupling and a short circuit in the fourth splitting circuit

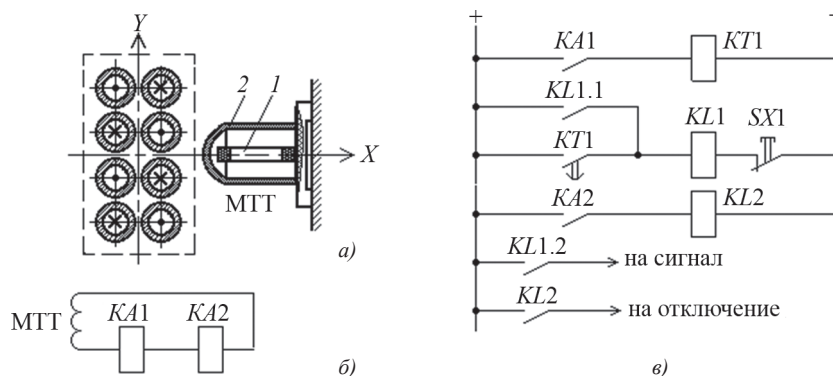


Рис. 4. Расположение МТТ и схема защиты короткой сети

Fig. 4. Magnetic current transformer location and short-circuit protection scheme

са $E_{нб}$. Следует добавить, что в качестве такой обмотки может использоваться катушка от промежуточного реле [17–19].

В соответствии со схемой защиты по переменному току на рис. 4,б соединенные последовательно токовые реле $KA1$ и $KA2$ подключаются к обмотке МТТ, поэтому протекающий по обмоткам этих реле ток небаланса:

$$\dot{I}_{нб} = \dot{E}_{нб} / (Z_{МТТ} + Z_{KA1} + Z_{KA2}), \quad (3)$$

где $Z_{МТТ}$ – полное сопротивление МТТ; Z_{KA1} и Z_{KA2} – полное сопротивление реле $KA1$ и $KA2$.

Пороги срабатывания этих реле различны. Токовое реле $KA1$ предназначено для выявления обрыва цепи одной из пар трубошин, т.е. оно не должно срабатывать в самом тяжелом нагрузочном режиме печи. Поэтому его порог срабатывания определяется как

$$I_{ср1} = I_{нбmax} k_{отс}, \quad (4)$$

где $I_{нбmax}$ – максимальное значение тока небаланса в нагрузочном режиме работы; $k_{отс}$ – коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,1–1,3.

От броска тока намагничивания в этом случае защита отстраивается задержкой сигнала по времени с помощью реле тока $KT1$ (рис. 4,в). Это вполне допустимо, так как задержка по времени не приводит к увеличению тяжести аварии.

Токовое реле $KA2$ предназначено для защиты от КЗ цепи одной из пар трубошин. Оно не должно срабатывать при обрыве цепи одной из пар трубошин и при броске тока намагничивания, поэтому его порог срабатывания выбирается как

$$I_{ср2} = I_{ср1} k_{отс} \text{ и } I_{ср2} = I_{бтн} k_{отс}, \quad (5)$$

где $I_{бтн}$ – бросок тока намагничивания. При отстройке защиты выбирается большее значение тока срабатывания.

Работает защита коротких сетей руднотермических печей от электрических повреждений следующим образом. При отсутствии повреждения в шинном пакете

короткой сети токи во всех трубопроводах равны и в соответствии с рис. 4,а ЭДС, индуцируемая в обмотке МТТ, создает в цепи реле $KA1$ и $KA2$ ток небаланса $I_{нб}$, значение которого будет меньше порога срабатывания этих реле. Поэтому на схеме (рис. 4,б) реле $KA1$ и $KA2$ будут находиться в исходном положении, а их контакты $KA1$ и $KA2$ разомкнуты. Промежуточные реле $KL1$ и $KL2$ также будут находиться в исходном положении, а их контакты разомкнуты. Поэтому сигналы о наличии повреждения в короткой сети будут отсутствовать.

При возникновении обрыва в цепи одной из пар трубошин шинного пакета (рис. 4,а и б) в обмотке МТТ появится ЭДС, а в цепи реле $KA1$ и $KA2$ – ток. Если значение тока превысит порог срабатывания реле тока $KA1$ в виде тока $I_{ср1}$, то реле сработает и подаст напряжение на реле времени $KT1$. Реле времени сработает, через время $t_{ср}$ его контакты замкнутся и вызовут срабатывание промежуточного реле $KL1$, которое через контакт $KL1.1$ станет на самоудержание, а через контакт $KL1.2$ сформирует сигнал о наличии обрыва в шинном пакете короткой сети. После устранения аварии устройство защиты возвращается в исходное положение нажатием на кнопку $SX1$.

При возникновении короткого замыкания в цепи в одной из пар трубошин шинного пакета (рис. 4, а) в обмотке МТТ появится ЭДС, а в цепи реле $KA1$ и $KA2$ – ток. Если значение тока превысит порог срабатывания реле тока $KA2$ в виде тока $I_{ср2}$, то сработают одновременно реле тока $KA1$ и $KA2$. Так как цепь контактов реле $KA1$ работает с выдержкой времени, а цепь реле тока $KA2$ срабатывает мгновенно, то контакты реле $KA2$ замкнутся и через промежуточное реле $KL2$ сформируют сигнал на отключение трансформатора от сети.

Таким образом, предлагаемое устройство защиты способно различать виды повреждения в короткой сети, а также своевременно информировать персонал о появлении обрывов в короткой сети и отключать трансформатор при появлении короткого замыкания в ней. Это позволяет значительно сократить как время, так и стоимость ремонта после аварии.

Выводы. Разработанный метод позволяет моделировать составляющие магнитного поля пакета трубошин в эксплуатационных и аварийных режимах работы с погрешностью, не превышающей 10%.

Определение количества МТТ и места их расположения относительно пакета трубошин для реализации токовой защиты коротких сетей руднотермических печей от электрических повреждений основано на анализе результатов моделирования составляющих магнитного поля пакета трубошин в этих режимах.

Разработанная токовая защита на одном МТТ коротких сетей руднотермических печей от электрических повреждений не нуждается в использовании трансформаторов тока, проста по конструкции, способна диагностировать обрывы элементов короткой сети и защитить их от замыканий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данцис Я.Б., Кацевич Л.С., Жилев Г.М., Митрофанов Н.Н., Розенберг В.Л., Черенкова И.М. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей. М.: Металлургия, 1987, 320 с.
2. Данцис Я.Б. Методы электротехнических расчетов руднотермических печей. Л.: Энергия, 1973, 184 с.
3. Смелянский М.Я., Бортничук Н.И. Короткие сети электрических печей. Л.: Госэнергоиздат, 1962, 94 с.
4. Богданов С.П. Расчет руднотермических печей: Метод. указания. СПб.: СПбГИ(ТУ), 2011, 38 с.
5. Рожихина И.Д., Нохрина О.И. Конструкции и проектирование дуговых печей: Учебное пос. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2011, 311 с.
6. Семчинов А.М. Токопроводы 6–10 кВ промышленных предприятий. Л.: Энергоиздат, 1981, 88 с.
7. Альтгаузен А.П., Бершицкий М.Д., Смелянский М.Я., Эдемский В.М. и др. Электрооборудование и автоматика электро-термических установок. М.: Энергия, 1980, 909с.
8. Засылкин А.С. Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989, 240 с.
9. Чернобровов Н.В. Релейная защита. Изд. 5-е. М.: Энергия, 1974, 680 с.
10. Ершов А.М. Релейная защита и автоматика в системах электроснабжения. Часть 4: Защита электрических сетей и электроустановок напряжением 6–10–110–220 кВ: Учебное пос. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015, 152 с.
11. Рахимбердинова Д.М., Новожилов А.Н., Новожилов Т.А. Анализ методов определения сопротивлений шинного пакета ко-

роткой сети руднотермической печи. – Материалы междунар. науч. конф. «XI Торайгыровские чтения», 2019, т. 4, с. 249–257.

12. Миронова А.Н. Анализ методов определения сопротивлений токоподводов дуговых сталеплавильных печей. – Вестник Чувашского университета, 2017, № 1, с. 137–144.

13. Алиферов А.И., Бикеев Р.А., Горева Л.П., Игнатенко А.Ю. Исследование электрических параметров шихтованных пакетов мощных электротехнологических установок. – Электротехника, электромеханика и электротехнологии. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014, с. 103–110.

14. Новожилов А.Н., Волгина Е.М., Новожилов Т.А., Волгин М.Е., Рахимбердинова Д.М. Метод моделирования магнитного поля шины с током. – Вестник ПГУ. Серия Энергетическая, 2020, №1, с. 319–326.

15. Новожилов А.Н., Новожилов Т.А., Рахимбердинова Д.М. Моделирование токов при электрических повреждениях в обмотках печного однофазного трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой. – Электротехника, 2020, №6, с. 58–63.

16. Волгина Е.М., Новожилов А.Н., Волгин М.Е. Устройство максимальной токовой защиты на магнитном трансформаторе тока с реле типа РЗТВ-1. – Научный обозреватель, 2020, №3(111), с. 33–37.

17. Какуюевский Л.И., Смирнова Т.В. Справочник реле защиты и автоматики. М.: Энергия, 1972, 344 с.

18. Алексеев В.С., Варганов Б.И., Панфилов Б.И., Розенблюм Р.З. Реле защиты. Л.: Энергия, 1976, 464 с.

19. Басс Э.И., Жданов Л.С. Катушки реле защиты и автоматики. М.: Энергия, 1974, 78с.

[16.11.2020]



Авторы: Новожилов Тимофей Александрович – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета.



Новожилов Александр Николаевич – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова.



Рахимбердинова Дилара Муратовна – докторант PhD кафедры «Электроэнергетика» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова.

Protection of the Short Network of Ore-Thermal Furnaces

NOVOZHILOV Timofey A. (Omsk State Technical University, Omsk, Russia) – Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Dept., Cand. Sci. (Eng.).

NOVOZHILOV Alexander N. (Pavlodar State University named after S. Toraiyrov, Pavlodar, the Republic of Kazakhstan) – Professor of the Electric Power Engineering Dept., Dr. Sci. (Eng.).

RAKHIMBERDINOVA Dilara M. (Pavlodar State University named after S. Toraiyrov, Pavlodar, the Republic of Kazakhstan) – PhD student of the Electric Power Engineering Dept.

Protection against short circuits between buses tubes in short networks of ore-thermal furnaces is provided by means of electrical insulation. Failure of the insulation leads to an arc, and then to the complete destruction of the expensive bus tube package. Disconnection fault in the elements of a short network cause overheating of undamaged elements. Currently, emergency modes of operation of a short network are determined with indirect signs. It is impossible to use current protection for this purpose because of the existing restrictions on the number of current transformers and the place for their placement. The authors developed a current protection of short networks of ore-thermal furnaces from electrical damage on a single magnetic current transformer. The proposed protection is simple in design, it is able to identify breaks in the elements of a short network and protect them from short circuits. The location of the magnetic current transformer relative to the bus tube package is determined based on the simulation of the magnetic field. The article describes a method for simulating the components of the magnetic field of a bus tube package, which allows us to model them in operational and emergency modes with an error of no more than 10%.

К е y о r d s: relay protection, short circuit, magnetic field, bus tube package

REFERENCES

1. **Dantsis Ya.B., Katsevich L.S., Zhilov G.M., Mitrofanov N.N., Rosenberg V.L., Cherenkova I.M.** *Korotkiye seti i elektricheskiye parametry dugovykh elektropechey* (Short networks and electrical parameters of electric arc furnaces). M.: Metallurgiya, 1987, 320 p.
2. **Dantsis Ya.B.** *Metody elektrotekhnicheskikh raschetov rudnotermicheskikh pechey* (Methods of ore-thermal furnaces electrical calculations). L.: Energiya, 1973, 184 p.
3. **Smelyansky M.Ya., Bortnichuk N.I.** *Korotkiye seti elektricheskikh pechey* (Short networks of electric furnaces). L.: Gosenergoizdat, 1962, 94 p.
4. **Bogdanov S.P.** *Raschet rudnotermicheskikh pechey: Metod. ukazaniya* (Calculation of ore-thermal furnaces: Guidelines). SPb.: SPbGTI(TU), 2011, 38 p.
5. **Rozhikhina I.D., Nokhrina O.I.** *Konstruktsii i proyektirovaniye dugovykh pechey: ychebnoye pos.* (Structures and design of arc furnaces: a tutorial). Novokuznetsk: Sibirskiy gosudarstvennyy industrial'nyy universitet, 2011, 311 p.
6. **Semchinov A.M.** *Tokoprovody 6–10 kV promyshlennykh predpriyatiy* (6–10 kV current distributors of industrial enterprises). L.: Energoizdat, 1981, 88 p.
7. **Altgauzen A.P., Bershitsky M.D., Smelyansky M.Ya., Edemsky V.M., etc.** *Elektrooborudovaniye i avtomatika elektrotermicheskikh ustanovok* (Electrical equipment and automation of electrothermal installations). M.: Energiya, 1980, 909 p.
8. **Zasyupkin A.S.** *Releynaya zashchita transformatorov* (Relay protection of transformers). M.: Energoatomizdat, 1989, 240 p.
9. **Chernobrovov N.V.** *Releynaya zashchita. Izd. 5-ye* (Relay protection. 5th Ed.) M.: Energiya, 1974, 680 p.
10. **Yershov A.M.** *Releynaya zashchita i avtomatika v sistemakh elektrosnabzheniya. Ch. 4: Zashchita elektricheskikh setey i elektro-*

ustanovok napryazheniyem 6–10–110–220 kV: uchebnoye pos. (Relay protection and automation in power supply systems. Part 4: Protection of electrical networks and electrical installations with a voltage of 6–10–110–220 kV: a tutorial). Chelyabinsk: Izdatel'skiy tsentr YuUrGU, 2015, 152 p.

11. **Rakhimberdinova D.M., Novozhilov A.N., Novozhilov T.A.** *Materialy mezhdunar. nauch. konf. «XI Toraygyrovskiy cheniya» – in Russ. (Proceedings of the international scientific conference «XI Toraygyrov Readings»)*, 2019, vol. 4, pp. 249–257.
12. **Mironova A.N.** *Vestnik Chuvashskogo universiteta – in Russ. (Bulletin of the Chuvash University)*, 2017, No. 1, pp. 137–144.
13. **Aliferov A.I., Bikeev R.A., Goreva L.P., Ignatenko A.Yu.** *Elektrotehnika, elektromekhanika i elektrotekhnologii – in Russ. (Electrical engineering, electromechanics and electrical technologies)*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2014, pp. 103–110.
14. **Novozhilov A.N., Volgina E.M., Novozhilov T.A., Volgin M.E., Rakhimberdinova D.M.** *Vestnik PGU. Energeticheskaya Seriya – in Russ. (Bulletin of PSU. Energy Series)*, 2020, No. 1, pp. 319–326.
15. **Novozhilov A.N., Novozhilov T.A., Rakhimberdinova D.M.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2020, No. 6, pp. 58–63.
16. **Volgina E.M., Novozhilov A.N., Volgin M.E.** *Nauchnyy obozrevatel' – in Russ. (Scientific reviewer)*, 2020, №3 (111), pp. 33–37.
17. **Kakuyevitsky L.I., Smirnova T.V.** *Spravochnik rele zashchity i avtomatiki* (Directory of protection and automation relays). M.: Energiya, 1972, 344p.
18. **Alekseev V.S., Varganov B.I., Panfilov B.I., Rosenblum R.Z.** *Rele zashchity* (Protection relay). L.: Energiya, 1976, 464c.
19. **Bass E.I., Zhdanov L.S.** *Katushki rele zashchity i avtomatiki* (Protection and automation relay coils). M.: Energiya, 1974, 78p.

[16.11.2020]