

УДК 621.316.925:51.001.57

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ШИН С ТОРМОЖЕНИЕМ ПДЭ-2006

Докт. техн. наук, проф. НОВАШ В. И.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Инж. АЛЕКСЕЕВ В. В.

*ОАО «Белгородэнерго»*

В энергосистемах России и СНГ для защиты шин и ошиновки распределительных устройств напряжением 500–750 кВ применяются дифференциальные защиты с торможением на выпрямленных токах. Время их действия при двукратном токе срабатывания с использованием выходных реле составляет не более 0,045 с, а при применении в цепях управления тиристоров – не более 0,03 с.

Для исследования поведения быстродействующей защиты в различных режимах работы шин целесообразно использовать комплексные математические модели, отражающие реальные взаимосвязи между мгновенными значениями отдельных величин электромагнитных переходных процессов в измерительных каскадных трансформаторах тока (КТТ), элементах защиты и их физическими параметрами [1]. Использование ЭВМ для реализации таких моделей позволяет выполнить их практически с учетом всех факторов, оказывающих детерминированное влияние на поведение защиты в различных режимах работы. В настоящей статье предложена комплексная математическая модель дифференциальной защиты шин с торможением типа ПДЭ-2006 [2].

Вторичный ток КТТ при помощи промежуточных трансформаторов тока (ПТТ) преобразуется в ток приемлемой величины ( $I_{\text{ном}} = 3 \text{ мА}$ ), гарантирующий надежную работу полупроводниковых элементов и интегральных микросхем, на базе которых выполнены органы защиты. Пусковыми органами (ПО) защиты являются дифференциальные токовые реле с торможением, которое осуществляется суммой токов всех присоединений. Такое выполнение облегчает отстройку ПО от максимальных токов небаланса при КЗ вне зоны действия защиты. ПО выполнены пофазными, что обеспечивает их одинаковую чувствительность при различных видах КЗ.

Вторичные обмотки КТТ, питающие дифференциальную защиту шин, соединяются в звезду с нулевым проводом. В переходных режимах работы КТТ падение напряжения в нулевом проводе существенно

влияет на форму кривой вторичных токов. Поэтому комплексная математическая модель защиты выполняется трехфазной с учетом сопротивления нулевого провода и включенных в него обмоток реле. Органы контроля (РК) исправности цепей переменного тока представляют собой быстродействующие реле тока, включенные на дифференциальные токи каждой из фаз. Пусковой орган содержит восемь выпрямительных полумостов, к которым подводятся вторичные токи ПТТ присоединений (до восьми присоединений). При тестировании защиты к девятому полумосту подается ток от устройства блока тестовой проверки.

Принципиальная схема защиты, принятая в качестве исходной для математического описания, составлена для восьми присоединений, пускового органа и токовых цепей органа контроля. Она содержит восемь трехфазных групп КТТ с соединением первичных обмоток ПТТ каждой группы в звезду. На рис. 1 представлена схема измерительной части пускового органа и цепи контроля токовых цепей защиты, где диодам присвоены обозначения их сопротивлений  $r_1 - r_{26}$ , которые используются в описании математической модели.

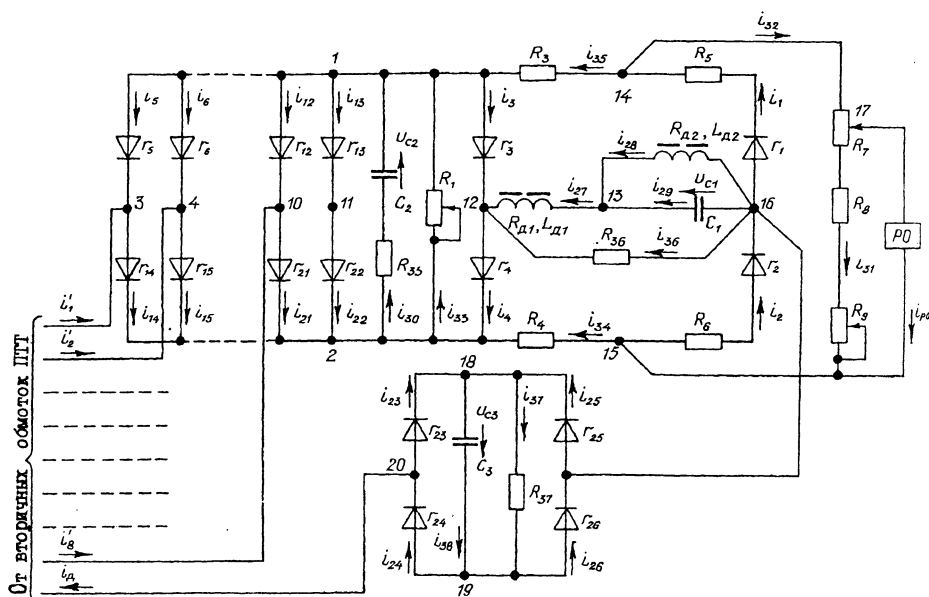


Рис. 1

Для обеспечения полноты и независимости уравнений равновесия ЭДС в электрических контурах схемы защиты используется важная топологическая характеристика электрической цепи — дерево электрической цепи [3]. На рис. 2 изображены граф и одно из возможных фундаментальных деревьев графа схемы рис. 1 с вторичными обмотками ПТТ (ветви фундаментального дерева показаны утолщенными линиями). Математическое описание КТТ выполнено в соответствии с [4]. Математическая модель измерительной части защиты содержит систему дифференциальных и алгебраических уравнений, составленных на основании законов Кирхгофа, связывающих мгновенные значения токов и напряжений в схеме рис. 1.

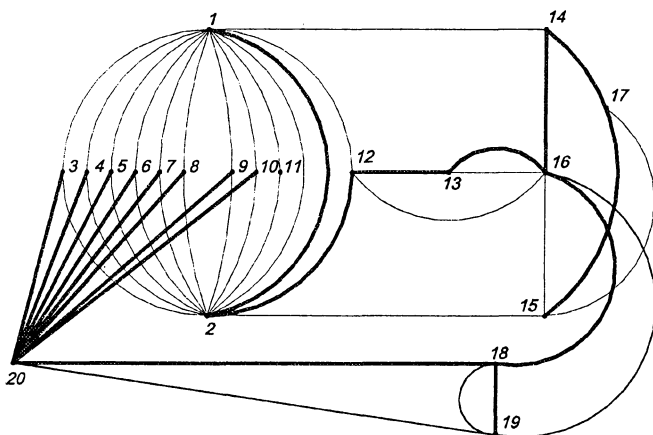


Рис. 2

Математическое описание ПТТ после приведения к форме, удобной для численного интегрирования, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} p y_{qj} = k_q (R_3 i'_{qj} + R_{37j} i_{37j} + M_{qj}); \\ y_{qj} = B_{qj} - k_q L_3 i'_{qj}; \\ i'_{qj} = \frac{1}{n_{\tau q}} i_{qj} - m_{\tau} H_{qj}, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$k_q = \frac{1}{w_4 s}; \quad n_{\tau q} = \frac{w_4}{w_{3q}}; \quad m_{\tau} = \frac{l}{w_4};$$

$i_{qj}, i'_{qj}$  — первичные и вторичные токи ПТТ;

$B_{qj}, H_{qj}$  — мгновенные значения индукций и напряженностей в магнитопроводах ПТТ;

$s, l$  — площадь поперечного сечения и длина средней силовой линии магнитопровода ПТТ;

$w_{3q}, w_4$  — числа витков первичной и вторичной обмоток ПТТ;

$L_3, R_3$  — суммарные индуктивность и активное сопротивление вторичной обмотки ПТТ;

$M_{qj}$  — падение напряжения по цепям с открытыми в данный момент диодами между узлами 3–10 и узлом 20 схемы рис. 1.

Математическая модель трех пусковых органов и трех реле контроля токовых цепей содержит систему дифференциальных и алгебраических уравнений, связывающих мгновенные значения токов и напряжений и конструктивные параметры схемы защиты. После приведения дифференциальных уравнений к нормальной форме имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} p i_{27j} = \frac{1}{L_{n1j}} (-u_{c1j} - R_{n1j} i_{27j} + M_{1j}); \\ p i_{28j} = \frac{1}{L_{n2j}} (u_{c1j} - R_{n2j} i_{28j}); \\ p u_{c1j} = \frac{1}{C_{1j}} i_{29j}; \\ p u_{c2j} = \frac{1}{C_{2j}} i_{30j}; \\ p u_{c3j} = \frac{1}{C_{3j}} i_{38j}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $M_{1j}$  — падение напряжения между узлами 12 и 16 схемы рис. 1, определяемое по цепи с открытыми в данный момент двумя соответствующими диодами из группы вентилей 1—4.

Исходная система состоит из 37 алгебраических уравнений. Так как матрица коэффициентов линейной части системы содержит значительное количество нулей, после понижения ее порядка путем исключения из системы ряда неизвестных получаем систему из 17 уравнений следующего вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} - (r_{3j} + r_{4j}) i_{4j} + [r_{(q+4)j} + r_{(q+13)j}] i_{qj} + r_{3j} i_{36j} = r_{(q+13)j} i_{qj} - r_{3j} i_{27j}; \\ - R_{3j} i_{1j} - (r_{3j} + r_{4j}) i_{4j} + R_{3789j} i_{32j} + R_{4j} i_{34j} + r_{3j} i_{36j} - R_{7289j} i_{poj} = \\ = - r_{3j} i_{27j}; \\ (R_{5j} + r_{1j}) i_{1j} + (R_{6j} + r_{2j} + R_{789j}) i_{32j} - (R_{6j} + r_{2j}) i_{34j} - \\ - R_{7289j} i_{poj} = 0; \\ i_{1j} - \left( \frac{r_{3j} + r_{4j}}{R_{35j}} + \frac{r_{3j} + r_{4j}}{R_{1j}} + 1 \right) i_{4j} - i_{5j} - i_{6j} - i_{7j} - i_{8j} - i_{9j} - i_{10j} - i_{11j} - i_{12j} - \\ - i_{13j} - i_{32j} + \left( \frac{r_{3j}}{R_{35j}} + \frac{r_{3j}}{R_{1j}} + 1 \right) i_{36j} = \frac{u_{c2j}}{R_{35j}} - \left( \frac{r_{3j}}{R_{35j}} + \frac{r_{3j}}{R_{1j}} + 1 \right) i_{27j}; \\ r_{4j} i_{4j} + (R_{6j} + r_{2j}) i_{32} - (R_{4j} + R_{6j} + r_{2j}) i_{34j} + R_{36j} i_{36j} = 0; \\ (r_{25j} + r_{26j}) i_{26j} + R_{37j} i_{37j} = r_{25j} i_{n j}; \\ - (r_{23j} + r_{24j}) i_{26j} + (r_{23j} + r_{24j} + R_{37j}) i_{37j} = - r_{23j} i_{n j}; \\ R_{7289j} i_{32j} - (R_{7289j} + R_{poj}) i_{poj} = 0; \\ - i_{1j} + i_{32j} - i_{34j} - i_{36j} = i_{27j} - i_{n j}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где

$$R_{7289j} = R_{72j} + R_{8j} + R_{9j}; \quad R_{789j} = R_{71j} + R_{7289j};$$

$$R_{3789j} = R_{3j} + R_{789j};$$

$$i_{n j} = \sum_1^q i'_{qj}; \quad j = a, b, c; \quad q = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.$$

Характеристики нелинейных сопротивлений полупроводниковых вентилей выпрямительных полумостов схемы аппроксимируются следующими выражениями:

$$\begin{cases} r_B = \sum_{j=1}^2 \frac{1}{c_j + d_j i_B} & \text{при } i_B > 0; \\ r_B = \sum_{j=1}^2 \frac{1}{c_j} = \frac{1}{c} & \text{при } i_B \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Токи, исключенные из исходной системы алгебраических уравнений, определяются по законам Кирхгофа и имеют следующий вид:

$$\begin{cases} i_{29j} = i_{27j} - i_{28j}; \\ i_{3j} = i_{4j} - i_{36j} - i_{27j}; \\ i_{35j} = i_{1j} - i_{32j}; \\ i_{(q+13)j} = i_{(q+4)j} - i_{qj}; \\ i_{31j} = i_{32j} - i_{p0j}; \\ i_{23j} = i_{37j} - i_{25j}; \\ i_{24j} = i_{37j} - i_{26j}; \\ i_{2j} = -i_{34j} + i_{31j} + i_{p0j}; \\ i_{33j} = - (r_{3j} i_{3j} + r_{4j} i_{4j}) / R_{1j}; \\ i_{30j} = (R_{1j} i_{33j} - u_{c2j}) / R_{35j}; \\ i_{25j} = i_{26j} - \sum_1^q i_{qj}. \end{cases} \quad (5)$$

Реагирующий орган (РО) ПО состоит из нуль-индикатора (НИ), интегратора (И), органа сравнения (ОС) и расширителя импульсов (РИ). Структурная схема РО приведена на рис. 3а.

Наибольшую сложность в определении поведения представляет интегратор. На рис. 3б приведена схема интегратора, по которой составлена математическая модель, содержащая одно дифференциальное уравнение

$$p u_{c4j} = \frac{1}{C_{4j}} i_{c4j} \quad (6)$$

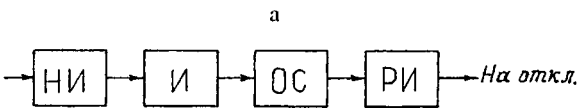
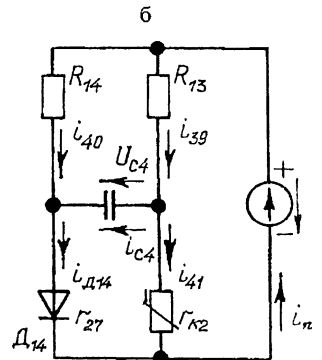


Рис. 3



и систему из шести алгебраических уравнений, после понижения порядка которой до четырех имеем следующую систему:

$$\begin{cases} (R_{13j} + R_{14j})i_{41j} + (R_{13j} + R_{14j})i_{c4j} - R_{14j}i_{nj} = -u_{c4j}; \\ r_{k2j}i_{41j} - r_{27j}i_{d14j} = u_{c4}; \\ (R_{13j} + r_{k2j})i_{41j} + R_{13j}i_{c4j} = U; \\ -i_{41j} - i_{d14j} + i_{nj} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Токи, исключенные из исходной системы алгебраических уравнений, составленной для интегратора, определяются по законам Кирхгофа.

Нуль-индикатор, орган сравнения и расширитель импульсов имеют достаточно четкую и относительно простую совокупность функций, что позволяет использовать для исследования их поведения имитационный метод моделирования. Таким образом, использование математического и имитационного моделирования позволяет исследовать поведение РО.

При численном интегрировании уравнений (1), (2) и (6) на каждом шаге совместно решаются системы алгебраических уравнений (3) и (7), образующие с характеристиками диодов (4) сложную нелинейную систему, решение которой производится методом итераций.

Итерационный процесс решения алгебраических уравнений строится следующим образом:

- 1) вычисляются вторичные токи КТТ;
- 2) вычисляются  $H_{qj}$  по зависимостям  $H_{qj} = f(B_{qj})$ ;
- 3) вычисляются токи  $i'_{qj}$  по уравнениям (1), составленным для определения вторичных токов при переходных процессах в ПТТ;
- 4) задаются начальные значения сопротивлений диодов  $r_{(p)j}$  ПО, РК и интегратора И, решаются системы уравнений (3) и (7);
- 5) вычисляются токи по (5), исключенные из исходной системы;
- 6) определяются новые значения  $r_{(p+1)j}$ , сравниваются с их предыдущими величинами  $r_{(p)j}$  и в зависимости от результатов сравнения повторяются вычисления с п. 4 или заканчивается итерационный процесс;
- 7) определяется напряжение на входе реагирующего органа и исследуется его поведение;
- 8) затем вычисляются все остальные значения токов, напряжений и сопротивлений диодов, необходимые для подстановки в правые части дифференциальных уравнений (1), (2) и (6).

В результате решения системы (1)–(7) определяем возможность и время срабатывания защиты в реальных режимах работы системы шин и всех видах короткого замыкания.

Дифференциальные уравнения (1), (2) и (6) решаются по методу Рунге—Кутты 2-го порядка.

Первичные токи КТТ представляются зависимостями, позволяющими задавать различные амплитуды и начальные значения фаз периодических составляющих, начальные значения аperiodических составляющих, различные постоянные времени затухания аperiodических состав-

ляющих, что позволяет исследовать поведение защиты при различных видах коротких замыканий и режимах сети.

Имеющиеся значительные экспериментальные данные [5] используются для углубленной проверки функционирования математической модели защиты, подтверждения правильности и достаточности учета взаимосвязи между мгновенными значениями отдельных величин электромагнитных переходных процессов в элементах защиты и их физическими параметрами.

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны математическая модель дифференциальной защиты шин с торможением на выпрямленных токах и алгоритм ее реализации на ПЭВМ. Модель содержит описание каскадных ТТ, ПТТ, измерительных и реагирующих органов защиты.

2. Реализация на ПЭВМ представленной математической модели позволит производить оценку поведения защиты во всех возможных режимах работы системы шин и анализ аварийных ситуаций даже при расхождении по углу ЭДС питающих присоединений с учетом нагрузки тупиковых присоединений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк Ф. А., Новаш В. И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. — Минск, «ВУЗ-ЮНИТИ», 1998. — 174 с.

2. Методические указания по техническому обслуживанию дифференциальной защиты шин ПДЭ-2006 (ДЗШТ-750, ДЗШТ-751). МУ 34-70-068-84 / СПО Союзтехэнерго. — М., 1984. — 102 с.

3. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. — Т. 1. — М.; Л.: Энергия, 1966. — С. 138—141.

4. Сопьяник В. Х. Расчет и анализ на ПЭВМ процессов в токовых цепях устройств релейной защиты с каскадными трансформаторами тока // Электрические станции. — 1998. — № 11. — С. 44—46.

5. Алексеев В. В. Характеристики дифференциальной защиты шин ПДЭ-2006 // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). — 1991. — № 8. — С. 30—34.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 26.04.2000