

## Структурный подход к моделированию комплексного энергообъекта

Томкевич А.П.  
СООО "Тимиор"

В настоящее время переходные процессы в силовых трансформаторах исследуются методами математического моделирования и вычислительного эксперимента. Для этого используется модель обобщенного энергообъекта [1], состоящая из нескольких логически разделенных элементов.

Каждый элемент моделируется с требуемой степенью детализации, обусловленной влиянием переходных процессов в нем на протекание переходного процесса в исследуемом объекте (например, трансформаторе). Необходимая степень детализации может быть определена исходя из физических предпосылок или путем многократных вычислительных экспериментов.

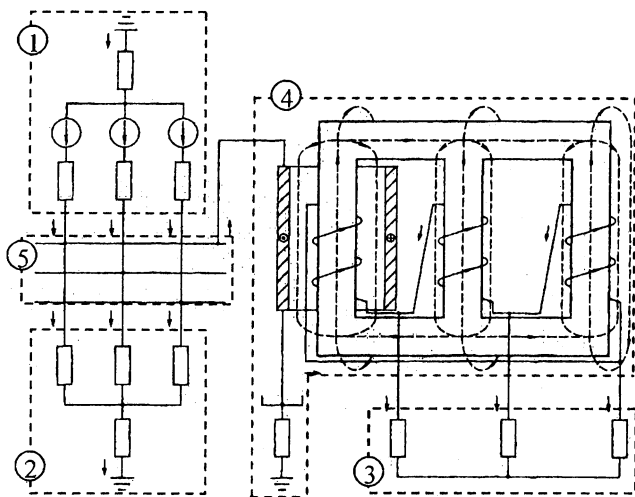


Рис. 1. Структурная модель энергообъекта:

1 – модель питающей системы и линии электропередачи; 2 – модель нагрузки на шинах ВН трансформатора; 3 – модель нагрузки на шинах НН трансформатора; 4 – модель трансформатора; 5 – модель шин ВН

Достаточность корректировки модели второстепенного элемента (и вообще вопрос о ее включении в обобщенный энергообъект для решения конкретной задачи) оценивается степенью влияния переходных процессов в этом элементе на переходные процессы в исследуемом элементе. Для задачи построения алгоритма функционирования релейной защиты трансформатора принято [2] учитывать второстепенные элементы (нагрузки, линии и т.п.) уточняющие результаты расчетов переходных процессов в трансформаторе не менее, чем на (3 – 5) %. Достаточной степенью детализации можно считать уточнение модели, улучшающее результат расчета в тех же пределах.

Необходимость упрощения моделей второстепенных элементов энергообъекта обусловлена следующими соображениями: 1) чем проще модель, тем меньше время требуется для ее решения; 2) для сложных, детализированных моделей затруднительно получить их входные данные.

Так, при моделировании режима однофазного включения силового трансформатора со стороны высокого напряжения (ВН) [2], составляется математическое описание схемы (рис. 1), в котором элемент 1 представляется последовательно включенными трехфазной системой э.д.с., эквивалентными линейными активным и реактивным сопротивлениями системы и линии электропередачи; элементы 2 и 3 – эквивалентные активные и реактивные сопротивления нагрузок со стороны ВН и низкого напряжения (НН) соответственно; 4 – развернутая модель трансформатора, построенная на основании II теории рассеяния [3]; элемент 5 – шины – в традиционных моделях опускается.

При исследовании характеристик дистанционных защит также используется детализированная модель силового трансформатора. Модель обобщенного энергообъекта имеет более сложный вид, так как модели одних и тех же элементов (линий, нагрузок) используются несколько раз. Это приводит к пропорциональному увеличению числа слагаемых в уравнениях и общего количества уравнений описывающих обобщенный энергообъект.

Степень детализации элементов энергообъекта в обеих задачах одинакова. Однако для каждой из них создается индивидуальная модель энергообъекта (программа расчета). Отметим, что даже при незначительном изменении схемы иногда прихо-

дится коренным образом перерабатывать ее математическую модель.

Можно предложить альтернативный способ математического описания обобщенного энергообъекта – структурное построение модели, заключающееся в двухэтапном моделировании. На первом этапе создаются модели всех используемых элементов с требуемой степенью детализации, на втором – моделируется структура обобщенного энергообъекта. Для этого необходимо учитывать дополнительные элементы: выключатели и шины. Отметим что, введение в модель этих элементов позволяет уточнить результаты решения математической модели в целом, например в неполнофазных режимах (традиционно такие режимы создаются введением в разрываемую цепь последовательного сопротивления значительной величины).

Также к преимуществам структурного моделирования можно отнести следующие факты:

- математическое описание энергообъекта становится более гибким – при изменении схемы (исключение, введение новых элементов) отпадает необходимость в создании новой программы: достаточным оказывается корректировка исходных данных части модели, описывающей топологию схемы;
- при использовании нескольких элементов, имеющих одну и ту же математическую модель количество слагаемых в уравнениях не изменяется, однако уравнения, в отличие от традиционных способов построения моделей составляются динамически во время выполнения программы;
- использование универсальных моделей элементов может уменьшить время решения задачи за счет использования многопоточного программирования.

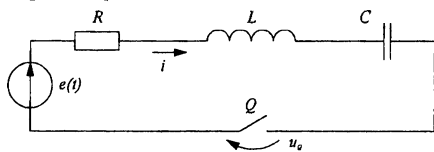


Рис. 2

Для задачи построения алгоритма функционирования релейной защиты трансформатора модель выключателя является второстепенным объектом. В ней не требуется учитывать динамику движения контактных полюсов, процессы возникновения и га-

шения дуги и т. п., необходимые при исследовании процессов в выключателе. Достаточной степенью детализации модели выключателя можно считать его представление с помощью единичной функции:

$$l(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}, \quad l(-t) = \begin{cases} 1, & t < 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases}. \quad (1)$$

Составим математическое описание последовательной цепи (рис. 2), не изменяющееся по форме при коммутации ключа. Уравнение по второму закону Кирхгофа можно составить так:

$$R(i(t) \cdot l(t)) + L(i(t) \cdot l(t))' + \frac{1}{C} \int (i(t) \cdot l(t)) dt + e(t) \cdot l(-t) = e(t). \quad (2)$$

Решение (2) в окрестности точки  $t = 0$  затруднительно, вследствие разрывности функции  $l(t)$ . При отсутствии запаса энергии в катушке и емкости (2) может быть упрощено:

$$Ri(t) + Li'(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt + e(t) \cdot l(-t) = e(t).$$

Преобразовав, получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$Li''(t) + Ri'(t) + \frac{1}{C} i(t) = e'(t) \cdot l(t) + e(t) \cdot \delta(t),$$

где  $\delta(t) = l'(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{1}{\tau}, & t \in [0, \tau], \quad \tau \rightarrow 0 \\ 0, & t > \tau \end{cases}$

Путем аналогичных рассуждений может быть получено описание трехфазного выключателя. Модель шин также не предъявляет специфичных требований к точности и может быть представлена уравнением, составленным по первому закону Кирхгофа.

### Литература

1. Романюк, Ф.А., Новаш, В.И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. - Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. -174 с.
2. Новаш, В.И., Томкевич, А.П. Броски тока намагничивания трехфазных силовых трансформаторов при неполнофазном включении // Энергетика Изв. ВУЗов. 2005. №4 С. 5 – 12.
3. Новаш, И.В. Математическая модель трехфазного трех-стержневого трансформатора на базе второй теории рассеяния // Энергетика Изв. ВУЗов. 1986. №5 С. 36 – 39.