

Метод расчета кривой намагничивания трансформатора для его моделирования в MatLab Simulink

А. Г. Лавров¹, Д. С. Ильяшов²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹angelavr@mail.ru, ²ilyaschow@yandex.ru

Аннотация. Предложена методика расчета кривой намагничивания трансформатора для его моделирования в MatLab Simulink, значительно сокращающая время подготовки исходных данных.

Ключевые слова: трансформатор; кривая намагничивания; намагничивающая мощность; моделирование; MatLab Simulink; SimPowerSystems.

Объектом исследования является блок трехфазного двухобмоточного трансформатора Three-Phase Transformer (Two Windings). Блок трансформатора функционирует в соответствии с электрической схемой замещения, рис. 1.

Расчет активных сопротивлений обмоток R_1, R_2 , индуктивностей рассеяния обмоток L_1, L_2 , активного сопротивления ветви намагничивания R_m хорошо разработан и не вызывает никаких затруднений [1–3]. Исходными данными для этого расчета являются паспортные данные трансформатора.

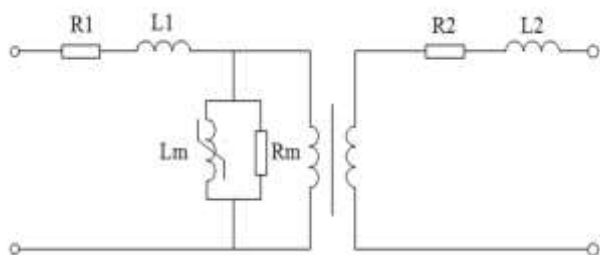


Рис. 1. Электрическая схема замещения трансформатора

Нелинейная индуктивность взаимной индукции L_m задается кривой намагничивания в виде пар значений $[I_{0m}; \Psi_{1m}]$, в которых указываются амплитуда тока намагничивания, который представляет собой реактивную составляющую тока холостого хода, и амплитуда потокосцепления первичной обмотки трансформатора соответственно.

Существуют два метода получения кривой намагничивания трансформатора, основанные на его полном электромагнитном расчете [3].

Первый метод заключается в расчете магнитной цепи трансформатора на основании закона полного тока. Вторым методом расчета основан на вычислении намагничивающей (реактивной) мощности магнитопровода трансформатора.

Указанные методы расчета кривой намагничивания трансформатора дают точные результаты, но являются сложными, трудоемкими. Для их реализации требуется высокая квалификация в области проектирования трансформаторов, которую могут не иметь специалисты, исследующие характеристики отдельных трансформаторов или их работу в электроэнергетической системе с помощью MatLab Simulink.

Исходя из сказанного, возникает необходимость в разработке более простого и доступного метода расчета кривой намагничивания трансформатора, в котором исходными данными являлись бы только паспортные данные трансформатора.

Приняв за основу метод вычисления намагничивающей мощности, разработан альтернативный метод расчета кривой намагничивания трансформатора, который базируется на следующих двух допущениях.

Первым допущением является предположение о незначительном влиянии марки стали, из которой изготовлен магнитопровод трансформатора, на параметры и характеристики исследуемого трансформатора. Магнитопровод силовых трансформаторов изготавливается из холоднокатаных анизотропных тонколистовых электротехнических сталей марок 3404, 3405, 3406, 3407, 3408, 3411, 3412, 3413, которые близки по своим магнитным свойствам [4].

Вторым допущением является предположение о значении номинальной индукции в стали трансформатора. В [4] собраны данные о диапазонах номинального значения индукции в стали в зависимости от мощности трансформатора и его системы охлаждения. Этими данными можно успешно пользоваться для задания номинального значения индукции магнитного поля в

сердечнике исследуемого трансформатора, поскольку даже возможная незначительная ошибка не внесет большой погрешности в расчет кривой намагничивания.

С учетом указанных допущений предлагаемая методика расчета кривой намагничивания трансформатора может быть представлена следующим алгоритмом:

1. Действующее значение полного тока холостого хода:

$$I_{0н} = \frac{I_1 \cdot I_0 \%}{100}.$$

2. Действующее значение активной составляющей тока холостого хода:

$$I_{0ан} = \frac{P_0}{mU_{1ф}}.$$

3. Действующее и амплитудное значения намагничивающего тока (реактивная составляющая тока холостого хода):

$$I_{0гн} = \sqrt{I_{0н}^2 - I_{0ан}^2}, \quad I_{0гнм} = I_{0гн} \cdot \sqrt{2}.$$

4. Выбирается марка стали магнитопровода.

5. Задается номинальное значение индукции магнитного поля в сердечнике трансформатора в зависимости от марки стали магнитопровода и мощности трансформатора на основании данных, приведенных в [4].

6. Из справочных данных находится удельная намагничивающая мощность в зависимости от номинального значения индукции магнитного поля для выбранной стали.

7. Для значений магнитного потока в стали, отличных от номинального, определяются соответствующие значения удельной намагничивающей мощности и находится значение намагничивающего тока, используя пропорцию:

$$I_{0гнм} = \frac{q_c}{q_{сн}} \cdot I_{0гнм}.$$

8. Амплитуда потокоцепления первичной обмотки в номинальной точке:

$$\Psi_{1нм} = \frac{U_{\phi 1н}}{4,44 \cdot f}.$$

9. Аналогично с п.7, находятся амплитуды потокоцепления для значений магнитного потока в стали выше и ниже номинального через пропорцию:

$$\Psi_{1м} = \frac{B}{B_n} \cdot \Psi_{1нм}.$$

Для подтверждения правомерности предложенного алгоритма расчета кривой намагничивания трансформатора произведен полный электромагнитный расчет трехфазного двухобмоточного силового трансформатора ТДН 40000/110, и на его основании

получена точная кривая намагничивания, представленная на рис. 2. На этом же рисунке построена приближенная кривая полученная в результате расчета по предложенному алгоритму. Сравнительный анализ представленных кривых говорит о достаточной точности предложенного алгоритма. Аналогичные результаты были получены при расчете кривой намагничивания трансформатора ТДНС-40000/35.

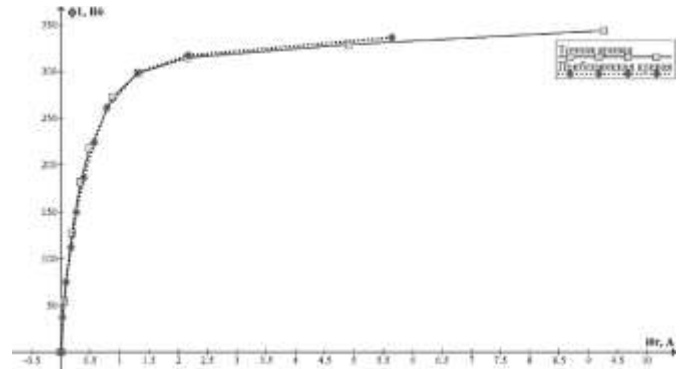


Рис. 2. Сравнение точной и приближенной кривых намагничивания

Оценка возможных погрешностей, вносимых принятыми допущениями, проводилась моделированием режима холостого хода с анализом значений тока холостого хода.

Для оценки погрешностей, вносимых допущением о произвольном выборе марки стали, производился расчет тока холостого хода в функции приложенного напряжения при выполнении сердечника трансформатора из сталей различных марок и различной толщины. Анализ указанного расчета показал, что отличие значений тока холостого хода от его значения, полученного по точной кривой намагничивания, для конкретной применяемой стали отличается не более чем на 2–4% в области нормального насыщения и достигает 5–7% в области перенасыщения электротехнических сталей.

Аналогичный анализ проведен для оценки погрешностей, вносимых допущением о выборе значения номинальной индукции в стали магнитопровода, на основании сведений, представленных в [4]. Сравнение проводится для точной и приближенных кривых намагничивания, в которых приняты крайние из предлагаемого диапазона значения номинальной индукции. Анализ расчетов показал, что погрешность в расчетах значения тока холостого хода не превышает 4–5% при нормальном насыщении стали и довольно значительна (около 30%) в области технического насыщения. Следовательно, для исследования трансформаторов с ненасыщенной магнитной системой и в номинальном режиме работы с нормальным насыщением, выбор номинальной индукции не вносит существенной погрешности в результаты расчета его характеристик.

Результаты проведенных численных исследований позволяют сделать вывод, что кривая намагничивания трансформатора, полученная на основании предложенного метода расчета, основанного на знании только паспортных данных трансформатора, с учетом всех

принятых допущений корректна и с достаточной степенью точности совпадает с точной кривой, полученной путем полного электромагнитного расчета трансформатора. Предложенный метод расчета кривой намагничивания достаточно прост и понятен, позволяет значительно сократить время подготовки исходных данных для моделирования и может быть успешно использоваться в учебных и научно-исследовательских целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с

учетом насыщения магнитопровода // Известия высших учебных заведений. 2014. №7. С. 13–24.

- [2] Дед А.В. Расчет параметров Simulink-модели силового трехфазного трансформатора для исследования длительных несимметричных режимов // Омский научный вестник. 2017. №3. С. 68–74.
- [3] Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
- [4] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. Энергоатомиздат, 1986. 528 с.