

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\varphi) &= \frac{R_{oc}^2 - \omega \cdot L_{12} \cdot (L_{12} + K_{yc} \cdot n^2 \cdot L)}{\omega \cdot R_{oc} \cdot K_{yc} \cdot L \cdot n^2} \approx \frac{R_{oc}^2 + \omega \cdot L_{12} \cdot K_{yc} \cdot n^2 \cdot L}{\omega \cdot R_{oc} \cdot K_{yc} \cdot L \cdot n^2} \approx \\ &\approx \frac{R_{oc}}{\omega \cdot K_{yc} \cdot L \cdot n^2} + \frac{\omega \cdot L_{12}}{R_{oc}} = \frac{500}{314 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^4} + \frac{314 \cdot 6.27 \cdot 10^{-3}}{500} = \\ &= 0,0071 (24,5'). \end{aligned}$$

Для схемы активного трансформатора напряжения:

$$\Delta U = \frac{Z_{п}}{R_{г}} \cdot U_1 + \frac{Z_{п}}{(R_{oc} + p \cdot L_{s2})} \cdot U_2; \quad U_2 = -K_{yc} \cdot \Delta U;$$

$$Z_{п} = R_{г} // L // (R_{oc} + p \cdot L_{s2}),$$

отсюда

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\varphi) &= \frac{R_{oc} \cdot (R_{oc} \cdot R_{г} - \omega^2 \cdot L \cdot L_{s2}) + \omega^2 \cdot L_{s2} \cdot (L \cdot R_{г} \cdot K_{yc} + L_{s2} \cdot R_{гг})}{\omega \cdot R_{oc} \cdot (L \cdot R_{г} \cdot K_{yc} + L_{s2} \cdot R_{гг} - \omega \cdot L_{s2} \cdot (R_{oc} \cdot R_{г} - \omega^2 \cdot L \cdot L_{s2}))} \approx \\ &\approx \frac{R_{oc}^2 \cdot R_{г} + \omega^2 \cdot L_{s2} \cdot L \cdot R_{г} \cdot K_{yc}}{\omega \cdot R_{oc} \cdot L \cdot R_{г} \cdot K_{yc}} \approx \frac{R_{oc}}{\omega \cdot L \cdot K_{yc}} + \frac{\omega \cdot L_{12}}{R_{oc}} = \\ &= \frac{1000}{314 \cdot 1 \cdot 10^3} + \frac{314 \cdot 223 \cdot 10^{-6}}{10^3} = 3,253 \cdot 10^{-3} (11,18'). \end{aligned}$$

Для измерения фазового сдвига, вносимого реальной схемой активного трансформатора напряжения, была использована схема представленная рис. 3. В ходе измерений были получены фазовые сдвиги в 15', что хорошо согласуется с теоретической оценкой. По этой же схеме проводились измерения влияния частоты входного напряжения на фазовые искажения в диапазоне частот от 50 до 2 кГц. Фазовые искажения в ходе опыта с ростом частоты уменьшались с 18' до 13'.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Зализный Д. И.

*Гомельский государственный технический университет
им. П. О. Сухого*

Научный руководитель: к.т.н. Рунов Ю. А.

В настоящее время свыше 80% электроэнергии, вырабатываемой на электростанциях, по пути до шин потребителей 0,4-10кВ претерпевает от одной до восьми трансформаций. В ближайшие годы вследствие роста магистральных сетей 500-1150кВ среднее число трансформаций возросло до четырех.

В каждой ступени трансформации на киловатт передаваемой мощности приходится устанавливать 1,5-2,5кВА трансформаторной мощности. Это показывает, как низка эффективность использования силовых трансформаторов. Суммарная установленная мощность достигает в целом по республике огромных значений. При таких масштабах каждый процент снижения вводимой трансформаторной мощности за счет лучшего ее использования дает большой экономический эффект, исчисляемый миллионами долларов, а улучшение использования всего лишь на 1% трансформаторов, находящихся в эксплуатации, равносильно годовому выпуску современного трансформаторного завода.

Следовательно, при проектировании энергетических объектов нужно стремиться к установке трансформаторов возможно меньшей номинальной мощности при требуемом уровне надежности электроснабжения и качества электроэнергии. Такая задача может быть решена путем максимального использования нагрузочной способности трансформаторов. А это возможно при наличии специальных средств контроля и автоматики.

В основе расчета нагрузочной способности лежит тепловой износ изоляции трансформатора. Под воздействием температуры и ряда других факторов физико-химические свойства твердой изоляции с течением времени претерпевают изменения, при этом изоляция становится хрупкой. Хотя электрическая прочность ее практически не снижается, она больше не способна выдерживать механические нагрузки от вибраций или коротких замыканий. Этот необратимый процесс называется старением. Скорость старения изоляции зависит от температуры, а достигнутая степень старения от температуры и времени ее воздействия. Поэтому для расчета нагрузочной способности рассчитывают температуру, в частности температуру в наиболее нагретых местах обмотки (температуру наиболее нагретой точки - ННТ).

Температура ННТ включает в себя три составляющие: температуру охлаждающей среды, температуру масла, температуру обмотки.

Измерение первой составляющей не составляет трудностей. Схемы измерения строятся в зависимости от системы охлаждения, которая может быть воздушной или водяной, естественной или принудительной. Измерение остальных составляющих представляет некоторые трудности. Дело в том, что силовой масляный трансформатор в тепловом отношении представляет собой очень сложное тело. Реальная кривая распределения температуры масла имеет очень сложный характер и зависит от множества факторов: естественная или принудительная циркуляция масла, турбулентное или ламинарное течение потока, влияние высоты установки трансформатора и так далее. Поэтому ГОСТ вводит ряд упрощений, которые достаточно точно выполняются на практике: температура масла по высоте бака возрастает линейно, превышение средней температуры обмоток над температурой прилегающих слоев масла одинаково по всей высоте обмотки, и так далее.

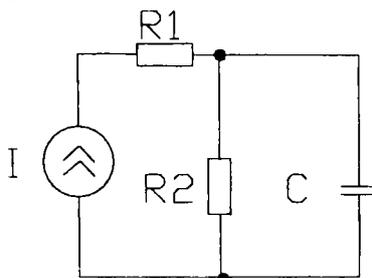
Таким образом, при измерении второй составляющей температуры ННТ достаточно контролировать температуру в верхних слоях масла. Это можно сделать непосредственно, используя датчик температуры. Но подобный способ имеет ряд недостатков: большая длина соединительных проводов, наводки от поля рассеяния трансформатора и так далее.

Наибольшую же трудность представляет измерение третьей составляющей ННТ - температуры обмотки, так как на обмотке очень высокое напряжение. Существует два метода: непосредственное измерение и метод моделей.

Первый метод не получил широкого распространения из-за технических трудностей реализации. Вторым методом является наиболее популярным и перспективным. Было много попыток создания качественных моделей. В 80-е годы на Западе широко использовалась так называемая двухобмоточная модель. Она имела две обмотки - нагревательную и измерительную и помещалась обычно в верхних слоях масла. Нагревательная обмотка питалась от трансформатора тока,

а измерительная включалась в одну из ветвей измерительного моста. Изменение сопротивления измерительной обмотки с изменением температуры регистрировалось прибором, градуированным в градусах Цельсия. Подобный прибор имел низкую точность и надежность. Но и в наше время на территории СНГ еще не создано достаточно качественных и надежных приборов для контроля температуры ННТ.

В рамках данной работы предложена модель на основе схемы замещения силового масляного трансформатора, которая изображена на рис. 1.



Упрощенная тепловая схема замещения

На схеме: источник тока - это аналог теплового потока; резистор R1 - аналог теплового сопротивления обмотки; резистор R2 - аналог теплового сопротивления масла; конденсатор C - моделирует тепловую инерцию масла. Рассмотрим работу схемы при подаче скачка тока (нагрузка изменилась скачком). В первый момент времени на выходе схемы появится скачок напряжения, характеризующий быстрый нагрев обмотки. Тепловую постоянную времени обмотки считаем равной нулю по сравнению с тепловой постоянной времени масла. Затем начнется экспоненциальный рост напряжения, характеризующий нагрев масла. Тепловая постоянная времени силовых трансформаторов равна 2,5-3 часа. Очевидно, что при допустимых номиналах резисторов требуется большое значение емкости - порядка одного фарада. Такую емкость можно получить, используя конвертеры положительного сопротивления на операционных усилителях с дополнительной растяжкой во времени с помощью устройства выборки - хранения. Подобные эксперименты были проведены, и получены достаточно приемлемые результаты. При этом были встречены трудности: проблема изоляции подзаряжаемого конденсатора, общая сложность настройки устройства. Задачу получения большой емкости можно решить также с помощью алгоритмов линейной цифровой фильтрации, задавая, например, алгоритм рекурсивного цифрового фильтра в однокристалльную ЭВМ и преобразуя результат в аналоговый сигнал с помощью ЦАП.

Рассмотрим работу источника тока. Он управляется током, пропорциональным току нагрузки. Этот ток возводится в квадрат и к результату добавляется постоянная составляющая. Поясним почему это так. Дело в том, что температура нагрева тела пропорциональна электрической мощности, выделяющейся на теле, а мощность пропорциональна квадрату тока. Поэтому и происходит возведение в квадрат. Эта квадратичная составляющая является переменной, так как

зависит от коэффициента загрузки, и характеризует электрические потери в обмотках трансформатора (потери короткого замыкания). Постоянная же составляющая обусловлена наличием электрических потерь в сердечнике трансформатора (потери холостого хода).

В целом, прибор, реализующий вышерассмотренную модель, должен быть надежным средством контроля и автоматики, отображать результат измерения в градусах Цельсия и иметь средства отключения нагрузки от трансформатора при наличии аварийного режима работы (перегрева).

Необходимо также указать, что и метод моделей имеет недостатки, обусловленные разбросом параметров от трансформатора к трансформатору и случайностью реально протекающих процессов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЁТА РЕЖИМОВ И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Золотой А. А.

Белорусская государственная политехническая академия, г. Минск
Научный руководитель: к.т.н. Фурсанов М. И.

Разработан, опробован и реализован на ПЭВМ комплекс базовых алгоритмов и программ для расчёта и анализа установившихся режимов и потерь электроэнергии в основных электрических сетях энергосистем.

Комплекс оформлен в виде самостоятельной диалоговой системы, функционирующей в операционной системе Windows. Оболочка системы выполнена в среде визуального программирования Delphi. Расчётная часть комплекса полностью соответствует требованиям, предъявляемым к быстродействию и объёму рассчитываемой сети.

Разработанный комплекс программ является составной частью АСДУ электрическими сетями и включает в себя расчёт установившихся режимов и потерь электроэнергии в основных электрических сетях с учётом их современного уровня информационной обеспеченности.

Расчёт установившегося режима основной электрической сети сводится к решению системы уравнений узловых напряжений методом Гаусса-Зейделя с ускорением сходимости итерационного процесса путём введения пересчитываемого в процессе счёта линейного коэффициента ускорения.

Расчёт выполняется без предварительного приведения элементов электрической сети к одной ступени напряжения с учётом комплексных коэффициентов трансформации. В процессе расчёта напряжений нагрузка узла, заданная мощностью, пересчитывается в проводимость.

Расчёт напряжений нагрузочных узлов проводится как с учётом, так и без учёта статических характеристик нагрузок. Если статические характеристики нагрузок не учитываются, то при расчёте в качестве нагрузок узлов берутся величины, заданные в исходных данных.

При учёте статических характеристик заданные значения нагрузок предполагаются приведёнными к номинальному напряжению, т. е.

$$P_{\text{зад}} = P_{\text{ном}} \text{ и } Q_{\text{зад}} = Q_{\text{ном}}$$

В процессе расчёта нагрузки узлов пересчитываются по формулам: