УДК 621.314.21

А. Е. Фокеев, канд. техн. наук, доц. И. Н. Тумаков, магистрант E-mail: tumakov.work@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Анализ применимости методов определения допустимой нагрузки для выбора мощности силовых трансформаторов для проектирования систем электроснабжения

Работа посвящена анализу применимости методов определения допустимой нагрузки силовых трансформаторов для выбора их номинальной мощности при проектировании систем электроснабжения. Приведены основные аспекты определения допустимой нагрузки силовых трансформаторов для экспериментальных и эмпирических методов. Определен метод, наиболее подходящий для определения коэффициента снижения допустимой нагрузки силовых трансформаторов на этапе проектирования систем электроснабжения при использовании минимального количества исходных данных.

Ключевые слова: силовой трансформатор, высшие гармонические составляющие, нелинейная нагрузка, снижение срока службы, допустимая нагрузка.

Введение

Задача инженера-проектировщика на стадии проектирования системы электроснабжения сводится к выбору оптимальных параметров силового электрооборудования и токоведущих частей, которые обеспечат требуемый режим электроснабжения. Выбор производится по результатам расчета параметров электрической нагрузки, определяющих тепловое воздействие (нагрев) на силовое электрооборудование и токоведущие части. В случае превышения допустимых значений температуры нагрева возможны выход оборудования из строя и нарушение нормального режима электроснабжения.

Развитие современных технологий определяет увеличение количества высокотехнологического оборудования и электронных устройств, имеющих несинусоидальных характер электропотребления. Силовой трансформатор является устройством с сосредоточенными параметрами, для которого влияние высших гармонических составляющих тока проявляется в виде дополнительных потерь активной мощности и нагрева обмоток, магнитопровода и элементов конструкции [1, 2].

[©] Фокеев А. Е., Тумаков И. Н., 2020

Для правильного выбора силовых трансформаторов необходимо учитывать влияние нелинейной нагрузки — выбор мощности должен осуществляться с использованием коэффициента снижения допустимой нагрузки. При этом объем исходных данных для расчета коэффициента должен быть минимальным, а значение инженерной ошибки расчета не должно приводить к необоснованному увеличению капитальных затрат.

Экспериментальные методы

Метод косвенного измерения потерь в силовом трансформаторе [3] предполагает перерасчет предельно допустимой нагрузки силового трансформатора по выражению:

$$I_{\text{MAX}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{K3}} \cdot K_3^2}{\Delta P_{\text{K3}}^{\text{HECUH}}}},$$
(1)

где $\Delta P_{\rm K3}$ — номинальное значение потерь короткого замыкания силового трансформатора; K_3 — коэффициент загрузки силового трансформатора; $\Delta P_{\rm K3}^{\rm HECUH}$ — значение потерь короткого замыкания силового трансформатора для рассматриваемого несинусоидального режима.

Определение потерь короткого замыкания несинусоидального осуществляется с использованием мгновенных значений токов и напряжений первичной и вторичной обмотки силового трансформатора с использованием выражения:

$$\Delta P_{\rm K3}^{\rm HECHH} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left(\frac{i_a^{'}(u_{AC} - u_{ac}^{'}) + i_b^{'}(u_{BC} - u_{bc}^{'})}{\Delta P_{\rm K3}} \right) dt, \tag{2}$$

где i_a' , i_b' , u_{ac}' , u_{bc}' — мгновенные значения фазных токов и линейных напряжений во вторичной обмотке трансформатора; u_{AC} u_{BC} — мгновенное значение линейного напряжения первичной обмотки; T — период; t — время.

Измерение мгновенных значений токов и напряжений производится в первичной и вторичной обмотке силового трансформатора. Обработка результатов измерений и вычисления производятся посредством специализированного программного обеспечения.

Необходимо отметить, что суммарные потери в трансформаторе (потери в стали, потери в обмотках и потери в элементах конструкции) составляют примерно 1–2 % номинальной мощности. Для корректного определения потерь, обеспечивающего точность последующей оценки

допустимой нагрузки, потребуется применение высокоточного измерительного оборудования.

Метод измерения частотной характеристики [4] обмоток силового трансформатора предполагает перерасчет предельно допустимой нагрузки силового трансформатора по выражению:

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{\Delta P_{K3} \cdot K_3^2}{\sum_{h} I_h^2 R_{\sum hABC}}},$$
 (3)

где $R_{\Sigma hABC}$ – суммарное эквивалентное входное сопротивление фаз трансформатора для h-й гармоники.

Принцип определения $R_{\Sigma hABC}$ основан на экспериментальном определении частотной характеристики трансформатора путем подачи в обмотку низкого напряжения измерительной помехи. Генерация помехи и обработка сигнала реакции трансформатора на помеху производится с использованием специального измерительного комплекса. Выражение для расчета нагрузочных потерь силового трансформатора преобразуется следующим образом:

$$\begin{split} \Delta P_{\text{HA}\Gamma\text{P}} &= \Delta P_R + \Delta P_{\text{BHX}} + \Delta P_{\text{\Pi}\text{p}} = \\ &= \sum_h I_h^2 (R_{DC} + R_{\text{BHX}} \cdot h^2 + R_{\text{\Pi}\text{p}} \cdot h^{0.8}) = \\ &= \sum_h I_h^2 \cdot R_{\sum h}, \end{split} \tag{4}$$

где ΔP_R – резистивные потери в обмотках; $\Delta P_{\text{вих}}$ – потери от вихревых токов в обмотках; $\Delta P_{\rm np}$ – прочие потери от вихревых токов в элементах конструкции трансформатора; I_h – действующее значение тока h-й гармоники; R_{DC} – активное сопротивление обмотки на постоянном токе; $R_{\rm np}$ и $R_{\text{вих}}$ – эквивалентные сопротивления потерь от вихревых в конструкции и в обмотках трансформатора; $R_{\Sigma h}$ – входное эквивалентное сопротивление h-й гармоники.

Необходимо отметить, что на результаты измерения частотной характеристики трансформатора в значительной степени будут влиять конструктивные особенности. Кроме того, выполнение такого рода измерений необходимо для всей номенклатуры трансформаторов, используемых в системах электроснабжения.

Эмпирические методы

В настоящее время существует несколько эмпирических методов, которые учитывают наличие высших гармонических составляющих тока при определении допустимого тока силового трансформатора.

Метод 1 (рекомендован стандартом IEEE 619-P619AD5-1996 «Guide for Aplying Harmonics Limits») предполагает грубую оценку полной мощности силового трансформатора, питающего нелинейную нагрузку, в зависимости от доли нелинейной нагрузки (рис. 1).

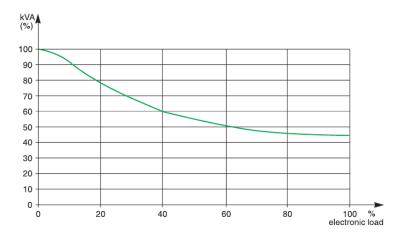


Рис. 1. Зависимость допустимой нагрузки силового трансформатора $S_{\text{ТР}, \text{Д}}$ от доли полной мощности нелинейной нагрузки N_{HH}

Стоит отметить, что в данном случае речь идет о полной мощности одного трансформатора. В случае если предполагается работа трансформаторов в режиме «горячего резервирования», шкала мощности должна рассматриваться с учетом доли ответственных потребителей электрической энергии. Кроме того, зависимость $S_{\text{ТР},\text{Д}} = f(N_{\text{HH}})$ на рис. 1 не предполагает различий для нелинейной нагрузки, для которой форма тока и гармонический состав могут различаться.

Метод 2 (рекомендован стандартом ANSI C57.110-2008 «IEEE Recommended Practice For Establishing Liquid-Filled And Dry-Type Power And Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents») применяется в Соединенных Штатах Америки и Европе и основан на использовании понятия *K*-фактора:

$$K = \sum_{h} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 \cdot h^2,\tag{5}$$

где h — порядковый номер гармоники; I_h —действующее значение h-й гармоники тока нагрузки; I_h – среднеквадратичное значение полного тока нагрузки.

По своей сути К-фактор является мерой способности трансформатора выдерживать тепловые эффекты гармонических токов, порождаемых многими видами сегодняшнего электронного оборудования и некоторым электрическим оборудованием. Значения коэффициента снижения допустимой нагрузки $K_{\text{СДН}}$ силового трансформатора в зависимости от принятого K-фактора приведены в табл. 1.

сди		
<i>К</i> -фактор	$K_{ m CДH}$	
4	0,886	
9	0,761	
13	0,692	
20	0,606	
30	0,524	
40	0,469	
50	0,428	

Таблица 1. Значение $K_{CЛH}$ в зависимости от K-фактора

Нужно обратить внимание, что чисто линейная нагрузка, которая потребляет синусоидальный ток, будет иметь К-фактор, равный единице. При нормальных условиях значение коэффициента К-фактора колеблется от 1 до 50. Значения К-фактора выше единицы указывают, что потери на вихревые токи в элементах трансформатора будут в K раз больше значений на основной частоте.

Метод 3 (приведен в C57.110-2018 – IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents) основан на использовании следующих выражений:

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{\Delta P_{K3}^{*}}{1 + F_{HL} \cdot \Delta P_{\text{BUX.O}}^{*}}^{*}} = \sqrt{\frac{1 + \Delta P_{\text{BUX.O}}^{*}^{*}_{\text{MAKC}}}{1 + F_{HL} \cdot \Delta P_{\text{BUX.O}}^{*}}^{*}_{\text{MAKC}}}},$$
(6)

$$F_{HL} = \frac{\Delta P_{\text{вих}}^{\text{НЕСИН}}}{\Delta P_{\text{вих.o}}} = \frac{\sum_{h} I_h^2 \cdot h^2}{\sum_{h} I_h^2},$$
 (7)

где F_{HL} — коэффициент гармонических потерь, зависящий от воздействия вихревых токов; $\Delta P_{\text{вих,o}}$, $\Delta P_{\text{вих}}$ — потери от вихревых токов в обмотках соответственно в синусоидальном и несинусоидальном режимах; $\Delta P_{\text{вих,o}}$ — максимальные потери от вихревых токов в обмотке в синусоидальном режиме в базисных единицах.

Отметим, что для реализации метода 3 требуется знать значения потерь в отдельных элементах трансформатора, в том числе потерь на вихревые токи. В паспорте на силовой трансформатор, как правило, приводятся только значения потерь холостого хода и короткого замыкания.

Метод 4 (рекомендован стандартом UTE C-15-112 «Effects of current on human beings and livestocks») предполагает расчет коэффициента снижения допустимой нагрузки силового трансформатора по выражению

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1 \left(\sum_{h=2}^{40} h^{1.6} \cdot \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2\right)}},$$
 (8)

где h — порядок гармонической составляющей тока; I_1 — действующее значение первой гармонической составляющей тока нагрузки, A; I_h — действующее значение гармонической составляющей тока нагрузки, A.

Выражение (8) является универсальным для различных типов и конструкций силовых трансформаторов и учитывает рост температуры наиболее нагретой точки обмотки в результате воздействия высших гармонических составляющих.

Сравнительный анализ методов

В работе [4] выполнено сравнение результатов определения допустимого тока силового трансформатора с использованием экспериментальных методов и эмпирического метода 3. Экспериментальные методы: измерения частотной характеристики сопротивления обмоток и косвенного измерения потерь, отличающиеся меньшей степенью абстракции при определении потерь, позволили определить допустимый ток трансформатора более точно. При одинаковых исходных данных силового трансформатора значение допустимого тока, рассчитанного по

экспериментальным методам, составило 79 и 83 % номинального тока, а при расчете по нормативному методу 3 составило 58 % номинального тока.

В табл. 2 приведены сравнительные результаты, полученные с использованием одних и тех же исходных данных для всех рассматриваемых методов. Результаты исследования [4] дополнены результатами расчета допустимого тока силового трансформатора с использованием эмпирических методов 1, 2 и 4.

Наименование метода	Параметр	Значение	$I_{ m MAX},$ % ot $I_{ m HOM}$
Метод косвенного измерения потерь	$\Delta P_{\mathrm{K3}}^{\mathrm{HECUH}},\mathrm{Bt}$	55,2	79
Метод измерения ЧХ трансформатора	$\sum I_h^2 R_{\sum hABC}$, Bt	50	83
Эмпирический метод 1	$N_{ m HH.TP},\%$	75	46
Эмпирический метод 2	<i>К</i> -фактор	10,5	≈73,5
Эмпирический метод 3	F_{HL}	10,53	58
Эмпирический метод 4	k	0,774	77,4

Таблица 2. Результаты, полученные при использовании различных методов

Результаты, получаемые посредством эмпирических методов 1 и 2, представляют собой очень грубую оценку допустимого тока силового трансформатора, выполняемую без учета фактического гармонического состава тока нагрузки. Значения допустимого тока трансформатора составляют 46 % и 73,5 % соответственно.

Применение эмпирического метода 4 для расчета допустимого тока силового трансформатора позволило получить значение 77,4 % номинального тока. Таким образом, метод 4 при использовании минимального количества исходных данных и отсутствии необходимости выполнения измерений позволяет выполнить оценку допустимой загрузки силотрансформатора получением результата, c приближенного к результатам экспериментальных методов.

Выводы

- 1. Экспериментальные методы оценки, несмотря на высокую достоверность получаемых результатов, не применимы для выполнения расчетов на стадии проектирования систем электроснабжения.
- 2. Экспериментальные методы могут быть использованы для создания математических моделей силовых трансформаторов различной кон-

струкции с целью использования параметров этих моделей для дополнения эмпирических методов оценки.

3. Эмпирический метод оценки допустимой нагрузки силового трансформатора, рекомендованный стандартом UTE C-15-112, является оптимальным с точки зрения объема используемых исходных данных.

Список литературы

- 1. *Dao*, *T*. Voltage harmonic effect on losses in distribution transformers / T. Dao, H. A. Halim, Z. Liu, B. T. Phung // International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS) (Bali, Indonesia, 6-8 Oct. 2016), pp. 27-32. DOI: 10.1109/ICSGTEIS.2016.7885761.
- 2. Singh, J. Effect of harmonics on distribution transformer losses and capacity / J. Singh., S. Singh, A. Singh // International Journal of Engineering Technology Science and Research. 2017. Vol. 4. Issue 6. Pp. 48-55.
- 3. Fuchs, E. F. Measurement of three-phase transformer derating and reactive power demand under nonlinear loading conditions / E. F. Fuchs, D. Lin, J. Martynaitis // IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 21. No. 2. Pp. 665-672. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858744.
- 4. *Янченко, С. А.* Анализ методов разгрузки трансформаторов в сетях с высоким уровнем несинусоидальности тока / С. А. Янченко, С. А. Цырук, А. И. Куликов // Промышленная энергетика. -2017. -№ 7. C. 44–53.

A. E. Fokeev, CSc in engineering, associate professor I. N. Tumakov, magister student E-mail: tumakov.work@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

Analysis of the Applicability of Methods for Determining the Permissible Load for Choosing the Power of Power Transformers for the Design of Power Supply Systems

The work is devoted to the analysis of the applicability of methods for determining the permissible load of power transformers for the selection of their rated power in the design of power supply systems. The main aspects of determining the permissible load of power transformers for experimental and empirical methods are presented. The most suitable method for determining the coefficient of reducing the permissible load of power transformers at the design stage of power supply systems, using the minimum amount of initial data, has been determined.

Keywords: power transformer, harmonic components, non-linear load, degradation of service life, load capacity.