

нение числа работающих трансформаторов с целью снижения потерь мощности. Величина этой нагрузки зависит от степени неравномерности загрузки трансформаторов в исходном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров А. А., Каменева В. В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
2. Гончар А. А. О критериях оптимизации работы силового трансформатора // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 2. – С. 45.
3. Радкевич В. Н., Трушников А. Л. О выборе критерия оптимизации работы силового трансформатора // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 4-5. – С. 32-33.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 30.05.2005

УДК 621.314

О КРИТЕРИЯХ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА*

Канд. техн. наук, доц. ГОНЧАР А. А.

Белорусский национальный технический университет

Поводом для написания данной статьи послужило несогласие автора с некоторыми принципиальными положениями, изложенными в ряде публикаций [1, 2], где трактуются вопросы об оптимальной загрузке силового трансформатора. Критериями оптимальности для определения зон экономичной эксплуатации трансформатора авторами приняты: минимум суммарных потерь активной мощности, минимум суммарных потерь электроэнергии в нем и т. д. Какие-либо существенные подтверждения истинности выдвинутых положений не приводятся. Их экспертиза на самом элементарном уровне не проводилась, в то время как в наличии – обширный арсенал доказательств противоположного.

Задачей научного исследования, как известно, являются поиск новых знаний, выявление новых закономерностей, получение возможно ожидаемых, возможно непредсказуемых результатов. К новым знаниям следует отнести, видимо, и неожиданное толкование ранее известных фактов. Однако во всех случаях полученные результаты должны быть правильным образом истолкованы и объективно объяснены.

Апробирование полученных результатов предполагает в том числе их сопоставление с фактами и закономерностями, которые не опровергнуты с течением времени и рассмотрены во всех аспектах и со всех точек зрения

* Статья публикуется в порядке обсуждения.

как в теоретическом, так и практическом плане. Таким образом, ранее полученные знания являются неким эталоном и фундаментом для новых. Этим же обеспечиваются их объективность и законченность на данном этапе развития научного исследования.

Положения, выдвинутые в [1, 2], и полученные на их основе выводы относятся к ошибочному толкованию давно известного факта, связанного с максимумом коэффициента полезного действия трансформатора.

Как известно, классическое выражение для КПД трансформатора имеет вид [4]

$$\eta = \frac{k_3 S_H \cos \varphi_2}{k_3 S_H \cos \varphi_2 + k_3^2 \Delta P_{\text{кн}} + \Delta P_{\text{ст}}}, \quad (1)$$

где k_3 – коэффициент загрузки трансформатора; $\Delta P_{\text{кн}}$ – потери активной мощности в режиме короткого замыкания трансформатора при номинальном токе; $\Delta P_{\text{ст}}$ – потери активной мощности в стали магнитопровода трансформатора; S_H – номинальная мощность трансформатора; $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки; $k_3^2 \Delta P_{\text{кн}} + \Delta P_{\text{ст}} = \sum \Delta P$ – текущее значение суммарных потерь активной мощности; $\Delta P_{\text{кн}}$ и $\Delta P_{\text{ст}}$ – принимаются на основании каталожных данных для трансформаторов.

Для упрощения записей и облегчения этим дальнейших исследований запишем (1) в виде

$$y = \frac{x}{ax^2 + x + c}, \quad (2)$$

где

$$y = \eta; \quad a = \frac{\Delta P_{\text{кн}}}{S_H \cos \varphi_2}; \quad c = \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{S_H \cos \varphi_2}; \quad x = k_3; \\ z = a_1 x^2 + c_1; \quad (3)$$

$z = \sum \Delta P$; $a_1 = \Delta P_{\text{кн}}$; $c_1 = \Delta P_{\text{ст}}$; a, a_1, c, c_1, x – положительные величины.

Задачей является исследование функции (2).

Из математики известно, что исследование любой функции включает нахождение областей существования, осей и центров симметрии, точек разрыва, точек экстремума, значения функций в них и т. д. Это относится к общему исследованию кривой по ее уравнению с целью изучения ее поведения и в дальнейшем – построения графика. По этим данным делается предварительный набросок кривой, который уточняется его вычислениями для получения величины функции по отдельным значениям аргумента [4].

Применяя указанные выше операции к (2), видим, что y , представляя собой кривую третьего порядка, проходящую через начало координат, имеет асимптотой ось x . Функция в указанной области непрерывна, сначала возрастает от нуля до некоторого максимума и далее медленно убывает.

Исследование функции, в том числе нахождение максимумов и минимумов, важно в методическом плане, ибо с помощью приемов высшей математики решаются сугубо практические вопросы, относящиеся к реаль-

ному техническому устройству, широко применяемому в электротехнике. Типичный вид зависимостей (2) и (3) показан на рис. 1 и 2.

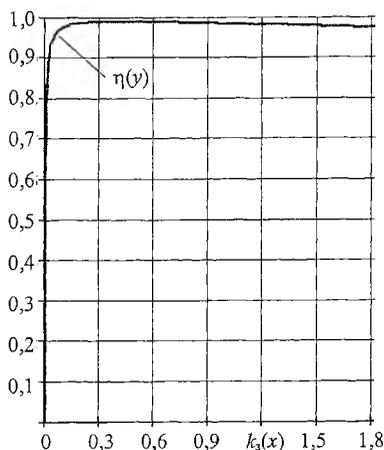


Рис. 1. Изменение коэффициента полезного действия $\eta(y)$ силового трансформатора в зависимости от степени загрузки $k_3(x)$

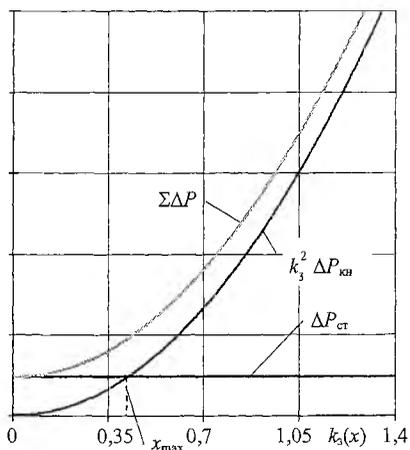


Рис. 2. Изменение суммарных потерь активной мощности $\Sigma\Delta P$, потерь в обмотках $k_3^2 \Delta P_{кн}$ и потерь в стали $\Delta P_{ст}$ силового трансформатора в зависимости от степени загрузки $k_3(x)$

В литературных источниках по электрическим машинам совершенно справедливо утверждается, что максимуму КПД соответствует такая его нагрузка x_{\max} , при которой переменные потери, т. е. потери в его обмотках $a_1 x_{\max}^2$, равны постоянным потерям c_1 , т. е. потерям в магнитопроводе $a_1 x_{\max}^2 = c_1$.

Таким образом, максимуму КПД соответствует нагрузка $x_{\max} = \sqrt{\frac{c_1}{a_1}}$ или

$$k_{3\max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{ст}}{\Delta P_{кн}}} \quad (4)$$

Специалисты по электрическим машинам вообще не комментируют это положение, считая данную точку ничем не примечательной на числовом ряду x .

Авторы же [1, 2] считают, что выполнение условия (4) гарантирует минимум суммарных потерь активной мощности в трансформаторе.

Рассматривая это положение формально, заметим, что сама постановка вопроса о максимуме КПД не подразумевает минимума суммарных потерь активной мощности.

Авторов [1, 2] также не смущает и тот факт, что трансформатор как объект изучения исследуется не одним поколением электротехников, и никто из них на давал подобного толкования (4).

Между тем достаточно подставить x_{\max} в (3), чтобы убедиться, что $z = 2c_1$, т. е.

$$\Sigma \Delta P = 2\Delta P_{ст} \quad (5)$$

Возможно, авторы [1, 2] считают, что с потерями, меньшими, чем вытекающие из (5), трансформаторы не могут эксплуатироваться.

Казалось бы, для определения нагрузки, при которой действительно наступает минимум суммарных потерь активной мощности, достаточно исследовать (3)

$$z = a_1 x^2 + c_1.$$

Применяя ранее отмеченные способы к исследованию (3), получаем

$$z' = 2a_1 x.$$

Далее запишем

$$2a_1 x = 0.$$

Отсюда видим, что минимуму потерь активной мощности соответствует $x_{\min} = 0$, т. е. холостой ход трансформатора. Подставляя x_{\min} в (3), получаем

$$\sum \Delta P_{\min} = \Delta P_{\text{ст}}. \quad (6)$$

Этот вывод не противоречит здравому смыслу и опыту.

Абсолютный же минимум потерь наступает в том случае, когда обмотки трансформатора отключены от сети. Однако вряд ли можно в этом случае считать данное устройство трансформатором в общепринятом смысле.

Таким образом, можно заключить, что максимуму КПД не соответствует минимум потерь активной мощности. Максимуму КПД соответствует нагрузка x_{\max} , а минимуму потерь $x_{\min} = 0$.

При этом всегда

$$x_{\max} > x_{\min}.$$

Теперь о минимуме суммарных потерь электроэнергии в трансформаторе. Конечно, можно привести реальные потери активной энергии в трансформаторе за определенный период к виду

$$\sum \Delta W = k_3^2 \Delta P_{\text{кн}} \tau + T \Delta P_{\text{ст}}, \quad (7)$$

где τ – соответствующим образом рассчитанное время эксплуатации трансформатора под нагрузкой ($k_3 > 0$); T – время подключения обмоток трансформатора к питающей сети.

В [1] минимуму (7) соответствует нагрузка, определяемая как

$$k_{3_{\Delta W}} = \sqrt{\frac{T \Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{кн}} \tau}}. \quad (8)$$

В науке и технике действительно существует такой метод исследования, когда устанавливается какой-то критерий (допустим, оптимизации), но потом следует доказательство его состоятельности (или несостоятельности).

Трудно поверить, что, исследуя (7) на минимум, в результате получим выражение, вытекающее из (8):

$$k_{3_{\Delta W}}^2 \Delta P_{\text{кн}} \tau = T \Delta P_{\text{ст}}. \quad (9)$$

Но, подставляя (9) в (7), получаем, что $\sum \Delta W_{\min} = 2T \Delta P_{\text{ст}}$, а это противоречит опыту и здравому смыслу. Предлагая сомнительного качества критерии оптимальности в виде выражений типа (8), авторы получают результаты, противоречащие общепринятым понятиям о минимуме функций.

Заканчивая рассмотрение этого вопроса, необходимо еще раз обратить внимание на следующее существенное обстоятельство. Трансформатор, с точки зрения электротехники, – это устройство с набором пассивных элементов, обладающих r и L , в котором уровень суммарных потерь активной мощности жестко фиксирован параметром x .

При этом не может сложиться такая ситуация, когда, допустим, нагрузка определяется значением x_{\max} , а суммарные потери активной мощности соответствуют x_{\min} . Сам параметр x задается графиком потребления электроэнергии, потребителем. Соотношение же между a_1 и c_1 устанавливается на этапе его проектирования [5, 6]. Этим самым фиксируются не только значения x_{\max} и x_{\min} , но и характер (вид) зависимостей (рис. 1, 2). В процессе эксплуатации без вмешательства в его конструкцию a_1 и c_1 существенно изменяться не могут.

Таким образом, поиск каких-либо зон экономичной эксплуатации по минимуму потерь активной мощности одного трансформатора не имеет смысла. Как показано выше, такие зоны просто не существуют.

Важно подчеркнуть, что функции вида $z = a_1 x^2 + c_1$ (а именно к этой функции в конце концов обращаются авторы всех предложений при различных критериях оптимизации работы трансформатора) имеют только одну точку минимума, а именно при $x = 0$. Поиски других точек, соответствующих локальным минимумам, не дадут положительного результата, так как это противоречит законам математики.

ВЫВОД

Как следует из изложенного, максимуму КПД силового трансформатора не соответствует минимум потерь активной мощности в нем. Для находящегося в эксплуатации трансформатора не существует «так называемых зон его экономичной работы», так как конкретной величине тока в обмотках, определяемой графиком нагрузки, соответствует фиксированное, строго регламентированное значение потерь активной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фурсанов М. И. Методология и практика определения и анализа потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02/БНТУ. – Мн., 2002. – 39 с.
2. Куценко Г. Ф., Парфенов А. А. Один из методов экономии электроэнергии в трансформаторах распределительных сетей // Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: Материалы международной науч.-техн. конф. (22–23 ноября 2001 г., г. Гомель). – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2001. – С. 25–27.
3. Костенко М. П. Электрические машины. – М.; Л: ГЭИ, 1944. – 815 с.
4. Хинчин А. Я. Краткий курс математического анализа. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 623 с.
5. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
6. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 527 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 3.03.2004