Математический анализ энергоэффективности эксплуатации трансформаторов в условиях неравномерности их нагрузки

Шарифуллин В. Н., доктор техн. наук

Казанский государственный энергетический университет

Шарифуллин А. В., доктор техн. наук

Казанский научно-исследовательский технологический университет

Мардиханов А. Х., инж.

Нижнекамская ГЭС

Проведен математический анализ влияния неравномерности нагрузки трансформатора на значение его среднего КПД. Показана необходимость учета этой неравномерности с использованием полученных математических зависимостей.

Ключевые слова: трансформатор, неравномерная нагрузка, коэффициент полезного действия, математический анализ.

Существенная зависимость энергоэффективности силовых трансформаторов от нагрузки учитывается при расчете их КПД [1 – 3]. Изменение нагрузки может быть случайным или запланированным. Например, объем производства электроэнергии на ГЭС может изменяться вследствие как запланированной неравномерности производства, так и случайных факторов. Или другой пример: потребление электроэнергии промышленным предприятием и соответственно нагрузка его подстанции непрерывно изменяются в течение суток. Этот процесс можно рассматривать как случайный [4]. При такой нагрузке возникает необходимость расчета средней эффективности трансформатора за какой-то период. В настоящее время не существует обоснованных методов расчета среднего КПД трансформатора в подобных случаях. В данной статье анализируется влияние неравномерности нагрузки на энергоэффективность трансформатора и приводится методика, позволяющая учитывать это.

Вырабатываемая электроэнергия с помощью трансформаторных подстанций передается потребителям на более высоком напряжении, чем уровень, необходимый для питания промышленного оборудования, благодаря чему снижаются потери при ее передаче. Но в активных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток трансформаторов происходят потери мощности, в стали его магнитопровода — магнитные потери (примерно 0,2 – 0,5 % номинальной мощности трансформатора), вызываемые гистерезисом и вихревыми токами. Потери в медных обмотках (приблизительно 1 – 3 % номинальной мощности трансформатора при стопроцентной его загрузке) обусловлены выделением в них джоулева тепла.

Коэффициент полезного действия трансформатора представляет собой отношение отдаваемой P_2 и потребляемой P_1 мощности с учетом суммарных потерь ΔP:

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - \Delta P)/P_1 = 1 - \Delta P/(P_2 + \Delta P). \qquad (1)$$

Типовой график зависимости КПД от коэффициента загрузки β приведен на рис. 1. Ее максимум в среднем соответствует 45 % номинальной загрузки. Для описания связи КПД трансформатора η с нагрузкой P может быть использована зависимость

$$\eta = F(P) = aP^m - bP^n, \qquad (2)$$

где a и b — коэффициенты регрессии.

Эмпирические показатели степени m и n определяются по экспериментальной кривой

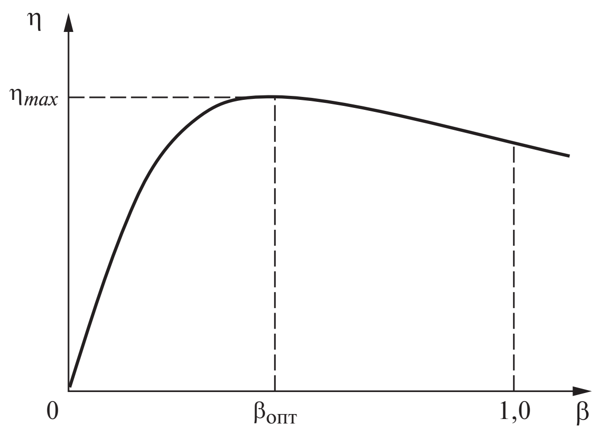

Рис. 1

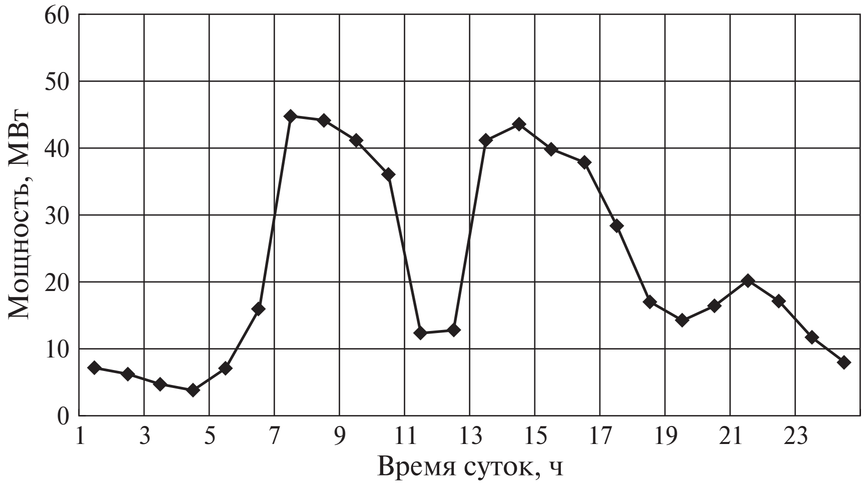

Рис. 2

$\eta = f(\beta)$. Результаты ее обработки свидетельствуют о том, что в упрощенном варианте ($m = 1$, $n = 2$) зависимость (2) имеет максимум $\eta_{max} = a^2/(2b)$ в точке $P = a/(2b)$.

По зависимости (2) рассчитывается КПД трансформатора при его фиксированной нагрузке. При случайных или полуслучайных колебаниях суточного потребления электроэнергии предприятием и соответственно нагрузки трансформатора (пример неравномерности приведен в [4] и на рис. 2) имеется в виду только средний КПД трансформатора. Поэтому при его вычислении по зависимости (2) вместо текущей мощности P подставляют среднюю мощность N. Однако согласно математической статистике [5] рассчитанное таким образом значение КПД трансформатора отличается от истинного среднего значения. Проанализируем это математически.

При случайных или полуслучайных колебаниях нагрузки трансформатора неравномерность его мощности может быть учтена функцией $f(P)$, по математическому содержанию являющейся статистической плотностью распределения вероятностей случайной величины. Физически $f(P)dP$ означает долю временнóго периода, в котором мощность трансформатора находится в пределах от P до $P + dP$. Тогда среднее значение распределения, т. е. среднюю мощность трансформатора N за этот период можно рассчитать по формуле [5]

$$N = \int_0^w Pf(P)dP. \qquad (3)$$

Эффективность трансформатора за данный период характеризуется его средним КПД H. Его математическое ожидание с учетом распределения мощности

$$H = \int F(P)f(P)dP. \qquad (4)$$

При этом средний КПД трансформатора, рассчитываемый для средней мощности по зависимости (2), и его математическое ожидание, определяемое с учетом распределения $f(P)$, не совпадают вследствие нелинейности функции $F(P)$. Очевидно, что по форме зависимость среднего КПД от средней мощности может совпадать с зависимостью $\eta = F(P)$, однако их коэффициенты могут различаться.

На основе соотношений (2 – 4) получим упрощенную зависимость для среднего КПД трансформатора с учетом распределения нагрузки:

$$\int F(P)f(P)dP = \\ = A\int Pf(P)dP + B[\int Pf(P)dP]^2, \qquad (5)$$

где A и B — эмпирические коэффициенты искомой зависимости.

Если в данное уравнение подставить выражение функции $F(P)$ из зависимости (2), получим равенство

$$a\int Pf(P)dP - b\int P^2 f(P)dP = \\ = A\int Pf(P)dP - B[\int Pf(P)dP]^2. \qquad (6)$$

Логично считать, что линейные эффекты в зависимостях (2) и (5), оцениваемые коэффициентами A и a, должны либо совпадать, либо незначительно различаться. С учетом этого, упростив равенство (6), получим формулу для расчета коэффициента B:

$$B = b[\int P^2 f(P)dP]/[\int Pf(P)dP]^2. \quad (7)$$

Выразив числитель и знаменатель этой формулы, являющиеся первым и вторым начальными моментами, через среднюю мощность N и дисперсию распределения D^2, в результате найдем:

$$B = b(1 + D^2/N^2). \quad (8)$$

Согласно данной формуле коэффициенты b и B регрессий (2) и (5) имеют существенное различие, при этом оно тем больше, чем больше дисперсия распределения (при нулевой дисперсии различия нет). Зная экспериментальную функцию распределения нагрузки трансформатора $f(P)$, с учетом формулы (7) или (8) можно рассчитать истинное значение среднего КПД трансформатора при переменной нагрузке. Достоверность полученной зависимости обоснована математической логичностью ее вывода.

Итак, математический анализ показал, что при переменной нагрузке трансформатора его средний КПД зависит не только от средней мощности, но и от функции распределения нагрузки $f(P)$, вследствие чего точка максимума среднего КПД при переменной нагрузке смещается влево относительно точки максимума КПД при постоянной нагрузке. Отношение указанных максимальных КПД трансформатора с учетом зависимости(8)

$$\eta_{max}/H_{max} = B/b = 1 + D^2/N^2. \quad (9)$$

Согласно полученному выражению максимальный КПД трансформатора при переменной нагрузке падает. Формула (7) позволяет также проанализировать влияние формы распределения нагрузки на КПД трансформатора.

Был проведен анализ работы силового трансформатора типа ТМ номинальной мощностью 400 кВ · А, обеспечивающего электроэнергией группу цехов химического предприятия. Активная нагрузка цехов существенно изменяется в течение суток, при этом средняя активная мощность трансформатора составляет 250 кВт, а среднеквадратическое отклонение распределения мощности — 35 кВт. Согласно формуле (9) отношение коэффициентов регрессии при этом $B/b = 1{,}02$, а максимум среднего КПД трансформатора уменьшается по сравнению с равномерной нагрузкой в 1,02 раза, т. е. на 2 %.

Таким образом, математический анализ влияния неравномерности нагрузки трансформатора на значение его среднего КПД показал необходимость ее учета.

Список литературы

1. **Пиотровский Л. М.** Электрические машины. — Л.: Энергия, 1972.
2. **Силовые** трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. — М.: Энергоатомиздат, 2004.
3. **Котенев С. В., Евсеев А. Н.** Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов. — М.: Горячая линия. Телеком, 2011.
4. **Шарифуллин В. Н., Шарифуллина А. В.** Нейросетевое и стохастическое прогнозирование потребления электроэнергии предприятием. — Промышленная энергетика, 2012, № 11.
5. **Гмурман В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие. — М.: Высшая школа, 2005.

vilen44@mail.ru