

## ОБ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Канд. техн. наук, доц. ГОНЧАР А. А.

*Белорусский национальный технический университет*

В технической литературе по электроснабжению, электрическим сетям и системам, связанной с выбором мощности и эксплуатацией трансформаторов, существует устойчивое мнение, заключающееся в том, что максимуму КПД якобы соответствует минимум потерь активной мощности в нем [1]. Авторитетные же ученые в области электрических машин, кроме констатации самого факта существования максимума КПД и условий, при которых он наступает, не дают более развернутых комментариев, оставляя этот вопрос без видимого внимания [2]. В действительности выражение КПД в зависимости от степени загрузки трансформатора  $k_3$  представляет кривую 3-го порядка, в которую помимо потерь активной мощности входят соответственно потребляемая и полезная активные мощности. В [3] показано, что максимуму КПД трансформатора не соответствует минимум потерь активной мощности в нем.

Интуитивно авторы регламентирующих материалов по проектированию и эксплуатации электрооборудования электроустановок все же рекомендуют обеспечивать эксплуатацию трансформаторов при нагрузках, соответствующих максимуму КПД. Попробуем дать этим рекомендациям логическое обоснование. Для этого введем понятие «удельные потери мощности в трансформаторе», т. е. потери активной мощности, соответствующие данному коэффициенту загрузки.

Выражение для удельных потерь активной мощности будет иметь вид

$$\sum \Delta p_{уд} = \frac{k_3^2 \Delta p_{кн}}{k_3 S_n \cos \varphi_2} + \frac{\Delta p_{ст}}{k_3 S_n \cos \varphi_2}, \quad (1)$$

где  $k_3$  – коэффициент загрузки трансформатора;  $\Delta p_{кн}$  – потери мощности в режиме короткого замыкания трансформатора;  $S_n$  – номинальная мощность трансформатора;  $\cos \varphi_2$  – коэффициент мощности нагрузки;  $\Delta p_{ст}$  – потери мощности в стали магнитопровода трансформатора.

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

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

где  $y = \sum \Delta p_{уд}$ ;  $a = \frac{\Delta p_{кн}}{S_n \cos \varphi_2}$ ;  $b = \frac{\Delta p_{ст}}{S_n \cos \varphi_2}$ ;  $x = k_3$ .

Естественно,  $a$ ,  $b$ ,  $x$  – положительные величины.

При исследовании (2) ограничимся изменением  $x$  в пределах  $1 \geq x > 0$ , что соответствует загрузке трансформатора от холостого хода до его номинального значения.

Первая составляющая выражения (2) – удельные потери мощности в меди (обмотках) – изменяется линейно с увеличением нагрузки с начала координат.

Вторая составляющая – удельные потери мощности в стали, изменяющаяся по гиперболическому закону и асимптотически приближающаяся к осям  $x$  и  $y$ .

Графически зависимость (2) представляет кривую, близкую к  $U$ -образной кривой, асимметричную относительно вертикальной оси, проходящую через точку  $x_0$  (рис. 1). Действительно, исследование (2) на минимум дает следующий результат:

$$y' = a - \frac{b}{x^2} = 0; \quad x_0 = \sqrt{\frac{b}{a}} \quad \text{или} \quad k_{30} \sqrt{\frac{\Delta p_{ст}}{\Delta p_{кн}}}. \quad (3)$$

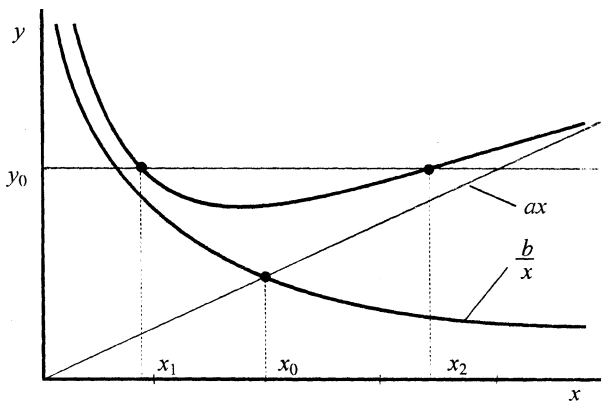


Рис. 1. Изменение удельных потерь мощности трансформатора

Таким образом, максимуму КПД трансформатора соответствует минимум удельных потерь активной мощности, и эксплуатация трансформатора при выполнении этих условий желательна при коэффициентах загрузки  $k_{30} = x_0$  или близких к нему. Особенность  $U$ -образных кривых заключается в том, что некоторому конкретному значению  $y$  соответствуют два действительных значения  $x$  ( $x_1 < x_0$  и  $x_2 > x_0$ ).

В связи с неравномерностью графика потребления электроэнергии в течение как суток, так и года весьма проблематична длительная эксплуатация трансформатора с загрузкой, определяемой (3).

В связи с этим необходимо определить область предпочтительной работы трансформатора в условиях меняющегося коэффициента загрузки.

Видно, что левая составляющая зависимости (2) изменяется резче, чем правая, т. е. скорость изменения удельных потерь активной мощности в левой части больше, чем в правой. Покажем, что производные левой части кривой по абсолютному значению больше производных правой части. Для этого примем величину удельных потерь мощности равной  $y_0$

$$y_0 = ax + \frac{b}{x} \text{ или } ax^2 - y_0x + b = 0.$$

Корни этого уравнения соответственно  $x_1$  и  $x_2$  связаны соотношением

$$x_1x_2 = \frac{b}{a}, \text{ откуда } x_2 = \frac{b}{ax_1}. \quad (4)$$

Абсолютные значения производных в точках  $x_1$  и  $x_2$ :

$$|y'(x_1)| = \left| a - \frac{b}{x_1^2} \right| = \frac{b}{x_1^2} - a;$$

$$|y'(x_2)| = \left| a - \frac{b}{x_2^2} \right| = a - \frac{a^2}{b} x_1^2.$$

При этом значение  $x_2$  принято из (4). Тогда разность абсолютных значений производных имеет вид

$$|\Delta y'| = |y'(x_1)| - |y'(x_2)| = \frac{b}{x_1^2} - 2a + \frac{a^2}{b} x_1^2. \quad (5)$$

Далее (5) можно преобразовать к виду

$$|\Delta y'| = a \left( \frac{b}{a} \frac{1}{x_1^2} + \frac{a}{b} x_1^2 - 2 \right) = a \left( \sqrt{\frac{b}{a}} \frac{1}{x_1} - \sqrt{\frac{a}{b}} x_1 \right)^2 > 0.$$

Окончательно выражение (5) имеет вид

$$|\Delta y'| = \frac{\Delta p_{\text{кн}}}{s_{\text{н}} \cos \varphi_2} \left( \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{ст}}}{\Delta p_{\text{кн}}}} \frac{1}{k_{31}} - \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{кн}}}{\Delta p_{\text{ст}}}} k_{31} \right)^2 > 0,$$

где  $k_{31} = x_1$  – коэффициент загрузки, соответствующий левой части  $U$ -образной кривой.

Таким образом,  $|\Delta y'|$  на начальном участке (до  $x_0$ ) больше, чем на поднимающейся части ветви, и эксплуатация трансформатора в связи с этим эффективнее на правой части  $U$ -характеристики.

Конкретные расчеты для трансформаторов одинаковой номинальной мощности и прочих равных условий показали, что в трансформаторах более поздних выпусков точка  $x_0$  смещается влево. Это, видимо, можно объяснить применением стали более высокого качества.  $U$ -образные же кривые для трансформаторов ранних выпусков располагаются выше аналогичных кривых для трансформаторов поздних выпусков. Для трансформаторов

большей номинальной мощности они располагаются ниже, чем для трансформаторов меньших номинальных мощностей.

## ВЫВОД

Максимуму КПД трансформатора соответствует минимум удельных потерь мощности, а не минимум потерь активной мощности. Показано, что эксплуатация трансформатора предпочтительна в областях за минимумом удельных потерь мощности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: Материалы международного. науч.-техн. конф., 22–23 нояб. 2001 г. – Гомель, 2001. – 123 с.
2. Костенко М. П. Электрические машины. – М.; Л.: ГЭИ, 1944. – 815 с.
3. Гончар А. А. Максимум коэффициента полезного действия и минимум потерь в трансформаторе // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1991. – № 7. – С. 43–45.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 28.01.2003

УДК 621.312

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СИСТЕМНОГО ВЕТРОАГРЕГАТА

Канд. техн. наук, доц. ОЛЕШКЕВИЧ М. М., инж. МАКОСКО Ю. В.

*Белорусский национальный технический университет*

Неравномерность и непостоянство ветрового потока как носителя энергии определяют трудности, возникающие при работе ветроагрегата, а также особенности режимов работы электрогенераторов ветроэлектрических установок. По этим причинам практически все серийно выпускаемые ветроэлектрические установки снабжаются асинхронным генератором с короткозамкнутым ротором. Такой асинхронный генератор характеризуется простотой конструкции, надежностью, относительно невысокой стоимостью, а также отсутствием проблем синхронизации с энергосистемой. В настоящее время достаточно широко исследованы пусковые режимы ветроэлектрических установок с асинхронным генератором, однако квазиустановившиеся режимы, являющиеся основными рабочими режимами ветроэлектрических установок, все еще требуют изучения.

Практически в течение всего времени в выработке электроэнергии ветроагрегатом наблюдаются порывы и пульсации скорости ветра, которые