

Об уточнении расчетных выражений при определении составляющих технических потерь электроэнергии при ее передаче

Вуколов В. Ю., инж., Татаров Е. И., Шарыгин М. В., кандидаты техн. наук

Нижегородский инвестиционный центр энергоэффективности-НН

Одним из направлений повышения энергетической эффективности деятельности территориальных сетевых организаций является снижение доли нетехнических потерь в отчетных (фактических) потерях за счет правильного расчета составляющих технологических потерь электроэнергии (ТПЭ) при ее передаче. Проанализированы отдельные выражения действующей методики расчета ТПЭ и предложены варианты их уточнения.

Ключевые слова: потери электроэнергии, методика, недостатки, анализ.

Практика применения действующей в настоящее время Инструкции по расчету нормативов ТПЭ [1] позволяет сформулировать ряд предложений по дальнейшему совершенствованию расчетных выражений, используемых при их вычислении. Эти предложения направлены на уточнение выражений для расчета:

значения потерь холостого хода силовых трансформаторов;

параметров схем замещения многообмоточных трансформаторов;

параметров схем замещения однофазных трансформаторов;

значения нагрузочных потерь.

Исходные расчетные выражения, содержащиеся в методике, в статье не приводятся, но сохраняется их нумерация в соответствии с [1]. Новым вариантам расчетных выражений присвоены свои порядковые номера.

1. В [1] потери холостого хода силовых трансформаторов (автотрансформаторов), кВт·ч, предлагается определять из выражения

$$\Delta W_x = \Delta P_x \sum_{i=1}^m T_{pi} \left(\frac{U_i}{U_{ном}} \right)^2, \quad (1)$$

где ΔP_x — потери холостого хода трансформатора; i — номер режима; U_i — напряжение в узле подключения на высшей стороне трансформатора в i -м режиме, кВ; T_{pi} — число часов работы трансформатора в i -м режиме, ч; $U_{ном}$ — номинальное напряжение обмотки высшего напряжения (ВН), кВ.

В отечественном трансформаторостроении силовые понижающие трансформаторы мощностью несколько киловольтампер и выше снабжаются устройствами регулирования вторичного напряжения типов ПБВ и РПН. Благодаря их использованию при изменении напряжения в узле подключения трансфор-

матора в пределах регулировочного диапазона и правильном выборе уставки переключателя напряжение на вторичных обмотках, не имеющих регулировочных ответвлений, может оставаться номинальным. Как известно [2], сохранение постоянного значения напряжения на вторичной обмотке, не имеющей регулировочных ответвлений, возможно лишь при неизменном значении напряженности магнитного поля B_m . Следствием стабильности B_m в свою очередь является сохранение постоянства общих потерь в стали (потерь холостого хода) $P_c = P_\Gamma + P_{в.т}$, представляющих собой сумму потерь от гистерезиса P_Γ и от вихревых токов $P_{в.т}$ [3].

Покажем, что в зависимости от типа устройства (ПБВ или РПН), регулирующего коэффициент трансформации оборудования, влияние уровня напряжения в точке подключения трансформатора на значение потерь холостого хода должно либо быть скорректировано с учетом положения регулятора, либо исключено. Применение указанных средств регулирования коэффициента трансформации понижающих трансформаторов характеризуется следующими особенностями:

положение регулятора меняют не чаще 2 раз в год (сезонное регулирование напряжения на трансформаторах с ПБВ);

изменяя положение РПН в соответствии с его конструктивными возможностями, осуществляют встречное регулирование напряжения, обеспечивая в том числе номинальный режим работы магнитной системы трансформатора.

В связи с этим методика расчета потерь холостого хода силовых трансформаторов ΔW_x , кВт·ч, должна содержать два выражения, относящихся соответственно к трансформаторам без РПН и с РПН. Первое выражение учитывает влияние напряжения в

Таблица 1

Подразделение	Всего трансформаторов	Трансформаторы 110 кВ			Трансформаторы 35 кВ		
		Всего	С РПН	С ПБВ	Всего	С РПН	С ПБВ
Филиал МРСК	491	282	251	31	209	82	127
	В процентах	100	89	11	100	39	61

узле подключения трансформатора без РПН и положение регулятора ПБВ:

$$\Delta W_x = \Delta P_x \sum_{i=1}^m T_{pi} \left[\frac{U_i}{U_{ном} \left(1 \pm \frac{\Delta U_i}{100} \right)} \right]^2, \quad (2)$$

где ΔU_i — относительное значение напряжения, прибавляемого (вычитаемого) к номинальному напряжению обмотки ВН в i -м режиме, %.

Второе выражение учитывает независимость потерь холостого хода трансформатора с РПН от подведенного ВН, поскольку территориальная сетевая организация обязана полностью использовать технические возможности эксплуатируемой техники:

$$\Delta W_x = \Delta P_x T_p, \quad (3)$$

где T_p — число часов работы трансформатора в базовом режиме, ч.

Выражение (1) следует применять для расчетов потерь всех распределительных трансформаторов с высшим напряжением 6–10 кВ. Статистика одной из крупных сетевых компаний показывает (см. табл. 1, где приведено распределение устройств РПН и ПБВ по трансформаторам), что из числа понижающих трансформаторов с высшим напряжением 35 кВ почти 60 % снабжены устройствами ПБВ или не имеют регуляторов, поэтому для этой группы трансформаторов можно использовать выражение (2).

Для расчетов потерь в трансформаторах 35–110 кВ, имеющих РПН на стороне ВН, выражением (3) следует пользоваться выборочно.

Предложенный подход позволяет не учитывать влияние на потери электроэнергии средств регулирования напряжения на автотрансформаторах, не имеющих устройств ПБВ. Наличие ПБВ на обмотке среднего напряжения (СН) понижающих трехобмоточных трансформаторов, дополняющих РПН на стороне ВН, также не должно приниматься во вни-

мание. Это устройство реализует смещение уровня напряжения на выводах обмотки СН относительно уровня напряжения обмотки НН и никак не связано с изменением режима работы магнитной системы трансформатора, полностью определяемого функционированием РПН на обмотке ВН.

Таким образом, предложенные расчетные выражения позволяют учесть влияние устройств регулирования напряжения в зависимости от конструктивных особенностей регуляторов и специфики их применения. Поправка при использовании уточненного выражения к трансформаторам с ПБВ может изменять результаты расчетов не более чем на 10 %.

2. В комментарии к расчетным выражениям (11) и (12) [1] объекты определены как “трехобмоточные трехфазные трансформаторы с обмотками различной номинальной мощности”. На самом деле это трехфазные автотрансформаторы, поскольку выражение (12) представлено как “коэффициент выгодности автотрансформатора” и поэтому не может использоваться применительно к трансформаторам.

Значения $\Delta P_{к(i-j)}$ либо соответствуют номинальным значениям токов, получаемых в опытах КЗ при равенстве номинальных мощностей обмоток i и j номинальной мощности трансформатора, либо ограничиваются характеристиками обмотки с наименьшей номинальной мощностью. В последнем случае требуется их приведение к номинальной мощности трансформатора (для понижающих трансформаторов — к мощности обмотки ВН). Соотношения мощностей и коэффициенты приведения мощности потерь КЗ к номинальной мощности трансформатора представлены в табл. 2, аналогичной табл. 11 [1] для тех же соотношений номинальных мощностей обмоток.

Другой возможный способ определения коэффициентов приведения (отн. ед.) — применение универсальных расчетных выражений, пригодных в том числе и для гипотети-

Таблица 2

Мощность обмоток трансформатора по отношению к номинальной, %			Расчетное выражение для определения коэффициента приведения мощности потерь КЗ			Численное значение коэффициента приведения мощности потерь КЗ, отн. ед.		
S_B	S_C	S_H	$\Delta P_{K(B-C)}$	$\Delta P_{K(B-H)}$	$\Delta P_{K(C-H)}$	k_1	k_2	k_3
			k_1	k_2	k_3			
100	100	100	—	—	—	1,00	1,00	1,00
100	67	100	S_C/S_B	—	S_C/S_B	0,67	1,00	0,67
100	100	67	S_C/S_B	S_H/S_B	S_H/S_B	1,00	0,67	0,67
100	67	67	S_C/S_B	S_H/S_B	S_H/S_B	0,67	0,67	0,67
100	100	50	S_C/S_B	S_H/S_B	S_H/S_B	1,00	0,50	0,50
100	50	50	S_C/S_B	S_H/S_B	S_H/S_B	0,50	0,50	0,50
100	100	33	S_C/S_B	S_H/S_B	S_H/S_B	1,00	0,33	0,33

ческого случая, когда номинальные мощности всех трех обмоток различаются:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{S_{C.HOM}}{S_{B.HOM}}; \quad k_2 = \frac{S_{H.HOM}}{S_{B.HOM}}; \\ k_3 &= \frac{\min(S_{C.HOM}, S_{H.HOM})}{S_{B.HOM}}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

С учетом изложенного система уравнений (11) [1] для расчета активных сопротивлений, Ом, схемы замещения трехобмоточных трансформаторов с различными номинальными мощностями обмоток преобразуется к виду:

$$\left. \begin{aligned} R_{T.B} &= \frac{U_{B.HOM}^2}{2S_{HOM}^2} \times \left(\frac{\Delta P_{K(B-C)}}{k_1^2} + \frac{\Delta P_{K(B-H)}}{k_2^2} - \frac{\Delta P_{K(C-H)}}{k_3^2} \right) \cdot 10^{-3}; \\ R_{T.C} &= \frac{U_{B.HOM}^2}{2S_{HOM}^2} \times \left(\frac{\Delta P_{K(B-C)}}{k_1^2} + \frac{\Delta P_{K(C-H)}}{k_3^2} - \frac{\Delta P_{K(B-H)}}{k_2^2} \right) \cdot 10^{-3}; \\ R_{T.H} &= \frac{U_{B.HOM}^2}{2S_{HOM}^2} \times \left(\frac{\Delta P_{K(B-H)}}{k_2^2} + \frac{\Delta P_{K(C-H)}}{k_3^2} - \frac{\Delta P_{K(B-C)}}{k_1^2} \right) \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Комментарий к выражению (13) [1], описывающий способ определения активных сопротивлений схемы замещения трансформатора (автотрансформатора) с числом обмоток более двух в случае, когда известно лишь одно из трех значений $\Delta P_{K(i-j)}$, должен быть дополнен напоминанием о необходимости проверки приведения известного значения к номинальным параметрам оборудования. Расчетное выражение для определения сквозного сопротивления, Ом, должно иметь вид

$$R_{СКВ} = \frac{\Delta P_{K(i-j)} U_{B.HOM}^2}{S_{HOM}^2} \cdot 10^{-3}. \quad (6)$$

3. Особенность расчета параметров схем замещения группы однофазных трансформаторов и автотрансформаторов (двух- и многообмоточных) состоит в том, что опыты КЗ проводятся с каждым однофазным аппаратом в отдельности. При этом такие параметры, как токи и напряжения однофазного трансформатора, соответствуют условиям его работы в штатном режиме в составе трехфазной группы однофазных аппаратов, а номинальные мощности обмоток трехфазной группы получаются сложением номинальных мощностей отдельных аппаратов. Это относится и к значениям мощности потерь КЗ.

В случае двухобмоточных однофазных трансформаторов, образующих трехфазную группу, активное сопротивление, Ом на фазу, следует определять по формуле

$$R_T = \frac{(3\Delta P_K)U_{НОМ}^2}{(3S_{НОМ.Т})^2} \cdot 10^{-3} = \frac{\Delta P_K U_{НОМ}^2}{3S_{НОМ.Т}^2} \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Активные сопротивления, Ом, схем замещения трехобмоточных однофазных трансформаторов (автотрансформаторов), образующих трехфазную группу, необходимо вычислять так же, как сопротивления аналогичных трехфазных аппаратов в соответствии с объемом имеющейся информации. Если известны три значения $\Delta P_{K(i-j)}$, то для трансформатора с обмотками, имеющими одинаковые номинальные мощности,

$$\left. \begin{aligned} R_{Т.В} &= \frac{U_{В.НОМ}^2}{6S_{НОМ}^2} \times \\ &\times (\Delta P_{K(В-Н)} + \Delta P_{K(В-С)} - \Delta P_{K(С-Н)}) \cdot 10^{-3}; \\ R_{Т.С} &= \frac{U_{В.НОМ}^2}{6S_{НОМ}^2} \times \\ &\times (\Delta P_{K(В-С)} + \Delta P_{K(С-Н)} - \Delta P_{K(В-Н)}) \cdot 10^{-3}; \\ R_{Т.Н} &= \frac{U_{В.НОМ}^2}{6S_{НОМ}^2} \times \\ &\times (\Delta P_{K(В-Н)} + \Delta P_{K(С-Н)} - \Delta P_{K(В-С)}) \cdot 10^{-3}; \end{aligned} \right\} (8)$$

для трансформатора с обмотками, имеющими разные номинальные мощности,

$$\left. \begin{aligned} R_{Т.В} &= \frac{U_{В.НОМ}^2}{6S_{НОМ}^2} \times \\ &\times \left(\frac{\Delta P_{K(В-С)}}{k_1^2} + \frac{\Delta P_{K(В-Н)}}{k_2^2} - \frac{\Delta P_{K(С-Н)}}{k_3^2} \right) \cdot 10^{-3}; \\ R_{Т.С} &= \frac{U_{В.НОМ}^2}{6S_{НОМ}^2} \times \\ &\times \left(\frac{\Delta P_{K(В-С)}}{k_1^2} + \frac{\Delta P_{K(С-Н)}}{k_3^2} - \frac{\Delta P_{K(В-Н)}}{k_2^2} \right) \cdot 10^{-3}; \\ R_{Т.Н} &= \frac{U_{В.НОМ}^2}{6S_{НОМ}^2} \times \\ &\times \left(\frac{\Delta P_{K(В-Н)}}{k_2^2} + \frac{\Delta P_{K(С-Н)}}{k_3^2} - \frac{\Delta P_{K(В-С)}}{k_1^2} \right) \cdot 10^{-3}, \end{aligned} \right\} (9)$$

где значения k_1, k_2, k_3 определяются из выражения (4);

для автотрансформатора

$$\left. \begin{aligned} R_{Т.В} &= \frac{U_{В.НОМ}^2}{6S_{НОМ}^2} \times \\ &\times \left(\frac{\Delta P_{K(В-Н)}}{\alpha^2} + \Delta P_{K(В-С)} - \frac{\Delta P_{K(С-Н)}}{\alpha^2} \right) \cdot 10^{-3}; \\ R_{Т.С} &= \frac{U_{В.НОМ}^2}{6S_{НОМ}^2} \times \\ &\times \left(\Delta P_{K(В-С)} + \frac{\Delta P_{K(С-Н)}}{\alpha^2} - \frac{\Delta P_{K(В-Н)}}{\alpha^2} \right) \cdot 10^{-3}; \\ R_{Т.Н} &= \frac{U_{В.НОМ}^2}{6S_{НОМ}^2} \times \\ &\times \left(\frac{\Delta P_{K(В-Н)}}{\alpha^2} + \frac{\Delta P_{K(С-Н)}}{\alpha^2} - \Delta P_{K(В-С)} \right) \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \right\} (10)$$

Если известно одно значение $\Delta P_{K(i-j)}$, то после приведения (в случае необходимости) этой величины к параметрам первичной обмотки с использованием коэффициента приведения α (для автотрансформаторов) или k_i (для трансформаторов) определяется значение сквозного сопротивления, Ом на фазу,

$$R_{Т.СКВ} = \frac{\Delta P_{K(i-j)} U_{В.НОМ}^2}{3S_{НОМ.Т}^2} \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

с последующим нахождением значений активных сопротивлений $R_{Т.В}, R_{Т.С}, R_{Т.Н}$ в соответствии со значениями в табл. 2.

4. В выражениях (17) и (25) [1] для определения значений нагрузочных потерь в автотрансформаторах и трехобмоточных трансформаторах соответственно методом оперативных расчетов и методом средних нагрузок предлагается использование напряжений, соответствующих уровню номинальных напряжений обмоток реальных трансформаторов. Это приводит к существенному завышению потерь в сопротивлениях схемы замещения, соответствующих обмоткам на средней и низкой сторонах, поскольку сами сопротивления схем замещения рассчитаны с учетом приведения к номинальным значениям мощности и напряжения обмотки ВН понижающего трансформатора (автотрансформатора). С учетом поправок выражения (17) и (25) [1] будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta W_{Hj} &= \sum_{j=1}^M 3(I_{ат(Т)Вj}^2 R_{ат(Т)В} + \\ &+ I_{ат(Т)Сj}^2 R_{ат(Т)С} + I_{ат(Т)Нj}^2 R_{ат(Т)Н}) \Delta t_j \cdot 10^{-3} = \end{aligned}$$

$$= \sum_{j=1}^M \left(\frac{P_{\text{ат(Т)В}j}^2 + Q_{\text{ат(Т)В}j}^2}{U_{\text{ат(Т)В}j}^2} R_{\text{ат(Т)В}j} + \frac{P_{\text{ат(Т)С}j}^2 + Q_{\text{ат(Т)С}j}^2}{U_{\text{ат(Т)В}j}^2} R_{\text{ат(Т)С}j} + \frac{P_{\text{ат(Т)Н}j}^2 + Q_{\text{ат(Т)Н}j}^2}{U_{\text{ат(Т)В}j}^2} R_{\text{ат(Т)Н}j} \right) \Delta t_j \cdot 10^3; \quad (12)$$

$$= R \sum_{j=1}^M \left(\frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} \Delta t_j \right) \cdot 10^3. \quad (14)$$

В выражении (22) [1] для определения $\Delta P_{\text{ср}}$, кВт, пропущен множитель в средней его части. С учетом поправки рассматриваемое выражение примет вид

$$\Delta P_{\text{ср}} = 3I_{\text{ср}}^2 R \cdot 10^{-3} = \frac{P_{\text{ср}}^2 + Q_{\text{ср}}^2}{U_{\text{ср}}^2} R \cdot 10^3 = \frac{P_{\text{ср}}^2 (1 + \text{tg}^2 \varphi)}{U_{\text{ср}}^2} R \cdot 10^3. \quad (15)$$

В выражении (27) [1] целесообразно изменить запись некоторых символьных индексов. Тогда с учетом поправок получим, кВт · ч:

$$\Delta P_{\text{нТОРср}} = 3\Delta P_{\text{номТОР}} \left(\frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{ном}}} \right)^2. \quad (16)$$

При этом индекс определяемой величины будет иметь вид, в котором он используется в выражении (26) [1].

В числителях выражений (55) и (56) [1] пропущен знак “Δ”. Приняв это во внимание, получим:

$$\Delta W_{\text{погр.Б, \%}} = \frac{\Delta W_{\text{погр.Б}} \cdot 100}{W_{\text{ос.Б}}}; \quad (17)$$

$$\Delta W_{\text{погр.Б, \%}} = \frac{\Delta W_{\text{погр.Б}} \cdot 100}{W_{\text{отп.Б}}}. \quad (18)$$

Комментарии к этим выражениям могут быть дополнены положением об их пригодности для определения нагрузочных потерь методом оперативных расчетов и методом средних нагрузок в группах из однофазных трансформаторов (автотрансформаторов).

Помимо уточнения рассмотренных выражений предлагается устранить ряд имеющихся в [1] опечаток.

В выражении (16) [1] каждое значение индекса j соответствует интервалу времени с неизменной токовой нагрузкой. Поэтому данный индекс не может быть использован в левой части выражения. С учетом поправки выражение для определения нагрузочных потерь, кВт · ч, можно представить следующим образом:

$$\Delta W_{\text{н}} = 3R \sum_{j=1}^M (I_j^2 \Delta t_j) \cdot 10^{-3} =$$

В заключение следует отметить, что предложенные уточнения и поправки к расчетным выражениям Инструкции [1] позволят повысить точность расчета нормативов технологических потерь электроэнергии.

Список литературы

1. **Инструкция** по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям (утверждена приказом Минэнерго РФ от 30.12.2008 № 326).
2. **Петров Г. Н.** Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы: Учеб. для вузов. — М.: Энергия, 1974.
3. **Пиотровский Л. М.** Электрические машины: Учеб. для техникумов. Изд. 7-е, стереотипное. — М.-Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1974.