

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗНОСА ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Бобомурод Курбонович Авазов

Ташкентский государственный транспортный университет, ассистент

Сардор Бобоярович Нуриддинов

Ташкентский государственный транспортный университет, ассистент

Фозил Фарход ўғли Хасанов

Ташкентский государственный транспортный университет, ст. пред.

Каримберди Тавбаевич Қаршиев

Ташкентский государственный транспортный университет, ассистент

ВВЕДЕНИЕ

Содержание технических средств железнодорожного транспорта на высоком эксплуатационном уровне, обеспечивающем безопасность движения поездов и высокую эффективность процесса перевозок, невозможно без объективной информации об их фактическом состоянии. Объекты железнодорожного транспорта содержат большое количество устройств, длительная эксплуатация которых без надлежащего диагностирования технического состояния может привести к выходу их из строя и значительному материальному ущербу. Для реализации эффективного диагностирования этих устройств необходимы современные методики и технические средства контроля.

ЛИТЕРАТУРА И МЕТОДОЛОГИЯ

Одним из наиболее дорогостоящих и ответственных элементов системы тягового электроснабжения являются силовые трансформаторы: тяговые (СТ) и районные понизительные (РПТ). Многие из этих трансформаторов отработали нормативный ресурс. Процедуры оценки состояния изношенных трансформаторов находятся на стадии становления. В дистанциях электроснабжения филиалов ОАО «УзЖД» имеется современная вычислительная техника, которая обеспечивает информационную поддержку функционирования железной дороги. В частности, внедрение автоматизированных систем

учета электроэнергии позволяет в режиме реального времени получать информацию о получасовых расходах активной и реактивной электроэнергии на тягу поездов и по вводам распределительных устройств районных потребителей 6 - 10 кВ. Эта информация может быть использована для мониторинга состояния силовых трансформаторов.

При мониторинге целесообразно контролировать следующие параметры:

- кратность и длительность перегрузки;
- степень несимметрии токов;
- температуры наиболее нагретой точки масла и обмоток;
- степень старения витковой изоляции;
- состав газов, выделяющихся при неисправностях с помощью хроматографического анализа;
- потери электрической энергии.

Структура системы мониторинга СТ и РПТ представлена на рис. 1. В качестве исходной информации для определения степени старения витковой изоляции используются данные о полу часовых расходах электроэнергии и показания датчиков температуры. Определение остаточного ресурса изоляции осуществляется по методике, изложенной в работе [1].

Общий износ изоляции обмоток состоит из динамического и теплового износов, взятых со своими весовыми коэффициентами. Определение этих коэффициентов представляет собой трудоемкую задачу, требующую большого статистического материала за продолжительное время. Такой материал может быть получен на основе систем мониторинга. По мере накопления статических массивов будет совершенствоваться и сама модель оценки состояния витковой изоляции.

В задаче контроля износа витковой изоляции трансформатора есть два существенных аспекта: исходные данные представлены в виде получасовых значений расхода активной и реактивной электроэнергии по трехфазным вводам; тяговая нагрузка характеризуется существенной несимметрией.

Первый аспект ввиду малой постоянной времени нагрева обмотки (порядка 6 мин) обуславливает необходимость перехода к эффективным получасовым значениям тока, а второй аспект требует пофазного учета нагрузок. Одному из возможных путей преодоления этих трудностей и посвящена настоящая статья.

Ограничивая рассмотрение наиболее распространенными трехфазными трехобмоточными трансформаторами, можно определить связь эффективной

(нагревающей) мощности сетевой обмотки со средними значениями мощностей тяговой и районной обмоток по формулам работы [2]:

$$P_{Эв} = + P_{срТ}^2 \sqrt{(P_{срТ} + P_{срР})^2 + [P_{срТ}^2(k_{фАТ}^2 - 1) + P_{срР}^2(k_{фАР}^2 - 1)]} \quad (1);$$

$$Q_{Эв} = + Q_{срТ}^2 \sqrt{(Q_{срТ} + Q_{срР})^2 + [Q_{срТ}^2(k_{фАТ}^2 - 1) + Q_{срР}^2(k_{фАР}^2 - 1)]} \quad (2).$$

где, $P_{Эв}$, $Q_{Эв}$ – эффективные активные и реактивные мощности сетевой обмотки, $P_{срТ}$, $P_{срР}$, $Q_{срТ}$, $Q_{срР}$ – средние активные и реактивные мощности соответственно тяговой и районной обмоток; $k_{фАТ}$, $k_{фРТ}$, $k_{фАР}$, $k_{фРР}$ – получасовые коэффициенты формы графиков активных и реактивных нагрузок соответственно тяговой и районной обмоток. Значения коэффициентов формы тяговой нагрузки определяются графиками движения поездов и в рамках задачи моделирования износа изоляции считаются внешними данными. Получасовые коэффициенты формы районной нагрузки ввиду сравнительной ее стабильности целесообразно принять равными единице. Формулы (1) и (2) необходимо применять для каждой фазы отдельно; значения на пряхений разных фаз можно считать одинаковыми, а токи фаз тяговой обмотки можно получить по формулам, аналогичным приведенным в работе [1].

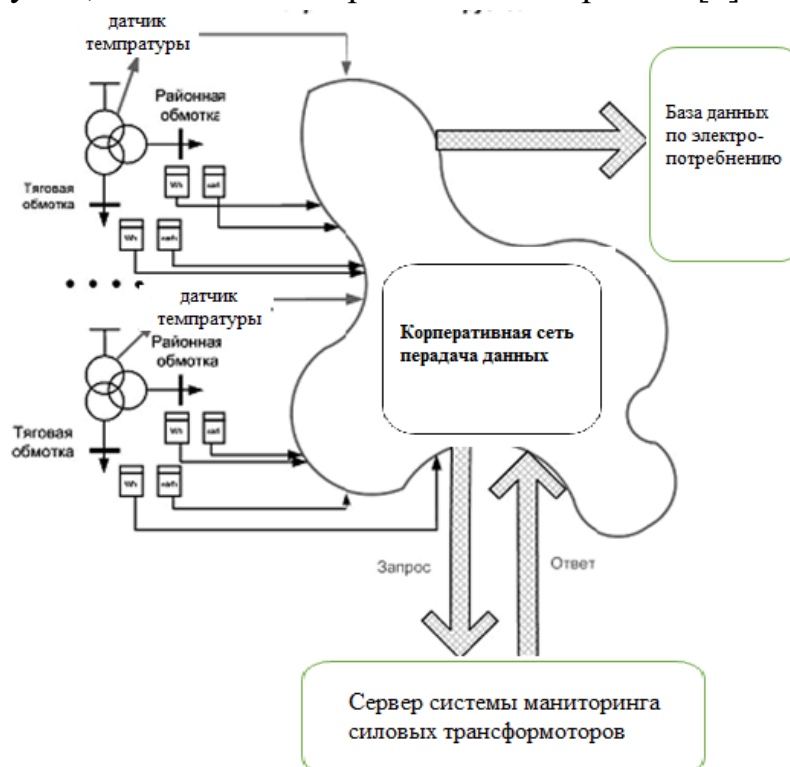


Рис. 1. Структура системы мониторинга тяговых трансформаторов.

На рис. 2 показана схема трехфазного трансформатора без отображения районной обмотки, нагрузка которой предполагается симметричной. При отсчетах фаз относительно фазы AX сетевой обмотки формулы для напряжений и токов фаз записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U e^{j0} ; \quad \dot{U}_{II} = U_T e^{-j60} = U_T (0.5 - j 0.866); \\ \dot{U}_{CA} &= U_T e^{j180} = -U_T ; \\ \dot{U}_{ab} &= U_T e^{j60} = U_T (0.5 + j 0.866); \\ \dot{U}_{bc} &= U_T e^{-j60} = U_T (0.5 - j 0.866); \end{aligned}$$

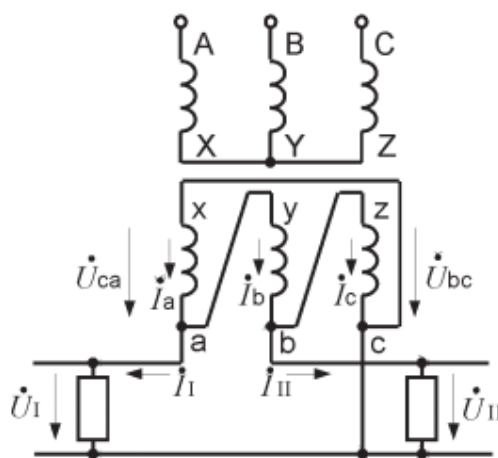


Рис. 2. Схема трехфазного трансформатора

$$\begin{aligned} \dot{i}_a &= \frac{2}{3} \dot{I}_I + \frac{1}{3} \dot{I}_{II} ; \quad \dot{i}_b = -\frac{1}{3} \dot{I}_I + \frac{1}{3} \dot{I}_{II} ; \quad \dot{i}_c = -\frac{1}{3} \dot{I}_I - \frac{2}{3} \dot{I}_{II} ; \\ \dot{i}_a &= \dot{I}_I + jI'_I = k_I \frac{P_T - jQ_T}{U_T} \\ \dot{I}_{II} &= I'_{II} + jI''_{II} = k_{II} \frac{0.5P_T - 0.866Q_T - j(0.866P_T + 0.5Q_T)}{U_T} \end{aligned}$$

где S_T , P_T , Q_T – полная, активная и реактивная мощности по вводу 27.5 кВ, k_I , k_{II} – коэффициенты распределения мощности ввода 27.5 кВ по плечам питания; остальные величины обозначены на рис. 2. Получить эти коэффициенты можно посредством использования программного комплекса имитационного моделирования систем тягового электроснабжения FAZONORD, разработанного в Иркутском государственном университете путей сообщения [3]. С помощью комплекса FAZONORD на основе данных о поездной работе следует выполнить

имитацию работы рассматриваемого участка, что позволит определить искомые коэффициенты.

Токи фаз тяговой обмотки можно найти следующим образом:

$$I'_a = \frac{2k_I P_T + k_{II}(0.5P_T - 0.866Q_T)}{3U_T}$$

$$I''_a = \frac{-2k_I Q_T - k_{II}(0.866Q_T + 0.5P_T)}{3U_T}$$

$$I'_b = \frac{-k_I P_T + k_{II}0.5P_T - k_{II}0.866Q_T}{3U_T}$$

$$I''_b = \frac{k_I Q_T - k_{II}0.866P_T - 0.5k_{II}P_T}{3U_T}$$

$$I'_c = \frac{-k_I P_T - k_{II}0.5P_T + 1.732k_{II}Q_T}{3U_T}$$

$$I''_c = \frac{k_I Q_T + 1.732k_{II}P_T + k_{II}Q_T}{3U_T}$$

а мощности фаз определяются равенствами следующего вида:

$$\dot{S}_{Ta} = \dot{S}_{Tac} = P_{Ta} + jQ_{Ta} = -U_T(I'_a - jI''_a);$$

$$\dot{S}_{Tb} = \dot{S}_{Tab} = U_T(0.5I'_b + 0.866jI''_b) + jU_T(0.5I'_b - 0.866jI''_b);$$

$$\dot{S}_{Tc} = \dot{S}_{Tbc} = U_T(0.5I'_c - 0.866jI''_c) + jU_T(-0.5I'_c - 0.866jI''_c);$$

С учетом смены знаков при приведении генерации тяговой обмотки к нагрузке сетевой обмотки можно записать.

$$P_{Ta} = \frac{1}{3} [2k_I P_T + k_{II}(0.5P_T - 0.866 Q_T)]; \quad (3)$$

$$Q_{Ta} = \frac{1}{3} [2k_I Q_T + k_{II}(0.5P_T + 0.5 Q_T)]; \quad (4)$$

$$P_{Tb} = \frac{1}{3} [k_I(0.5P_T - 0.866 Q_T) - k_{II}P_T] \quad (5)$$

$$Q_{Tb} = \frac{1}{3} [k_I(0.866 Q_T + 0.5Q_T) + k_{II}Q_T] \quad (6)$$

$$P_{Tc} = \frac{1}{3} [k_I(0.5P_T + 0.866 Q_T) + 2k_{II}P_T] \quad (7)$$

$$Q_{Tc} = \frac{1}{3} [k_I(-0.866 Q_T + 0.5P_T) + 2k_{II}Q_T] \quad (8)$$

При одинаковых номинальных мощностях обмоток активные сопротивления фаз обмоток, приведенные к стороне высокого напряжения, равны.

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{3U_B^2 \Delta P_k}{2S_H^2} \quad (9).$$

где U_B – номинальное напряжение фазы ВН, S_H – номинальная мощность, ΔP_k – потери короткого замыкания трансформатора. Потери мощности в фазе тяговой обмотки можно вычислить так: п

$$\Delta P_{Ta} = R_1 I_{Ta}^2 = \frac{3S_{Ta}^2 \Delta P_k}{2S_H^2} = \frac{1}{6} \Delta P_k k_{\varepsilon Ta}^2 \quad (10).$$

где $k_{\varepsilon Ta} = \frac{3S_{Ta}}{S_n}$ – коэффициент загрузки фазы тяговой обмотки.

Аналогично определяются потери для фаз районной и сетевой обмоток трансформатора.

$$\Delta P_{Pa} = \frac{1}{6} \Delta P_k k_{\varepsilon P}^2;$$

$$\Delta P_{Ba} = \frac{1}{6} \Delta P_k k_{\varepsilon Ba}^2;$$

где $k_{\varepsilon P} = \frac{3S_P}{S_n}^2$ – коэффициент загрузки всей районной обмотки (в предположении симметрии районной нагрузки), $k_{\varepsilon Ba} = 3 S_{Ba} / S_n$ – коэффициент загрузки фазы сетевой обмотки, $S_{Ba} = \sqrt{P_{Ba}^2 + Q_{Ba}^2}$.

Выражения для потерь реактивной мощности из-за различия напряжений короткого замыкания выглядят несколько иначе. Реактивные сопротивления катушек, приведенные к напряжению сетевой обмотки, определяются напряжениями короткого замыкания [3]:

$$X_n = \frac{3U_n^2}{200S_H} (u'_{nT} + u'_{nP} - u'_{TP}) \quad (11);$$

$$X_T = \frac{3U_n^2}{200S_H} (u'_{nT} - u'_{nP} + u'_{TP}) \quad (12);$$

$$X_P = \frac{3U_n^2}{200S_H} (-u'_{nT} + u'_{nP} + u'_{TP}) \quad (13).$$

где $u'_{ij} = \sqrt{u_{ij}^2 - \left(\frac{100\Delta P_k}{S_n}\right)^2}$ – напряжение короткого замыкания, скорректированное на падение напряжения на активном сопротивлении, u_{ij} – напряжение короткого замыкания трансформатора в процентах.

Реактивные потери в фазах обмоток находятся так:

$$\Delta Q_{Ta} = X_T I_{Ta}^2 = \frac{3S_{Ta}^2}{200S_H} (u'_{nT} - u'_{nP} + u'_{TP}) = \frac{k_{\varepsilon Ta}^2 S_H}{600} (u'_{nT} - u'_{nP} + u'_{TP}) \quad (14);$$

$$\Delta Q_{Pa} = X_P I_{Pa}^2 = \frac{3S_{Pa}^2}{200S_H} (-u'_{nT} + u'_{nP} + u'_{TP}) = \frac{k_{\text{эп}}^2 S_H}{600} (-u'_{nT} + u'_{nP} + u'_{TP}) \quad (15);$$

$$\Delta Q_{na} = X_T I_{na}^2 = \frac{3S_{na}^2}{200S_H} (u'_{nT} + u'_{nP} - u'_{TP}) = \frac{k_{\text{эна}}^2 S_H}{600} (u'_{nT} + u'_{nP} - u'_{TP}) \quad (16).$$

Реактивная мощность холостого хода определяется током холостого хода i_x , $\Delta Q_x = \sqrt{(i_x S_n / 100)^2 - \nabla P_x^2}$.

Алгоритм расчета эффективных токов фаз сетевой обмотки по получасовым значениям расхода активной и реактивной электроэнергии тяговой и районной обмоток выглядит следующим образом.

1. Получасовые значения расходов электроэнергии по вводам 27.5 кВ и по вводам районной обмотки хранятся в локальной базе данных по электропотреблению (ЛБДЭ), и по команде пользователя производится ее пополнение по всем трансформаторам дороги из базы данных АСКУЭ.

2. Расчеты износа и оставшегося срока службы производятся с использованием информации ЛБДЭ и далее хранятся в локальной базе данных программного комплекса. При запуске программы производится отображение рассчитанного износа в текстовой и графической формах.

3. По получасовым расходам определяются средние получасовые мощности ввода 27.5 кВ и по формулам (3) ... (8) вычисляются мощности фаз тяговой обмотки.

4. По формулам (11), (12), (14), (15) рассчитываются составляющие потерь мощностей фаз тяговой и районной обмоток.

5. Формулы (1) и (2) ввиду добавок потерь в обмотках, потерь в стали и меди используются в следующей форме:

$$P_{\text{эви}} = \sqrt{(P_{\text{фTi}} + \Delta P_{Ti} + \frac{1}{3} (P_P + \Delta P_{Pa}))^2 [P_{\text{фTi}}^2 (k_{\text{субф}} \phi A T^2 - 1)] + \frac{1}{3} \Delta P_x} \quad (17);$$

$$Q_{\text{эви}} = \sqrt{(Q_{\text{фTi}} + \Delta Q_{Ti} + \frac{1}{3} (Q_P + \Delta Q_{Pa}))^2 [Q_{\text{фTi}}^2 (k_{\text{фAT}}^2 - 1)] + \frac{1}{3} \Delta Q_x} \quad (18).$$

где, индекс i обозначает фазу обмотки.

6. По полученным значениям мощностей фаз сетевой обмотки с помощью формул (13) и (16) определяются потери в меди в фазах сетевой обмотки и добавляются к мощностям фаз сетевой обмотки.

7. Из полученных значений мощностей фаз сетевой обмотки по среднему значению фазного напряжения определяются эффективные токи фаз сетевой обмотки:

$$I_{ЭВi} = \frac{\sqrt{P_{ЭВi}^2 + Q_{ЭВi}^2}}{U_{срв}}$$

8. По эффективным значениям токов производится расчет относительного износа изоляции за получасовой период работы трансформатора в соответствии со стандартной методикой [4].

ВЫВОДЫ

Расчеты износа предполагается производить в двух вариантах:

– расчеты износа без учета ретроспективы по имеющимся данным получасовых расходов электроэнергии, без отображения оставшегося срока службы;

– расчеты с учетом предыдущей (до запуска АСКУЭ) работы трансформатора по информации о грузообороте и продолжительности окон; предполагается использование регрессионных зависимостей, обновляемых по мере накопления информации АСКУЭ.

REFERENCES

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Шидловский, А.К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / А.К. Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
3. Kurbonovich, Avazov Bobomurod, Nuriddinov Sardor Babayarovich, and Qarshiyev Karimberdi Tavbayevich. "TRANSFORMATOR MOYINI GAZDAN TOZALASHDA KO'CHMA LABARATORIYA MASHINASIDAN FOYDALANISH." (2022): 73-77.
4. Нуриддинов, С. Б. (2020). Анализ отказов тяговых электрических машин НБ-514 локомотивный ремонт завод УП «Ўзтемирйўлмаштаъмир». In Актуальные вопросы экономики транспорта высоких скоростей (pp. 139-142).
5. Nuriddinov, S., Avazov, B., Hasanov, F., & Rakhmonova, Y. (2021). Analysis of the causes of traction electric failures of electric cargo cars operated on railways of the Republic of Uzbekistan. In E3S Web of Conferences (Vol. 264, p. 05041). EDP Sciences.
6. Богачков

- И.М., Савиных Ю.А. Способ очистки трансформаторного масла. Журнал «Нефть и газ», 2011 г., №1, - С.87-91.
6. Салихов Т.П., Кан В.В., Юсупов Д.Т. Метод циркуляционной промывки трансформаторов с использованием адсорбентов и керамических мембран. Научно-технический журнал ФерПИ. 2014. №4. -С.62-66.
7. Avazov B.K., Yusupov D.T. Cleaning of used transformer oil. Journal NX - A Multidisciplinary Peer Reviewed Journal, 2021, p. 719–724.
8. Ковальский Б.И., Безбородов Ю.Н., Фельдман Л.А., Юдин А.В., Петров О.Н. Современные методы очистки и регенерации отработанных смазочных масел. Препринт. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. — 104 с.
9. Валиуллина Д.М., Загустина И.Д., Козлов В.К., Определение качественного состава примесей в отработанном трансформаторном масле. Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. 18 июня 2018 г.
10. Avazov, Bobomurod Kurbonovich, and Karimberdi Tavbayevich Qarshiyev. "TRANSFORMER OIL CLEANING TECHNOLOGY." *Academic research in educational sciences* 3.TSTU Conference 1 (2022): 199-202.