УДК 622.817.5:331.45:622.012.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Ковалев А.П., Нагорный М.А., Чернов И.Я., Шевченко О.А., Шевченко Л.А.
Донецкий Национальный технический университет
Kovaliov_Alex@ukr.net

In article the two-element mathematical model for calculation of reliability of the transformer winding in a dynamic mode is offered. The suggested analysis allows to estimate the reliability if working of the thermal protection is supervised through known intervals. The example of calculation is given.

Актуальность. Основная причина выходов из строя шахтных трансформаторов – пробой изоляции их обмоток, что в некоторых случаях может приводить к возгоранию изоляции. Для предотвращения перегрева обмоток трансформатора выше допустимой величины в шахтных трансформаторных подстанциях используется тепловая защита, от надежности которой зависит бесперебойная работа трансформаторов. Поэтому, выбор оптимального, с точки зрения надежности, срока диагностики тепловой защиты трансформатора является актуальной научной задачей, решение которой позволит продлить срок эксплуатации отечественных шахтных трансформаторных подстанций.

Цель исследования. Разработка математической модели надежности трансформатора, работающего в динамическом режиме.

Состояние вопроса. Существующие математические модели надежности трансформаторов основаны на использовании понятий случайных независимых событий, что не позволяет выявить влияние сроков диагностики тепловой защиты на надежность изоляции обмоток трансформатора. [1, 2] Подобные задачи можно решать только с применением понятий случайного процесса, в частном случае, с использованием понятий марковских случайных процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем. [3]

Материал исследования. Обмотка трансформатора может выходить из строя, находясь в следующих режимах работы: статический, близкий к номинальному (в этом режиме обмотка трансформатора выходит из строя из-за старения и пробоя изоляции); ремонтный, из-за ошибок обслуживающего персонала; динамический, когда происходит недопустимый перегруз обмоток трансформатора, а тепловая защита находится в отказавшем состоянии.

Выход из строя обмотки трансформатора в динамическом режиме происходит при совпадении в пространстве и времени двух случайных событий: превышение температуры обмотки допустимого значения и отказ в срабатывании тепловой защиты.

Систему «обмотка трансформатора - тепловая защита» рассмотрим как один марковский процесс $\chi(t)$ с 4 дискретными состояниями и непрерывным временем. Система в течение времени *t* может находиться в одном из следующих состояний: $e_1(0,0)$ - обмотка трансформатора имеет допустимую температуру нагрева; тепловая защита находится в работоспособном состоянии; $e_2(1,0)$ - обмотка трансформатора имеет недопустимую по условиям эксплуатации температуру нагрева; тепловая защита находится в работоспособном состоянии; $e_3(0,1)$ - обмотка трансформатора имеет допустимую температуру нагрева; тепловая защита находится в отказавшем состоянии; $e_4(1,1)$ - обмотка трансформатора имеет недопустимую для работы температуру нагрева; тепловая защита находится в отказавшем состоянии.

Регулярный однородный марковский процесс с дискретным числом состояний и непрерывным временем $\chi\ (t)$ будет полностью определен, если известны функция распределения времени нахождения системы в каждом из возможных состояний и вероятности переходов из одного состояния в другое.

Обозначим через $P_{ii}(\Delta t)$ вероятность того, что система за малый промежуток времени Δt останется в состоянии e_i, $i=\overline{1,4}$ и через $P_{ij}(\Delta t)$ - вероятность того, что система за время Δt перейдет из состояния e_i в состояние e_j, $j=\overline{1,4}$, $j \neq i$. Эти вероятности переходов определяются следующим образом [4].

$$P_{i,j}(\Delta t) = p\left[\chi(t+\Delta t)=e_j \,/\, \chi(t)=e_i\right] = p\left\{e_i \xrightarrow{\Delta t} e_j\right\} = a_{i,j}\cdot\Delta t + 0(\Delta t),$$

$$P_{i,i}(\Delta t) = p\left[\chi(t+\Delta t)=e_i \,/\, \chi(t)=e_i\right] = p\left\{e_i \xrightarrow{\Delta t} e_i\right\} = 1 - a_{i,i}\cdot\Delta t + 0(\Delta t).$$

Величина a_{ij} учитывает с точностью до членов второго порядка малости, что за время Δt произойдет переход системы из состояния e_i в другое состояние e_j, а величина $(1-a_{ii})$ учитывает с точностью до членов второго порядка малости, что за время Δt не произойдет переход системы из состояния e_i в любое другое состояние, т. е. процесс останется в состоянии e_i.

Вероятность нахождения системы «обмотка трансформатора - тепловая защита» в каждом из 4 возможных состояний можно найти из следующей системы уравнений.

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{P}_1(t) = -(\lambda_1+\lambda_2)\cdot P_1(t) + \mu_1\cdot P_2(t) + \mu_3\cdot P_2(t);\\
&\dot{P}_2(t) = \lambda_1\cdot P_1(t) - (\mu_1+\lambda_2)\cdot P_2(t);\\
&\dot{P}_3(t) = \lambda_2\cdot P_1(t) - (\lambda_1+\mu_2)\cdot P_3(t).
\end{aligned}\right\}, \tag{1}$$

$$\dot{P}_4(t) = 1 - (P_1(t) + P_2(t) + P_3(t)),$$

где $\lambda_1 = \frac{1}{\overline{d_1}}$, $\overline{d_1}$ - средний интервал времени между появлениями перегрузок обмоток трансформатора;

$\mu_1 = \frac{1}{d_1}$, d_1 - средняя длительность существования перегрузок трансформатора;

$\lambda_2 = \frac{1}{\overline{d_2}}$, $\overline{d_2}$ - средний интервал времени между отказами тепловой защиты;

$\mu_2 = \frac{1}{d_2}$, d_2 - средняя длительность нахождения тепловой защиты в необнаруженном отказавшем состоянии.

Система линейных дифференциальных уравнений (1) решается при начальных условиях $P_1(0)=1,\quad P_2(0)=0,\quad P_3(0)=0,\quad P_4(0)=0$.

Применяя к системе уравнений (1) прямое преобразование Лапласа [1] и учитывая начальные условия, получим

$$\left.\begin{aligned}
&P_1(s)\cdot(s+\lambda_1+\lambda_2) - \mu_1\cdot P_2(s) - \mu_2\cdot P_3(s) = 1;\\
&-\lambda_1\cdot P_1(s) + P_2(s)\cdot(s+\mu_1+\lambda_2) = 0;\\
&-\lambda_2\cdot P_1(t) + P_3(s)\cdot(s+\lambda_1) = 0.
\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Из системы уравнений (2) находим $P_1(s)$, $P_2(s)$, $P_3(s)$ и подставляя их в (3) находим функцию вероятности безотказной работы обмоток трансформатора в течение времени *t*.

$$R(t) = L^{-1}\left[P_1(s) + P_2(s) + P_3(s)\right] \tag{3}$$

Тогда

$$R(t) = L^{-1}\left[(s^2+as+b)/(s^3+s^2+as+b)\right] \tag{4}$$

Переходим от изображения (4) к оригиналу, используя методику [2], получим:

$$R(t) = \frac{G(s_1)}{Z'(s_1)}e^{s_1 t} + \frac{G(s_2)}{Z'(s_2)}e^{s_2 t} + \frac{G(s_3)}{Z'(s_3)}e^{s_3 t}, \tag{5}$$

где $G(s_k) = s_k{}^2 + as_k + b$;

$Z(s_k) = s_k{}^3 + as_k{}^2 + bs_k + c$;

s_k, $k = 1,2,3$ - корни кубического уравнения

$$s^3 + as^2 + bs + c = 0; \tag{6}$$

$a = 2\lambda_1 + \mu_1 + 2\lambda_2 + \mu_2$,

$b = \lambda_1(\lambda_1+\mu_1) + (\lambda_2+\mu_2)(\lambda_1+\mu_1+\lambda_2) + 2\lambda_1\lambda_2$,

$$c = \lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2).$$

Среднее время до первого пробоя изоляции обмотки трансформатора τ_1 и дисперсия D_1 находятся из выражения [2]

$$\tau_1 = -\psi'(0)\,; \qquad (7)$$

$$D_1 = \psi''(s)\Big|_{s=0} - \left[\psi'(s)\Big|_{s=0}\right]^2, \qquad (8)$$

где $\psi(s) = 1 - \dfrac{2s\lambda_1\lambda_2 + c}{s^3 + as^2 + bs + c}$. (9)

Используя (7), (8), (9), находим

$$\tau_1 = \frac{b - 2\lambda_1\lambda_2}{c}, \qquad (10)$$

$$D_1 = \frac{b^2 - (2\lambda_1\lambda_2)^2 - 2ac}{c^2}. \qquad (11)$$

Если состояние тепловой защиты диагностировать через интервал времени Θ и проверки считать абсолютно надежными, то среднее время нахождения защиты в необнаруженном отказавшем состоянии можно найти из выражения [5].

В том случае, если $\bar{d}_1 \ge 100 \cdot d_1$, $\bar{d}_2 \ge d_2$, $\dfrac{\Theta_2}{\bar{d}_2} < 0.1$ и выполняется условие

$$\tau_1 \cong \sqrt{D_1}\,, \qquad (12)$$

Тогда вероятность безотказной работы обмотки трансформатора в течение времени *t* можно определить с помощью формулы

$$R(t) = e^{-\frac{\Theta^2 t}{\bar{d}_1 \bar{d}_2}}. \qquad (13)$$

Пример. Определить $R(t)$ - вероятность безотказной работы обмотки трансформатора в течение времени *t*=8760 ч, среднее время до пробоя изоляции τ_1 и дисперсию D_1, если известно, что $\bar{d}_1 = 0.95$ час; $d_1 = 0.25$ час; $\bar{d}_2 = 16200$ час; $\Theta = 2100$ час.

Используя формулы (10), (11), находим, $\tau_1 = 1629$ ч, D_1=2654*10^5.

Ввиду того, что соблюдается условие (12), вероятность безотказной работы обмотки за *t*=8760 ч найдем, пользуясь формулой (13), тогда $R(8760)$=0,99069.

Вывод. Предложенная математическая модель позволяет оценить надежность трансформаторных подстанций с учетом сроков диагностики тепловой защиты.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Гук Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 244 с.

2. Зорин В.В., Тисленко В.В., Клеппель Ф., Адлер Г. Надежность систем электроснабжения. – К.: Вища школа, 1984. – 192 с.

3. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.:Наука, 1965. – С.385.

4. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова. – М.:Наука, 1970. – С.173.

5. Ковалев А.П., Шевченко А.В., Белоусенко И.В. Оценка пожарной безопасности передвижных трансформаторных подстанций 110/35/6 кв.//Промышленная энергетика. – 1991, №6 – С.28-31.

Рекомендовано д.т.н. Курінним Е.Г.