УДК 621.314

Озеров Р.Е., Голованьов М.Ю.

ВИБІР ТРАНСФОРМАТОРІВ ПО ТЕРМІЧНІЙ СТІЙКОСТІ ТА СТРУМАМ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ПРИ ІМОВІРНІСНІЙ ВИХІДНІЙ ІНФОРМАЦІЇ

В статті пропонується уточнена більш адекватна модель вибору силових трансформаторів по умовам струмів короткого замикання при випадковому їх характері та імовірнісній вихідній інформації. Розглянуто основні поняття, що стосуються даного напрямку. Розрахунки проведені трансформаторів з різними видами охолодження та зроблені відповідні висновки, зокрема вияснена зміна температури робочих частин трансформатору в залежності від зміни впливаючих факторів.

Ключові слова: трансформатор, модель, температура, мастило, навантаження, струм

ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ И ТОКАМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье предлагается уточненная более адекватная модель выбора силовых трансформаторов по условиям токов короткого замыкания при случайном их характере и вероятностной исходной информации. Рассмотрены основные понятия, касающиеся данного направления. Расчеты проведены трансформаторов с различными видами охлаждения и сделаны соответствующие выводы, в частности выяснена изменение температуры рабочих частей трансформатора в зависимости от изменения влияющих факторов.

Ключевые слова: трансформатор, модель, температура, масло, нагрузка, ток

SELECTION OF TRANSFORMERS IN THERMAL RESISTANCE SHORT CIRCUIT CURRENT IN THE PROBABILITY INITIAL INFORMATION

The article offers a more refined model is adequate selection of power transformers in terms of short-circuit currents at random and probabilistic nature of the original information. The basic concepts related to this field. Payments made transformers with different types of cooling and made appropriate conclusions, including temperature changes clarified the working parts of the transformer, depending on changes influencing factors.

Keywords: transformer, model, temperature, lubrication, load current

Введение

При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения (СЭС) предприятий возникает необходимость проверки выбранных элементов СЭС на термическую и динамическую стойкость к токам короткого замыкания (т.к.з.). Одним из наиболее дорогостоящих и дефицитных элементов таких систем являются силовые масляные трансформаторы (Т). [1] позволяет оценить нагрузочную способность Т в нормальном и послеаварийном режимах при детерминированном графике нагрузки. Фактически же нагрузка носит случайный характер: кроме того возникновение аварийных ситуаций и величины токов короткого замыкания являются случайными величинами.

Режим короткого замыкания является аварийным для Т и при отсутствии надлежащей защиты может привести к тепловому разрушению изоляции обмоток, или независимо от наличия защиты, к механическому разрушению обмоток, что приводит к выходу Т из строя.

Цель работы.

Повышение эффективности системы электроснабжения за счет выявления и использования резервов электроустановок с термической и динамической устойчивости к токам короткого замыкания.

Материалы и результаты исследования.

Каждый силовой Т должен быть спроектирован так, чтобы при внешних к.з. он мог выдерживать без повреждения динамическое воздействие ударного т.к.з. и термическое воздействие ограниченного во времени эффективного т.к.з.

Чувствительность Т к нагрузкам, выше номинальных, зависит от их мощности. С увеличением мощности Т наблюдается следующее [2]:

* увеличивается индуктивность рассеяния;
* увеличиваются усилия короткого замыкания;
* увеличивается поверхность изоляции с электрической напряженностью;
* сложнее определяется достоверная температура наиболее нагретой точки обмотки и масла.

Таким образом, силовые мощные Т, могут быть более уязвимы к перегрузкам, чем Т малой мощности. Кроме того, выход из строя мощных Т влечет за собой более тяжелые последствия при ликвидации аварии.

С целью уменьшения степени риска при ожидаемых перегрузках в [2] Т разделены на три категории:

а) распределительные Т (трехфазные с $S_{н} = 2500$ кВА или однофазные с $S_{н} = 833$ кВА) для которых учитывается только температура наиболее нагретой точки обмотки (ННТ) и термический износ изоляции;

б) Т средней мощности (трехфазные с $S_{н} = 100$ кВА или эквивалентные им): для которых воздействие потока рассеяния не является критическим: но должны учитываться разные виды охлаждения;

в) мощные силовые Т, для которых воздействие потоков рассеяния и последствия отказа могут быть значительными.

С учетом вышеизложенного предполагается новые предельные значения температуры ННТ и масла в верхних слоях: тока для двух режимов нагрузки превышающей номинальную: - систематических продолжительных и кратковременных аварийных перегрузок. Определение т.к.з. для Т на детерминированной основе регламентировано [3].

Нагрузочной способностью любой электроустановки (ЭУ) является ее способностью выдерживать ту или иную нагрузку Н без потери своей функциональной способности (например, термическая стойкость к т.к.з.). Граничные значения нагрузочной способности называют прочностью П [4].

В основе детерминированной модели выбора ЭУ по техническим критериям используется условие:

$$Z = п - н \geq 0 \qquad (1)$$

при этом в качестве Н по условиям надежности принимают $н_{max}$, а в качестве П - номинальное его значение $п_{ном}$ или паспортное значение $п_{пп}$ предписываемое заводами-изготовителями. Однако при $Z = п_{ном} - н_{max} \leq 0$ еще может и не быть отказа, и в тоже время при $н < н_{max}$ может последовать отказ, если в процессе эксплуатации снижается П, то есть $п(t) < п_{ном}$. Поэтому ошибочно считать, что выбор ЭУ на основе детерминированной модели свободен от риска.

ISSN 2307-7239

Переменная $Z = n - н$ в силу случайных Н и П является случайной: а событие $Z = n - н < 0$ является нежелательным. Таким образом возникает необходимость определения термической стойкости ЭУ при вероятностном подходе.

Исходя из общей стохастической модели выбора ЭУ по техническим критериям [5], принцип выбора ЭУ по критериям т.к.з. можно представить минимизацией или лимитированием вероятности появления нежелательного события, когда нагрузка $н_{ф}$ больше равна прочности $n(t)$ ЭУ:

$$p[н_{ф} \geq n(t)] = \min$$

$$p[н_{ф} \geq n(t)] \leq \alpha \qquad (2)$$

где $н_{ф}$ - нагрузка: задаваемая характерным т.к.з.; согласно [5] величина α может быть принята равной 0,05.

Случайный характер прочности $n(t)$ обусловлен различными случайными воздействиями при изготовлении, монтаже и эксплуатации ЭУ. Для большинства ЭУ он еще не изучен, что объясняется высокими затратами труда, времени и денег. Поэтому остается принимать $n(t) = n_{,,,,,}$ или $n(t) = n_{,,}$.

На вероятностной основе для известного Т, работающего в известной сети, реальный ток к.з. должен рассчитываться по методам применяемым в расчетах электрической сети, с учетом ее схемы замещения, ее мощности, места и условий короткого замыкания, а также с учетом конструктивных особенностей Т - предварительной загрузки в нормальном режиме, схемы и группы соединения обмоток Т, а также напряжения высокой стороны.

Для данной работы предусматривается использование более адекватной стохастической модели процесса короткого замыкания с учетом восьми случайных влияющих переменных. В качестве функции распределения $G(н_{ф})$ переменной $н_{ф}$ рассматривается условная вероятность того, что $н_{ф}$ меньше максимального значения $н_{ф\max}$. В качестве расчетной нагрузки для используемых в работе моделей будем рассматривать величину $н_{ф\alpha}$ квантиль эффективного тока к.з., определенный из функции распределения $G(н_{ф})$ за время отключения к.з. Модель процесса к.з. и способы определения характерных т.к.з. (ударного т.к.з. - $i_{ЛЬ}$; эффективного т.к.з. - $I_{жЭ}$; тока отключения $I_{жм}$), а также определение функций распределения, параметров и квантилей распределения, параметров и квантилей распределения $н_{ф\alpha}$ изложены в [6].

Стохастический подход к выбору Т рассматривает превышение температуры ННТ обмотки $\Theta_{,,[}$ над максимально допустимой $\Theta_{ЛЬ''}$. как нежелательное событие: при этом условие выбора является:

$$p[\Theta_{,,[}(t) > \Theta_{\max}] = \alpha \qquad (3)$$

В качестве термической модели наиболее адекватно отражающие тепловые процессы в Т, в настоящее время общепризнанны модели основанные на методе конечных элементов. Эти модели [7-10] исходят из следующих основных положений:

а) элемент СЭС представляет собой площадеобразную теплопроводящую среду с изменяющимися во времени граничными условиями (ток нагрузки, температура окружающей среды);

ISSN 2307-7239

б) исходя из аналогии теплового и электрического токов, тепловая среда элемента СЭС представляется как тепловая сеть (термическая схема замещения) и физически анализируется как электрическая сеть;

в) каждый i-й элемент СЭС представлен четырехполюсником с Т-образной или П-образной схемами замещения, в продольных ветвях которых содержатся тепловые сопротивления, а в поперечных теплоемкость;

г) тепловые потери, возникающие в конструктивных элементах Т, передаются на их поверхность и затем в окружающую среду. Тепловые потери в схемах замещения представляются источником тока: включенным параллельно теплоемкости;

д) окружающая воздушная среда учитывается через конечное тепловое сопротивление, а земля подразделяется на пустотелые цилиндры, которые (аналогично элементам Т) представляются четырехполюсниками с Т-образной или П-образной схемами замещения.

Следует отметить, что эти наиболее адекватные термические модели, содержат большой объем информации, которая отсутствует в справочной литературе и может быть получены только заводами-изготовителями с определенными материальными затратами. Поэтому применение этих моделей оправдано для сравнительных результатов и при разработке и использовании упрощенных термических моделей, а также для выбора элементов СЭС по термическим критериям в специальных случаях. Во всех других случаях в настоящее время может быть использована, при достаточной достоверности полученных результатов, двухэлементная термическая модель, рекомендованная МЭК [11] и дополненная новой редакцией МЭК [12].

Для Т двухэлементная термическая модель «масло-обмотка» в общем виде может быть записана:

$$\Theta_{,,\square}(t) = \Theta_{,,,,} \left[\frac{1 + \hbar \left(\frac{I(t)}{I_{\hbar}} \right)^2}{1 + \hbar} \right]^m \times \left(1 - e^{-\frac{t}{r_{\Theta M}}} \right) + (\Theta_{,,\square} - \Theta_{,,,,}) \times \left(\frac{I(t)}{I_{,}} \right)^{2r} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{r_{\Theta o}}} \right) + \Theta_{oc} \quad (4)$$

где: $\Theta_{,,,,}$ - номинальная температура в верхних слоях масла при нормальном режиме работы;

К - кратность потерь короткого замыкания и холостого хода, определяется паспортными данными Т:

$$ж = m_{\hbar \acute{K}} / m_{,,}$$

$I(t)$, $I_{,}$ - ток нагрузки и номинальный ток Т;

m - показатель степени масла;

$r_{\Theta ,,}$ - постоянная нагрева масла;

$\Theta_{,,\square}$ - номинальная температура нагрева наиболее нагретой точки обмотки трансформатора;

r - показатель степени обмотки;

$\Theta_{,,\_}$ - температура окружающей среды.

В связи с короткотечностью процесса короткого замыкания, определяемое временем срабатывания защиты Т и временем отключения его из сети возникает необходимость учета термических переходных процессов, которые игнорировались при разработке данной модели.

ISSN 2307-7239

Кроме того специфика Т и изложенное выше разделение их по мощностям, будут вносить коррективы в изложенную двухэлементную модель.

В общем виде температура ННТ обмотки Т при возникновении к.з. может быть определена:

$$\Theta_{\text{ННТ}} = \Theta_{\text{нн}} + V_{\text{м}} + V_{\text{ННТ}} + \Delta\Theta_{\text{нк}} \qquad (5)$$

где: $V_{\text{м}}$ - превышение температуры масла в верхних слоях над температурой окружающей среды;

$V_{\text{ННТ}}$ - превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла в верхних слоях;

$\Delta\Theta_{\text{нк}}$ - температура нагрева обмоток Т, связанная с протеканием тока к.з.

При использовании двухэлементной модели применяются следующие допущения и соотношения:

- превышение температуры масла в верхних слоях над температурой охлаждающей среды в исходном режиме (до начала к.з.):

$$V_{\text{м}}(t_i - 1) = V_{\text{м.ном}} \left(\frac{1 + \text{н}\,\xi_{i-1}^2}{1 + \text{н}} \right)^m; \qquad (6)$$

- превышение температуры наиболее нагретой точки над маслом в верхних слоях в исходном режиме:

$$V_{\text{ННТ}}(t_i - 1) = (V_{\text{ННТ.ном}} - V_{\text{м.ном}}) \cdot \xi_{(i-1)}^{2r} \qquad (7)$$

- $\xi_{(i-1)} = \dfrac{I_{i-1}}{I_{\text{н}}}$ - отношение тока нагрузки трансформатора в нормальном режиме к номинальному току Т.

В дополнение к изложенным соотношениям, необходимо определить переходный тепловой режим, обусловленный т.к.з. При этом исходим из того, что продолжительность нормального режима, предшествующего процессу к.з. превышает три постоянных нагрева масла Т и процесс нагрева Т уже практически закончен, то есть температура масла и обмоток достигла установившегося значения и определяется для Т с различным видом охлаждения следующим образом:

- Вид охлаждения ON:

для вида охлаждения ON максимальная температура ННТ обмотки при любой нагрузке $\xi_{(i-1)}$ равна сумме температур охлаждающей среды, превышения температуры масла в верхних слоях над окружающей средой и разности температур ННТ обмотки и масла в верхних слоях:

$$\Theta_{\text{ННТ}} = \Theta_{\text{охл}} + V_{\text{м.ном}} \left(\frac{1 + \text{н}\,\xi_{(i-1)}^2}{1 + \text{н}} \right)^m + (V_{\text{ННТ.ном}} - V_{\text{м.ном}}) \cdot \xi_{(i-1)}^{2r}; \qquad (8)$$

- Вид охлаждения OF:

для вида охлаждения OF метод расчета основан на температуре масла в нижней и средней части обмотки и средней температуре масла в баке. Таким образом, максимальная температура ННТ обмотки при любой нагрузке $\xi_{(i-1)}$ равна сумме температур охлаждающей среды, превышения температуры масла в нижней части обмотки над охлаждающей средой, разности температур масла на выходе из обмотки и в нижней части, а также разности температур ННТ обмотки и масла на выходе из обмотки:

ISSN 2307-7239

$$\Theta_{,,\square} = \Theta_{,,\text{ɔ}} + V_{\text{«,,,,}} \left(\frac{1 + \hbar \xi^2_{(i-1)}}{1 + \hbar} \right)^m + 2(V_{\text{«}-\text{p}} - V_{\text{«,,,,}}) \cdot \xi^{2r}_{(i-1)} + (V_{,,\square,,\text{«}} - V_{\text{«,,,,}}) \cdot \xi^{2r}_{(i-1)}; \quad (9)$$

где: $V_{\text{«,,,,}}$ - превышение температуры масла в нижней части обмотки над окружающей средой;

$V_{\text{«}-\text{p}}$ - превышение средней температуры масла над окружающей средой.

- Вид охлаждения OD:

для вида охлаждения OD метод расчета, в основном, такой же, как и для вида охлаждения OF, за исключением того, что к найденному значению температуры добавляется поправка на изменение омического сопротивления обмоток от температуры:

$$\Theta'_{,,\square} = \Theta_{,,\square} + 0{,}15(\Theta_{,,\square} - \Theta_{,,\square,,\text{«}}) = \Theta_{,,\text{ɔ}} + V_{\text{«,,,,}} \left[\frac{1 + \hbar \xi^2_{(i-1)}}{1 + \hbar} \right]^{\text{«}} + 2\left[V_{,,\square\square} - V_{\text{«.,,,,}}\right] \cdot \xi^{2r}_{(i-1)} +$$

$$+ \left(V_{,,\square\square} - V_{\text{«.,,,,}}\right) \cdot \xi^{2r}_{(i-1)} + 0{,}15\left(V_{\text{«.,,,,}} + V_{,,\square\square} + V_{\text{«,,,,}} \left[\frac{1 + \hbar \xi^2_{(i-1)}}{1 + \hbar} \right]^{\text{«}} + 2\left[V_{\text{«}-\text{p}} - V_{\text{«,,,,}}\right] \cdot \xi^{2r}_{(i-1)} \right) + \quad (10)$$

$$+ 0{,}15\left(V_{,,\square\square} - V_{\text{«,,,,}}\right) \cdot \xi^{2r}_{(i-1)}$$

Для формул (8) - (10) обозначения видов охлаждения имеют следующие обозначения:

Таблица 1

Вид охлаждения новое обозначение	Вид охлаждения старое обозначение	Техническое описание функционирования
ONAN	М	Естественная циркуляция масла и воздуха
ONAF	Д	Принудительная циркуляция воздуха, естественная масла
OFAF	ДЦ	Принудительная циркуляция масла и воздуха
OFWF	Ц	Принудительная циркуляция масла и воды
ODAF	МЦ	Естественная циркуляция воздуха, принудительная масла
ODWF	МВ	Принудительная циркуляция воды, естественная масла

В зависимости от вида охлаждения Т определяются значения величин, входящих в формулы (8) - (10):

Примечание: для распределительных Т серии ONAN, температура наиболее нагретой точки обмотки определяется из общей двухэлементной термической модели:

$$\Theta_{,,\square} = \Theta_{,,\text{ɔ}} + V_{\text{«.,,,,}} \left(\frac{1 + \hbar \xi^2_{(i-1)}}{1 + \hbar} \right)^m + (V_{,,\square,,\text{«}} - V_{\text{«.,,,,}}) \cdot \xi^{2r}_{(i-1)}; \quad (11)$$

Таблица 2

Наименование величин	Обоз-наче-	Распр. т-ры	Т-ры средней и большой мощности

ISSN 2307-7239

	ния	Вид охлаждения			
		ONAN	ON	OF	OD
Показатель степени масла	m	0,8	0,9	1,0	1,0
Показатель степени обмотки	r	0,8	0,8	0,8	1,0
Постоянная нагрева масла	$r_{\Theta'}$	3,0	2,5	1,5	1,5
Температура охлаждающей среды	$\Theta_{''}$	20	20	20	20
Превышение температуры ННТ обмотки	$V_{''}$	78	78	78	78
Превышение температуры масла на выходе из обмотки	$V_{''}$	55	52	56	49
Превышение средней температуры масла	$V_{''-p}$	44	43	46	46
Превышение температуры масла в нижней части обмотки	$V_{''}$	33	34	36	43

При определении прироста температуры наиболее нагретой точки обмотки, обусловленного т.к.з., необходимо учесть переходные процессы протекающие в масле бака и в самих обмотках Т. Исходя из этого, можно записать:

$$\Delta\Theta_{''} = V_{''}\left\{\left(\frac{1+\hbar\xi_i^2}{1+\hbar}\right)^m - \left(\frac{1+\hbar\xi_{(i-1)}^2}{1+\hbar}\right)^m\right\}\times\left(1-\exp^{-\frac{\delta t_{ж3}}{r_{от}}}\right)+$$
$$+(V_{''}-V_{''})\times\left\{\xi_i^{2r}-\xi_{(i-1)}^{2r}\right\}\times\left(1-\exp^{-\frac{\delta t_{ж3}}{r_{\Theta 0}}}\right) \quad (12)$$

где: $\xi_i = \frac{I_{ж3\alpha}}{I_{'}}$ - отношение квантиля эффективного т.к.з. к номинальному току Т;

$r_{\Theta o}$ - постоянная нагрева обмоток Т. Данные о постоянных нагрева обмоток приведены в [13] и изменяются в пределах от 3 до 15 минут.

Таким образом, выражение для определения температуры ННТ обмотки Т с учетом возникновения к.з., будет иметь вид:

$$\Theta_{''} = \Theta_{''} + \Delta\Theta_{''} \quad (13)$$

Полученное в результате проверочных расчетов значение температуры, не должно превышать максимально допустимой температуры ННТ обмотки определенные для различных видов Т для аварийного, послеаварийного и режима к.з.

Проверка выбранных Т по термической стойкости к т.к.з. сводится к следующему алгоритму:

1. Определяем по справочным данным для выбранного Т величины: $P_{ж3}$, P_{xx}, $I_{'}$, а также, в зависимости от типа Т, параметры: m, r, $r_{\Theta''}$, $r_{\Theta o}$, $\Theta_{''}$, $V_{''}$, $V_{''}$.
2. Определяем любым известным способом загрузку трансформатора в нормальном и послеаварийном режимах I_{i-1}.

ISSN 2307-7239

3. Составляем эквивалентную схему к.з., определяем токи и параметры функции распределения т.к.з.: $\bar{I} = I_{жз\alpha}$ - квантиль эффективного т.к.з. на времени его отключения t к.з.
4. Подставляя найденные и рассчитанные значения переменных, входящих в уравнения (8) - (13) и решив их, находим температуру ННТ обмотки Т.

Расчеты показывают, что для того, чтобы Т удовлетворяли проверке по термической стойкости к т.к.з., необходимо, чтобы отношение токов $\xi_i = \frac{I_{жз\alpha}}{I_{,}}$ не превышало 120. В этом случае температура ННТ обмотки не превысит максимально допустимой.

Выводы:

1. В связи с короткотечностью процессов к.з., возникает необходимость в преобразовании выражения для определения температуры ННТ обмотки Т при использовании двухэлементной упрощенной термической модели с учетом термических переходных процессов.
2. Расчеты показывают, что выбранные в настоящее время силовые трансформаторы имеют значительные запасы по нагрузочной способности не только в нормальном и послеаварийном режимах, но и имеют запасы по термической стойкости в режиме к.з., что приводит к необоснованному утяжелению сети и дополнительным капитальным затратам.
3. Предложенная усовершенствованная двухэлементная термическая модель Т с использованием в ней вероятностного подхода, несет в себе минимальный объем исходной информации, что ускоряет расчеты по выбору и проверке Т по термическим критериям, и обеспечивает выявление скрытых резервов по нагрузочной способности выбранных Т. Эта модель может быть рекомендована в инженерную практику для оценочных и проверочных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисенко Н.А., Хоффманн И. Стохастическое моделирование процессов короткого замыкания в энергетических системах и установках // Техн. электродинамика - 1991. №2. С. 92-97.
2. Переходные процессы в системах электроснабжения / Под ред. Винославского В.Н. - К.: Высшая школа, - 1989. - 420 с.
3. Хоффманн И. Стохастический расчет токов короткого замыкания в системах электроснабжения // Пробл. техн. электродинамики - 1978. - Вып. 68. - С. 28-30.
4. Hirte W. Beitrag zur stochastischen Dimensionierung von Starkstromkabeln nach technische - okonomischen Gesichtspunkten. / Diss. A. - 1984, IH. Wismar. - 165s.
5. Mundt H. Beitrag zur stoehastischan Benessung von Transtormatoren nach technische - okonomischen Kriterien. / Diss. - 1983, IH. Wismar. - 150 s.
6. Манусов В.З., Моисеев С.М. Вероятностные характеристики токов короткого замыкания // Техн. электродинамика - 1985. - №4. С. 77-81.
7. Правила устройства электроустановок. - М.: Энергоатомиздат 1987. - 648 с.
8. Денисенко Н.А., Хоффманн И., Иншеков Е.Н. Применение вероятностных моделей в многокритериальной оптимизации электроустановок / В сб. тез. докл. «Повышение эффективности и качества электроснабжения. Научн. -техн. конф. Мариуполь, Май 1990». - Киев, 1990. - С. 23-24.

ISSN 2307-7239

9. Ian Nasilowski, Stromerwarmung von Oberleitungen // Elektrische Bahnen eb 87(1989). 11 - S. 344-348.

ISSN 2307-7239