

# Особенности токораспределения при повреждении в общей обмотке автотрансформатора

**В данной статье вы найдете ответы на следующие вопросы:**

- Каковы особенности токораспределения при повреждениях в последовательной обмотке силовых автотрансформаторов?
- Какими последствиями чреват неучет особенностей токораспределения при таких повреждениях для комплектов основных и резервных защит?

**Автор**

Пирогов М. Г.,

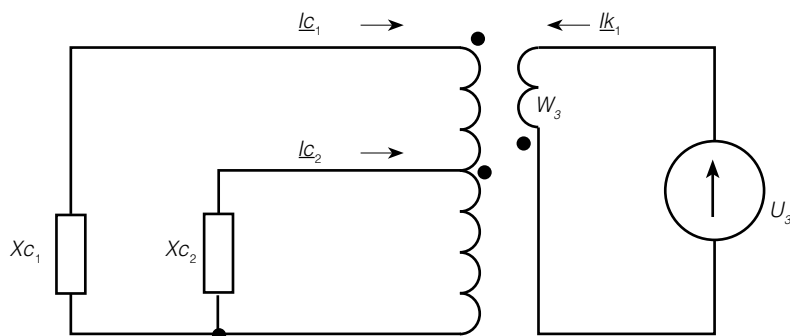
НТЦ «Механотроника»

**П**оследовательная обмотка силовых автотрансформаторов выполняется наружной, вероятность витковых или межфазных повреждений в ней наибольшая. На значение тока в месте короткого замыкания (КЗ) оказывает значительное влияние распределение аварийного тока по сторонам автотрансформатора – токораспределение. Автотрансформатор обладает принципиальной особенностью, закономерная и в то же время парадоксальная суть которой заключается в том, что при КЗ в последователь-

ной обмотке автотрансформатора фазы аварийных токов на сторонах высокого напряжения (ВН) и среднего напряжения (СН) могут различаться на  $180^\circ$  и быть близки к фазам, наблюдаемым при внешнем КЗ на стороне СН. Эта тонкость не должна быть забыта при выборе технического решения по построению релейной защиты и автоматики (РЗА) защищаемого объекта и при расчете соответствующих уставок.

Расчетная упрощенная схема автотрансформатора для расчета аварийного режима КЗ в последовательной обмотке (ПО) одной фазы представлена на рис. 1.

Для реальных автотрансформаторов непосредственными их конструкторами были выполнены расчеты токов при замыкании различного числа витков, расположенных в различных точках последовательной обмотки как при замкнутой цепи обмоток НН, так и при разомкнутой. Сравнение результатов расчета позволило сделать вывод, что влиянием неповрежденных фаз можно пренебречь и расчеты выполнять без учета обмотки НН по однофазной схеме (рис. 1), где короткозамкнутые витки показаны в виде отдельной обмотки. При этом погрешность расчета не превышает 1 % для тока в месте КЗ и 5 % для коэффициентов токораспределения. Под коэффициентом токорас-



**Рис. 1.** Расчетная упрощенная схема автотрансформатора с КЗ в последовательной обмотке

спределения понимается отношение тока стороны ВН или СН к току в месте КЗ, приведенному к одному и тому же числу витков или выраженных в относительных единицах. Процессы, указанные на рис. 1, можно описать следующей системой уравнений внешней схемы и многообмоточного трансформатора (замкнутая часть обмотки обозначена номером 3):

$$\begin{cases} \frac{U_3}{w_3} - \frac{U_1}{w_1} = -j \cdot x_{311} \cdot I_{C1} \cdot w_1 - j \cdot x_{312} \cdot (I_{C1} + I_{C2}) \cdot w_2 \\ \frac{U_3}{w_3} - \frac{U_2}{w_2} = -j \cdot x_{321} \cdot I_{C1} \cdot w_1 - j \cdot x_{322} \cdot (I_{C1} + I_{C2}) \cdot w_2 \\ I_K \cdot w_3 = I_{C1} \cdot (w_1 + w_2) + I_{C2} \cdot w_2 \\ U_1 = -j \cdot x_{C1} \cdot I_{C1} + j \cdot x_{C2} \cdot I_{C2} \\ U_2 = -j \cdot x_{C2} \cdot I_{C2} \end{cases} \quad (1)$$

При решении этой системы уравнений можно воспользоваться приближенными соотношениями сопротивления трехлучевой схемы замещения двухобмоточного трансформатора с КЗ в одной из обмоток. Для данного случая эти соотношения заключаются в сопротивлении луча, соответствующего последовательной обмотке, соответственно, можно принять следующие допущения:  $x_1 \approx 0$ ; сопротивление луча, соответствующего неповрежденной общей обмотке (ОО) равным сопротивлению между этими обмотками  $x_2 \approx x_{K12}$ ; сопротивление луча, соответствующего замкнувшимся виткам  $x_3$  оказывает основное влияние на значение тока в месте КЗ, таким образом:

$$\begin{cases} x_{311} = x_{K31} = x_{K13} = x_1 + x_3 \approx x_3 \\ x_{322} = x_{K32} = x_{K23} = x_2 + x_3 \approx x_{K12} + x_3 \\ x_{312} = x_{321} = x_3 \end{cases} \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в (1) и решив систему уравнений, получим:

$$I_{C2} = I_K \cdot \frac{w_3}{w_2} \cdot \frac{x_{C1} - w_1 \cdot w_2 \cdot x_{K12}}{x_{C1} + w_1^2 \cdot x_{K12} + (1 + w_1 / w_2)^2 \cdot x_{C2}} \quad (3)$$

$$I_{C1} = I_K \cdot \frac{w_3}{w_2 + w_1} \cdot \frac{w_1 \cdot (w_1 + w_2) \cdot x_{K12} + (1 + w_1 / w_2)^2 \cdot x_{C2}}{x_{C1} + w_1^2 \cdot x_{K12} + (1 + w_1 / w_2)^2 \cdot x_{C2}} \quad (4)$$

Выразив величины в относительных единицах получим выражения для нахождения относительных токов и сопротивлений:

$$\begin{cases} I_{K^*} = \frac{I_K \cdot w_3 / w_2}{I_{CHном}} = \frac{I_K \cdot w_3 / (w_1 + w_2)}{I_{ВНном}} \\ I_{K^*} = I_{C1^*} + I_{C2^*} \\ I_{C1^*} = I_{C1} / I_{ВНном} \\ I_{C2^*} = I_{C2} / I_{CHном} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_{C1^*} = x_{C1} \cdot S_{ном,ф} / [U_{вит}^2 \cdot (w_1 + w_2)^2] \\ x_{C2^*} = x_{C2} \cdot S_{ном,ф} / (U_{вит}^2 \cdot w_2^2) \\ x_{K12^*} = x_{K12} \cdot S_{ном,ф} / (U_{вит}^2) \\ x_{K12^*} = x_{K,ВН-CH^*} \cdot \left( \frac{w_1 + w_2}{w_1} \right)^2 \end{cases} \quad (6)$$

Последнее соотношение в (6) вытекает из равенства сопротивлений КЗ обмоток 1–2 и сторон ВН – СН (в опыте КЗ на стороне СН

$$U_{CH} = U_2 = 0, U_{CH} = U_1 + U_2 \approx U_1$$

$$x_{K12^*} = x_{K,ВН-CH^*} \cdot \frac{U_{вит}^2 \cdot (w_1 + w_2)^2}{S_{ном,ф}} \quad (7)$$

С учетом (5) и (6) формулы (3) и (4) можно преобразовать к виду:

$$\frac{I_{C2^*}}{I_{K^*}} = \frac{I_{C2} \cdot w_2}{I_K \cdot w_3} = \frac{x_{C1^*} - \frac{w_2}{w_1} \cdot x_{K,ВН-CH^*}}{x_{C1^*} + x_{C2^*} + x_{K,ВН-CH^*}} \quad (8)$$

$$\frac{I_{C1^*}}{I_{K^*}} = \frac{I_{C1} \cdot (w_2 + w_1)}{I_K \cdot w_3} = 1 - \frac{I_{C2^*}}{I_{K^*}} = \frac{x_{C2^*} + \frac{w_1 + w_2}{w_1} \cdot x_{K,ВН-CH^*}}{x_{C2^*} + x_{C1^*} + x_{K,ВН-CH^*}} \quad (9)$$

где,

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{U_{CHном}}{U_{ВНном} - U_{CHном}}, \frac{w_1 + w_2}{w_1} = \frac{U_{ВНном}}{U_{ВНном} - U_{CHном}} \quad (10)$$

Отношение  $I_{C2^*} / I_{K^*}$  отрицательно и тем больше по абсолютному значению, чем меньше сопротивление питающих сетей. Отсюда следует вывод, что при внутреннем КЗ в последовательной обмотке автотрансформатора, фазы аварийных токов на сторонах ВН и СН могут различаться на  $180^\circ$ , т. е. быть очень похожими на фазы как при внешнем КЗ на стороне СН автотрансформатора. Этот факт должен быть обязательно учтен при оценке принципа выполнения РЗА автотрансформатора и расчете уставок. Причиной возможного изменения фазы тока на  $180^\circ$  является уравнильный ток между сетью ВН и СН, обусловленный их разностью эквивалентных ЭДС и ограниченный сопротивлениями сетей.

Требуется более углубленное рассмотрение поведения резервной дистанционной защиты имеющей направленные ступени в сторону автотрансформатора при переходных процессах в последовательной обмотке. Всегда целесообразно применять дифференциально-токовой принцип. Последний особенностей не имеет, поскольку сумма приведенных или относительных токов сторон равна соответствующему значению тока КЗ  $I_{C1^*} + I_{C2^*} = I_{K^*}$ . Режим КЗ в последовательной обмотке необходимо обязательно учитывать в дифференциальной защите с торможением, а разработчикам устройств – при выборе принципа торможения. Торможение суммой модулей токов ВН и СН может привести к отказу защиты с завышенным коэффициентом торможения при рассматриваемом повреждении или к замедлению ее срабатывания, ухудшению чувствительности, поскольку возможно

$$0,5 \cdot (|I_{C1^*}| + |I_{C2^*}|) / I_{K^*} > 1, I_{C1^*} / I_{K^*} > 1 \quad (11)$$

$$(|I_{C1^*}| + |I_{C2^*}|) / I_{K^*} > 1, I_{C1^*} / I_{K^*} > 1 \quad (12)$$

Особенное внимание на данный аспект необходимо уделять проектным институтам при расчете коэффициентов торможения дифференциальной защиты автотрансформатора. В настоящее время на рынке представлен широкий спектр микропроцессорных терминалов с различной цифровой обработкой измеряемых сигналов (ЦОС) и определе-



## БМРЗ

**Защита,  
автоматика,  
управление  
и сигнализация**

на присоединениях от 0,4 до 220 кВ



## НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ



Шкафы защиты подстанционного оборудования и линий электропередачи 6(10), 35, 110, 220 кВ



Устройства частотной разгрузки



Многфункциональные устройства РЗА от 0,4 до 220 кВ для всех отраслей энергетики



Устройства центральной сигнализации



Блоки питания



Дуговая защита КРУ 6–35 кВ

198206, Санкт-Петербург, ул. Пионерстроя, 23 А  
Тел.: +7 (812) 744-89-94, факс: +7 (812) 744-45-83  
E-mail: sales@mtrele.ru, info@mtrele.ru

**www.mtrele.ru**

нии расчетных значений, в частности тока торможения. Причем большая часть ЦОС недоступна для проектировщика, а основные расчетные параметры функций защит представлены в общем математическом виде.

Применительно к дифференциальным защитах автотрансформаторов у некоторых производителей таких блоков отсутствуют методики расчета уставок учитывающие вышеописанную особенность, а обобщенные рекомендации по определению коэффициентов торможения явно не учитывают этот момент. Более того, иногда рекомендуется при расчете уставок рассматривать автотрансформатор как обычный трансформатор.

Особого внимания требуют предлагаемые меры некоторых производителей по вводу дополнительных задержек на срабатывание дифференциальной защиты автотрансформатора основанные на анализе траектории движения точки с координатами  $(L_{cr}, (|L_{cr}| + |L_{c2}|))$  в области зоны блокировки дифференциальной защиты с торможением с целью минимизации влияния насыщения трансформаторов тока. Как было показано выше, необдуманное и не просчитанное применение таких мер при защите автотрансформатора приведет к «правильной» работе таких функций – к гарантированному замедлению или несрабатыванию основной защиты.

В завершение данной краткой статьи необходимо отметить, что на основании сравнительных статистик работы микропроцессорных защит и решений, основанных на электромеханике, демонстрируемых эксплуатационным персоналом видно, что показатели правильной работы электромеханики выше. На мой взгляд, одна из главных причин этого тщательно продуманные решения, основанные на глубокой теоретической проработке и многолетнем опыте эксплуатации. Основными причинами, ухудшающими показатели правильности работы микропроцессорных защит, являются:

- неправильное применение, ошибки при расчете уставок в результате отсутствия конкретных методик прошедших соответствующую экспертизу;
- возможность внесения своих дополнений в логику персоналом осуществляющим наладку;
- отсутствие детализированного понимания принципа функционирования микропроцессорных защит, как на аппаратном, так и на программном уровне.

Целесообразно, для сохранения надежной архитектуры РЗА сетей 110–220 кВ и выше стараться отказываться от поспешного применения нестандартных, нетиповых решений. Проектным институтам целесообразно ограничиться надежными, проверенными принципами перенесенными на микропроцессорную основу и стараться минимизировать применение алгоритмичных «ноу-хау», которые, несомненно, в некоторых понятных случаях привлекательны, но зачастую неприменимы при рассмотрении более сложных ситуаций. 