

## РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Соколов В. В. и Шинкаренко Г. В., кандидаты техн. наук  
НИЦ "ЗТЗ-Сервис" - НИЦ "Донбассэнерготехнология" УНПО - "Энергопрогресс"

На вводы приходится около 30% отказов силовых трансформаторов, что требует разработки надежных методов и средств диагностики.

Контроль вводов под рабочим напряжением эффективно реализуется на основе неравновесно-компенсационного метода, когда из токов утечки изоляции формируют три сигнала, сумма которых близка к нулю. При изменении сопротивления изоляции одного из вводов сумма сигналов - сигнал небаланса становится пропорциональным приращению тока утечки. Сигнал небаланса является более чувствительным к дефекту, чем изменения тангенса угла диэлектрических потерь или емкости изоляции, поскольку он включает в себя как активную, так и емкостную составляющие приращения тока утечки дефектного ввода.

Основная электрическая сеть 110 - 750 кВ в нормальных режимах не является генератором каких-либо значимых колебаний напряжения нулевой последовательности. Колебания, которые связаны с изменением перетоков мощностей по линиям электропередач и силовым трансформаторам, обладающими незначительной несимметрией фазных параметров из-за неидеальной транспозиции проводов и пространственной несимметрии магнитопроводов или дефектов в обмотках, влияющих на величины индуктивностей короткого замыкания, несущественны. Источник несимметрии нулевой последовательности, которым является потребитель электрической энергии, отделен распределительной электрической сетью с изолированной нейтралью несимметрия фазных емкостных токов которой практически незаметна в основной сети. Процессы, связанные с короткими замыканиями или неполнофазными режимами, являются кратковременными и не могут рассматриваться в качестве факторов серьезно влияющих на использование неравновесно-компенсационного метода.

Токи утечки определяются не только собственными емкостями изоляции, но и электрическим влиянием ошиновки на верхнюю часть и обмотками трансформатора на нижнюю часть последней обкладки ввода. Все дополнительные емкостные связи являются жесткими, что предопределяет стабильность сигнала небаланса. Единственным случаем, когда эта жесткость нарушается, является появление пленки воды на наружной поверхности фарфоровой крышки при атмосферных осадках, когда электрические влияния частично экранируются. В такое время не следует учитывать изменения сигнала небаланса, что характерно и для традиционных измерений, которые проводятся обычно при сухой погоде.

В отечественной практике контроль сигнала небаланса осуществляется устройствами КИВ и КИН на вводах оборудования 500 кВ и выше. Опыт последних 25 лет показывает, что они эффективно работают в качестве защитных средств при значительном развитии дефекта, причем интервал от появления сигнала до отключения при изменении тока утечки от 5 - 7% до 20 - 25% составляет всего минуты или десятки минут, что не дает возможности принятия иных мер, кроме немедленного отключения. Использование таких устройств для вводов 110 - 750 кВ в качестве диагностического средства возможно при существенном повышении чувствительности и расширении функциональных возможностей, связанных с определением дефектного ввода, приращением тангенса угла диэлектрических потерь и емкости изоляции.

Устройство контроля изоляции вводов (УКВ) состоит из трех основных узлов преобразования токов утечки, суммирования и измерения. УКВ подключается к вводам через узлы присоединения (УП). Основное назначение УП - защита измерительного вывода ввода, заземленного в обычных условиях, от перенапряжения при обрыве жил кабеля,

идущего к УКВ. Наибольшее распространение получили УП, у которых в качестве защитных элементов использованы один или два шунтирующих резистора с разрядником. В ряде энергосистем применяются УП на стабилитронах. Его достоинством является большое внутреннее сопротивление, достигающее сотен килоом, что позволяет передавать в УКВ ток утечки изоляции ввода без искажения.

Условно УКВ можно разделить на стационарные, переносные и комбинированные. Основное требование к стационарному УКВ - надежность и стабильность, к переносному - точность и минимальный объем работ по дополнительному оснащению вводов, к комбинированному - оперативность монтажа и демонтажа и возможность измерения сигнала небаланса оперативным персоналом.

Стабильными характеристиками обладает трансформатор тока с функциями преобразования токов утечки и суммирования (далее суммирующий трансформатор тока). Он практически не меняет своих свойств в процессе эксплуатации, имеет фиксированные витки обмоток для выравнивания магнитных потоков, создаваемых поступающими от устройств присоединения токами  $I_{утj}$ ,  $j = A, B, C$ . Подобное решение реализовано в устройстве КИВ. У переносного УКВ в узле преобразования токов утечки целесообразно применять магазины прецизионных резисторов. В этом случае оснащение вводов сводится к установке УП и простого монтажного шкафа с трехфазным рубильником, шунтирующим на землю измерительные выводы вводов, и разъемом для подключения УКВ.

В НИЦ "Донбассэнерготехнология" разработано и изготовлено стационарное УКВ и начата разработка переносного варианта. В Киевэнергонадлежке предложено комбинированное УКВ, у которого узлы преобразования токов утечки и суммирования сделаны на переменных резисторах, смонтированных в монтажном шкафу, и являются стационарными, а узел измерения выполнен переносным и предназначен для оперативного персонала.

**Стационарное УКВ.** В общем случае оно содержит один суммирующий ТА и два одинаковых разделительных трансформатора тока. Последние устанавливаются только для групп однофазных силовых трансформаторов в целях гальванической развязки заземлений последних обкладок вводов.

Обозначим предварительно измеренные минимальный, средний и максимальный из токов  $I_{утj}$  как  $I_{ут.мин}$ ,  $I_{ут.ср}$ , и  $I_{ут.макс}$ . Устройство присоединения с током  $I_{ут.мин}$  подключается ко всем виткам  $W_{баз}$  первичной обмотки ТА. Для токов  $I_{ут.ср}$  и  $I_{ут.макс}$  подбираются отпайки с витками  $W_{ср}$  и  $W_{макс}$ , при которых в измерительной вторичной обмотке  $W_{изм}$  получается минимальный ток  $I_{изм}$ . Шкала выходного прибора узла измерения (УИ) нормируется. Для этой цели УП с током  $I_{ут.мин}$  переключается с помощью накладки на нормирующую отпайку  $W_{норм}$  первичной обмотки ТА. После этого показания выходного прибора соответствуют выражению

$$I_{изм\%} = 100 \cdot W_{изм} \cdot I_{изм} / (W_{баз} \cdot I_{ут.мин})$$

при цене шкалы

$$\eta_{норм} = 100 \cdot W_{норм} / W_{баз}$$

Устройство измерения состоит из двух частей - унифицированного усилителя (УУ) и выходного прибора (ВП), устанавливаемого в оперативном пункте управления подстанции. Унифицированный усилитель и суммирующий трансформатор тока ТА (рис 1. а) располагаются рядом с силовым трансформатором в монтажном шкафу. Связь между УУ и ВП осуществляется жилами контрольного кабеля. Унифицированный усилитель включает в себя схему компенсации погрешности в токе  $I_{изм}$  - использующую компенсационную обмотку  $W_{ком}$ , фильтр низких частот, разделительный трансформатор и выпрямитель. Выпрямленное напряжение на выходе УУ может достигать 100 В, что позволяет обеспечить эффективное подавление помех промышленной частоты в жилах контрольного кабеля.

Выходной прибор содержит схему регулировки для нормирования шкалы, и реле для сигнализации об опасном возрастании  $I_{изм}$ .

Трансформатор тока ТА содержит обмотку  $W_{np}$  применяемую для периодической проверки УКВ, определения конкретного ввода, вызвавшего появление  $I_{изм}$ , и фазы  $I_{изм}$ . Узел периодической проверки (УПП), монтируемый рядом с выходным прибором устройства измерения и связанный с  $W_{np}$  двумя жилами контрольного кабеля, содержит контрольную кнопку SB, при нажатии которой и исправном УКВ выходной прибор меняет свои показания.

При опасном уровне  $I_{изм\%}$  УК отсоединяется и вместо него временно подключается переносной определитель фазы (ПОФ), основным элементом которого является фазорегулятор BS. Вращая фазорегулятор, компенсируют  $I_{изм}$ , используя для контроля выходной прибор. Конечное положение фазорегулятора дает необходимую информацию, если в протоколе наладки УКВ есть сведения о начальных углах векторов  $I_{ymj}$ , принимаемых за базовые. Принадлежность  $I_{изм}$  конкретному вводу определяется попаданием угла в зону, примыкающую к базовому углу вектора  $I_{ymj}$  в сторону опережения на  $5 - 10^\circ$  и отставания на  $90^\circ$ . Если обозначить  $\varphi_j$  приращение угла вектора  $I_{изmj}$  относительно базового значения угла  $I_{ymj}$ , то изменение тангенса угла диэлектрических потерь

$$\Delta \operatorname{tg} \delta_j \approx I_{изmj\%} \cdot \sin \varphi_j$$

и емкости основной изоляции ввода

$$\Delta C_j / C_j \approx I_{изmj\%} \cdot \cos \varphi_j.$$

Стационарный комплект смонтирован на силовом трансформаторе типа АТДЦТН-200000/330/110 и контролирует вводы 110 кВ ГМТБ 90/110-2000У. Величина  $\eta_{норм} = 2\%$ . В течение двух лет колебания  $I_{изм\%}$  находились в пределах  $0,05 - 0,2\%$  при отсутствии осадков. Во время дождя значения  $I_{изм\%}$  увеличивались до  $0,8\%$ . После высыхания фарфоровой крышки ввода уровень тока  $I_{изм\%}$  снижался до обычных значений. При возрастании влажности воздуха до  $96\%$  существенных изменений в  $I_{изм\%}$  не обнаруживалось.

**Переносное УКВ.** Регулировка токов в каждой фазе при наличии балластных резисторов  $R_{Kj}$ , (рис 1, б) осуществляется магазинами прецизионных резисторов  $R_{Kj}$ , по которым протекают компенсированные токи  $I_{Kj}$ . Суммирование этих токов осуществляется с помощью трансформатора тока ТА имеющего три одинаковые первичные обмотки  $W_{баз}$  для возможности проверки вводов групп однофазных силовых трансформаторов. Обмотки имеют нормирующие отпайки  $W_{норм}$ . В узле измерения имеется четвертый магазин прецизионных резисторов, необходимый для нормирования шкалы выходного прибора.

В начале настройки определяются токи  $I_{ymj}$ . Для фазы с минимальным током производят включение нормирующей отпайки. Четвертым магазином прецизионных резисторов нормируют шкалу выходного прибора.

После выполнения нормирования и выравнивания токов  $I_{Kj}$  в протокол записывают положения переключателей всех четырех магазинов прецизионных резисторов и уровень тока  $I_{изм\%}$ .

В устройстве измерения предусматривается дополнительный вход, обеспечивающий работу фазоизмерительной схемы. Для замера фазы тока  $I_{изм}$  дополнительный вход последовательно включают в цепи с токами  $I_{Kj}$ . Показания фазоизмерительной схемы записывают в протокол в качестве базовых углов. При последующих плановых проверках для конкретной группы вводов восстанавливают по протоколу положения переключателей трех фазных и четвертого нормирующего магазинов прецизионных резисторов и сравнивают текущее значение  $I_{изм\%}$  с предыдущим. Если имеется разница, превышающая установленную норму, то дополнительно определяют дефектный ввод и угол  $\varphi_j$ .

**Комбинированное УКВ** установлено на семи автотрансформаторах 110/330 кВ Киевэнерго. В монтажном шкафу предусмотрена возможность определения суммы токов утечки без балансировки (при замкнутом рубильнике SA2 на рис 2), тока утечки каждой

фазы (клеммы ХА1 и ХА2) для вычисления модуля полного сопротивления изоляции ввода при измеренном на вторичной обмотке трансформатора напряжении фазном напряжении тангенса угла диэлектрических потерь с помощью моста переменного тока и одноименной фазы трансформатора тока или ввода параллельного автотрансформатора в качестве образцового конденсатора.

**Оценка результатов измерений** может быть дана для наиболее типичных дефектов: местного дефекта в изоляции остова, загрязнения поверхности остова и внутренней поверхности фарфора.

При наличии местного дефекта

$$I_{\text{изм}\%} = 100 \cdot \frac{\alpha\tau}{\sqrt{(1+\alpha)^2 + \tau^2}}; \Delta tg\delta = 100 \cdot \frac{\alpha\tau}{1+\alpha+\tau^2}; \frac{\Delta C_1}{C_1} = 100 \cdot \frac{\alpha\tau^2}{(1+\alpha)^2 + \tau^2},$$

где  $\alpha = C_{\text{б.з.}}/C_{\text{д.з.}}$ ;  $C_{\text{б.з.}}$  и  $C_{\text{д.з.}}$  - емкости, соответствующие бездефектной и дефектной зонам остова;  $\tau = 1/\omega \cdot R_{\text{д.з.}} \cdot C_{\text{д.з.}}$ ;  $R_{\text{д.з.}}$  - сопротивление дефектной зоны.

Изменение  $\Delta tg\delta$  в отличие от  $I_{\text{изм}\%}$  происходит немонотонно с переходом через максимум  $\Delta tg\delta = 100 \cdot \alpha / 2 \cdot \sqrt{1+\alpha}$ . В этой точке  $I_{\text{изм}\%} = 100 \cdot \alpha / \sqrt{2+\alpha} > \Delta tg\delta$ .

Наличие предела  $\alpha$  дает границу чувствительности измерений неравновесно-компенсационным методом. Минимальное значение  $\alpha$ , а, следовательно, и  $I_{\text{изм}\%}$ , принимает тогда, когда дефект локализован на участке между двумя соседними обкладками. Для этого случая на рис. 2 для наиболее распространенных конструкций вводов 110 - 750 кВ приведены максимальные значения  $\Delta tg\delta$  и  $I_{\text{изм}\%}$ , которые могут быть приняты в качестве норматива по условию местного развивающегося дефекта в остова под рабочим напряжением.

При загрязнении поверхности остова рост  $I_{\text{изм}\%}$  существенно больше, однако степень опасности в этом случае значительно ниже.

Увеличение проводимости внутренней поверхности фарфоровой крышки поверхности остова не приводит к значительному росту  $I_{\text{изм}\%}$  из-за малой емкости слоя загрязнения относительно последней обкладки. Требуемая чувствительность сравнима по уровню, который требуется для индикации местных дефектов в остова. Уточнение вида дефекта осуществляется на вводе, отключенном от рабочего напряжения. Электрическими измерениями при разных температурах оценивается  $tg\delta$  изоляционного масла и проверяется наличие загрязнения остова или внутренней поверхности фарфора

### **Вывод**

Эксплуатации предложены диагностические критерии и устройства для контроля изоляции вводов силовых трансформаторов под рабочим напряжением на основе использования неравновесно-компенсационного метода, обладающие надежностью и необходимыми метрологическими характеристиками.

# ПРИМЕНЕНИЕ НЕРАВНОВЕСНО-КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ВВОДОВ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

## ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Колебания напряжения нулевой последовательности

1. Появление пленки воды на наружной поверхности фарфора при атмосферных осадках
2. Включение или отключение соседних присоединений

## ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ВВОДОВ, РЕАЛИЗУЮЩИХ НЕРАВНОВЕСНО-КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД

1. Узел преобразования токов утечки
2. Узел суммирования
3. Узел измерения
4. Узлы присоединения

## ВИДЫ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ВВОДОВ

1. Стационарные
2. Переносные
3. Комбинированные

## НАЧАЛЬНЫЕ НАЛАДОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ

1. Приведение сигнала небаланса к нулю
2. Нормирование
3. Определение базовых углов

## ПОЛУЧАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Нормированный ток небаланса

$$I_{изм\%} = 100 \cdot W_{изм} \cdot I_{изм} / (W_{баз} \cdot I_{ут.мин})$$

при цене шкалы выходного прибора

$$\eta_{норм} = 100 \cdot W_{норм} / W_{баз}$$

2. Изменение тангенса угла диэлектрических потерь

$$\Delta \operatorname{tg} \delta_j \approx I_{измj\%} \cdot \sin \varphi_j$$

и емкости основной изоляции ввода

$$\Delta C_j / C_j \approx I_{измj\%} \cdot \cos \varphi_j$$

## ВЫЯВЛЯЕМЫЕ ДЕФЕКТЫ

1. Местные дефекты в изоляции остова
2. Загрязнение поверхности остова  
Загрязнение внутренней поверхности фарфора