

# ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОГО РЕЛЕ КИВ-500 С ТПС НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ С RIP-ИЗОЛЯЦИЕЙ

БОТОВ С.В., РУСОВ В.А., фирма «DIMRUS», г. Пермь

Защитное устройство марки КИВ-500 (контроль изоляции вводов), предназначенное для мониторинга технического состояния вводов трансформаторного оборудования, давно и достаточно успешно используется для защиты вводов традиционной конструкции, имеющих изоляцию «бумага–масло». Основное достоинство применения реле КИВ-500 – эффективно работающая сбалансированная схема контроля емкости  $C_1$  вводов, и простая схема подключения, не требующая использования опорных сигналов от измерительных трансформаторов напряжения. Несмотря на сравнительно низкую помехозащищенность, известно большое количество практических случаев, когда КИВ-500 позволял своевременно отключать трансформаторное оборудование, имеющее проблемы в изоляции вводов.

Широкое применение вводов с твердой RIP изоляцией неожиданно привело к резкому увеличению аварийности трансформаторного оборудования. Принудительное оснащение таких вводов системами КИВ-500, (а иногда и современными системами производства других фирм, всегда подключаемыми параллельно с КИВ-500, что обусловлено существующей нормативной базой), не позволило существенно снизить эту аварийность.

На первом этапе все технические претензии эксплуатационными службами предъявлялись к вводам отечественного производства. Всем казалось, что, пере-

йдя на продукцию мировых фирм, аварийность удастся если не свести к нулю, то хотя бы существенно снизить. Практика показала, что с ростом в эксплуатации количества вводов с RIP-изоляцией, пусть даже производства любой известной фирмы, количество аварийных ситуаций все равно превышает допустимые пределы. Что очень важно, эта опасная тенденция в наибольшей мере связана с эксплуатацией вводов с RIP-изоляцией именно в России.

Наиболее часто встречающимися причинами выхода из строя вводов с RIP-изоляцией, согласно заключениям комиссий, являются две:

- перекрытие нескольких выравнивающих обкладок внутри ввода, приводящее к увеличению тока проводимости изоляции. При тестировании ввода дефект диагностируется как увеличение емкости ввода  $C_1$ , пропорциональное количеству перекрытых изоляционных промежутков;
- нарушение контакта между измерительным выводом ввода и последней (внешней) обкладкой остова. Этот де-

фект обычно диагностируется как резкое уменьшение емкости ввода  $C_1$  до очень маленького значения (нескольких пикофарад).

Как уже отмечено выше, наибольшее отличие условий эксплуатации высоковольтных вводов в России от других стран – обязательное использование (особенно для напряжения 500 кВ, где и наблюдается повышенная аварийность вводов с твердой изоляцией) систем защиты марки КИВ-500. Поэтому естественным является желание оценить возможное влияние такой системы защиты на эксплуатационную аварийность высоковольтных вводов с RIP-изоляцией, попытаться решить вопрос, а не является ли сама эта система источником повышенной аварийности вводов с твердой изоляцией.

На рисунке 1 приведена упрощенная схема замещения цепи контроля состояния ввода, по которой протекает ток проводимости RIP-изоляции. Она включает в себя главную емкость ввода  $C_1$  и первичную обмотку трансформатора марки ТПС (транс-

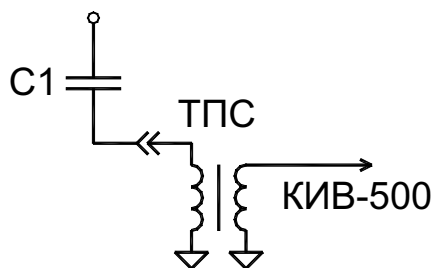


Рис. 1. Схема замещения ввода с КИВ-500

форматор промежуточный согласующий), являющийся составной частью реле КИВ-500. Влияние емкости ввода  $C_2$  мы пока учитывать не будем, это будет сделано ниже. Также не будем учитывать влияние цепей защиты измерительного вывода, которые по определению выбираются так, чтобы не оказывать влияния на величину рабочих токов проводимости изоляции ввода.

Токи и напряжения в такой цепи, если производить расчеты на промышленной частоте 50 Гц, вполне предсказуемы, и не выходят за рамки допустимых значений, обеспечивающих нормальную безаварийную эксплуатацию ввода. На рабочей частоте трансформаторный ввод – практически идеальный источник тока, выходной ток которого (ток проводимости изоляции) не зависит от величины нагрузки, которой в данном случае является ТПС системы КИВ-500. Процессы, происходящие в последовательной комплексной цепи на этой частоте, включающей в себя  $X_{C1}$ ,  $X_{ЛТПС}$  и  $R$ , не носят резонансного характера. Причина этого понятна – индуктивное сопротивление ТПС многократно меньше емкостного сопротивления ввода.

Векторная диаграмма цепи, построенная для случая промышленной частоты питающего напряжения 50 Гц, приведена на рисунке 2а. На ней величина падения напряжения  $U_{ЛТПС}$  очень мала, реально она обычно составляет доли процента от величины приложенного напряжения, поэтому вектор падения напряжения на изоляции ввода  $U_{C1}$  практически равен приложенному фазному напряжению  $U_{\Phi}$ . (В приведенной на рисунке 2 схеме замещения сопротивление  $R$  характеризует активные потери в цепи – в обмотке ТПС и в изоляции ввода.)

Совсем иная картина получается при увеличении частоты приложенного напряжения, т. е. при воздействии на трансформатор (ввод) высокочастотных импульсов. Количество таких мощных импульсов в энергосистеме всегда было очень велико, а в последнее время оно многократно выросло благодаря широкому применению на подстанциях элегазового коммутационного оборудования.

Высокочастотный импульс с крутым передним фронтом возбуждает в цепи «ввод–ТПС» колебания на частоте, определяемой частотными свойствами «первого» импульса. При этом ввод в схеме с ТПС выходит из режима источника тока и становится обычным источником напряжения. Причина этого – частотная зависимость параметров схемы замещения от частоты – емкостное сопротивление ввода  $X_{C1}$  с ростом частоты приложенного напряжения уменьшается, а индуктивное сопротивление  $X_{ЛТПС}$  возрастает. В результате величина и тип нагрузки, подключенной к измерительному выводу ввода, начинают оказывать влияние на процессы в изоляции самого ввода, изменяя токи и падения напряжений на всех элементах цепи «ввод–ТПС».

Это иллюстрируется векторной диаграммой 2b, на которой величина напряжения  $U_{C1}$ , приложенного к изоляции ввода, оказывается существенно больше, чем величина внешнего напряжения  $U_{\Phi}$ , приложенного к вводу. Увеличение этого напряжения, относительно векторной диаграммы 2а, определяется величиной падения напряжения на индуктивном сопротивлении  $X_{ЛТПС}$  согласующего трансформатора. Кроме того, уменьшение полного сопротивления цепи  $Z$  на повышенных частотах приводит к дополнительному увеличению тока проводимости  $I_{ПР}$  через изоляцию ввода, что также видно из приведенной на рисунке 2 векторной диаграммы 2b.

Не надо проводить дополнительного анализа, чтобы убедиться, что при отсутствии в цепи индуктивности  $X_{ЛТПС}$  величины высокочастотных перенапряжений во вводе, а, соответственно, и токи в изоляции будут существенно ниже, чем при наличии ТПС. На рисунке 2 это соответствует векторной диаграмме 2а, на которой величина  $U_{ЛТПС}$  пренебрежимо мала. Самое главное, что при отсутствии ТПС это будет соблюдаться во всем диапазоне частот, включая высокочастотную часть спектра.

Кратко обобщить выше сказанное можно следующим образом. При подключении к измерительному выводу ввода с RIP-изоляцией индуктивной нагрузки «ТПС + КИВ-500», плюс при воздействии на ввод мощных высоко-

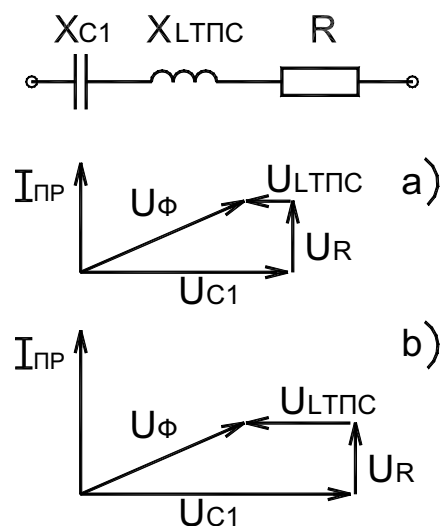


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений во вводе при различных частотах

частотных импульсов, мы имеем два важных последствия:

- импульсное напряжение, приложенное к изоляции ввода  $U_{C1}$ , по амплитуде может превышать напряжение  $U_{\Phi}$ , приложенное к вводу (трансформатору). Это приводит к тому, что напряжение на отдельных изоляционных промежутках между внутренними проводящими обкладками ввода может оказаться больше расчетного. При определенных условиях это увеличение напряжения, приложенного к слоям изоляции, может явиться дополнительной причиной для перекрытия изоляционных промежутков;
- увеличение импульсного тока через емкость ввода, обусловленное уменьшением полного сопротивления цепи на высоких частотах, может явиться причиной термического нарушения контакта между измерительным выводом и внешней обкладкой ввода с RIP-изоляцией. Этот процесс усугубляется худшим отводом тепла через монолитный компаунд из зоны подключения измерительного вывода к внешней обкладке, по сравнению с аналогичным отводом тепла через изоляцию бумага–масло во вводах классической конструкции.

Для проведения количественной оценки влияния этих факторов на состояние вводов с RIP-изоляцией необходимо дополнительно проанализировать шунтирующее влияние емкости  $C_2$  ввода и элементов защиты, обычно используемых совместно с КИВ-500.

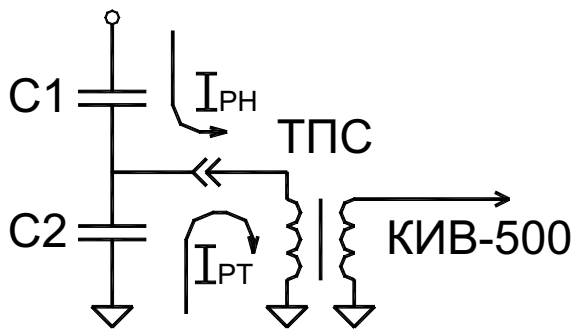


Рис. 3. Схема замещения ввода с учетом емкости  $C_2$

Начнем с рассмотрения влияния емкости ввода  $C_2$ , подключенной на схеме замещения на рисунке 3 к земле (в отечественной литературе эта емкость почему-то часто обозначается как  $C_3$ ). Как и в более простой схеме замещения расчеты, проведенные для промышленной частоты 50 Гц, дают значения токов и напряжений, которые не вызывают больших опасений за состояние ввода. Их величины во всех режимах работы ввода находятся в том безопасном диапазоне значений, на который рассчитывают изготовители вводов.

Сразу можно отметить, что положительным фактором для работы ввода является то, что при учете емкости  $C_2$  существенно (как минимум вдвое) снижается расчетное напряжение на измерительном выводе, так как емкость  $C_2$  выступает как плечо емкостного делителя напряжения  $C_1 - C_2$ .

Если же учесть в расчетах индуктивность первичной обмотки ТПС, особенно при воздействии высокочастотных импульсов, возбуждающих широкий спектр колебаний, то можно получить увеличение тока, протекающего по измерительному выводу ввода. Это увеличение может возникнуть за счет локальных резонансных процессов, связанных с колебаниями мощности между емкостями  $C_1$  и  $C_2$ , и индуктивностью ТПС. Такие резонансные процессы могут возникнуть в некоторых схемах контроля вводов при определенном сочетании параметров измерительной схемы.

В наибольшей мере проблемы влияния резонансных процессов двух типов важны для вводов, у которых

емкости  $C_1$  и  $C_2$  примерно равны между собой, что было чрезвычайно редко у вводов с изоляцией бумага-масло, но достаточно часто встречается у вводов с RIP-изоляцией. Именно в этом случае частоты резонансов системы, связанные с соотношением параметров « $X_{C1}$ » (константа для резонанса напряжений), « $X_{C2}$ » (константа для резонанса токов) и « $X_{ЛТПС}$ » (индуктивное сопротивление ТПС, зависящее от частоты, участвующее в резонансах обоих типов) могут совпадать друг с другом в общих характерных точках. При этом величина тока через измерительный вывод ввода будет равна сумме резонансных токов « $I_B = I_{PH} + I_{PT}$ » (без учета импульсного тока через изоляцию ввода), т. е. будет многократно превышать допустимые значения.

Влияние высокочастотных процессов на состояние вводов с RIP-изоляцией снижает установку защитных элементов, ограничивающих максимальную величину напряжения на измерительном выводе ввода, показанных на рисунке 4 и обозначенных «SA». В качестве защитных элементов на практике обычно используются резисторы, варисторы, разрядники или конденсаторы, чаще всего устанавливаемые в различных комбинациях.

Наименее эффективными защитными элементами оказываются резисторы, так как они, являясь частью делителей напряжения, обладают частотно независимыми параметрами. В то время как с повышением частоты сопротивление емкостей ввода падает, сопротивление резистора не меняется, что приводит к изменению коэффициента деления напряжения и повышению напряжения на измерительном

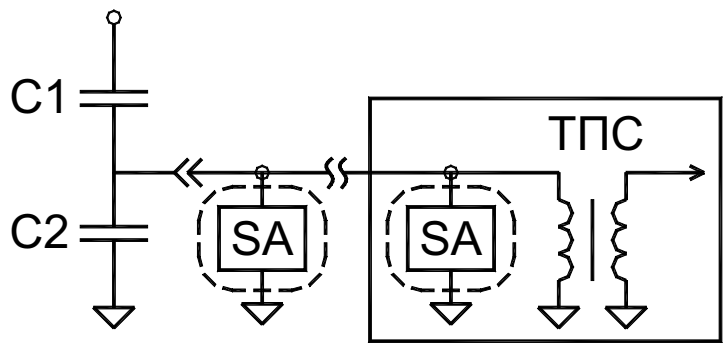


Рис. 4. Установка защитных элементов в КИВ-500

выводе ввода. Применение варисторов и разрядников более эффективно, но и они обладают недостатками. Они рассчитаны на «поглощение» энергии определенного количества импульсов, после чего первые переходят в режим внутреннего замыкания, а вторые (разрядники) могут просто перестать защищать измерительный вывод.

При установке импульсной защиты очень важным является место, где она монтируется. Если защита монтируется в шкафу КИВ, то влияние этой защиты будет существенно ослабленным из-за влияния частотных параметров соединительного кабеля [1]. Оптимальным является установка защитных элементов внутри датчика, монтируемого непосредственно на измерительном выводе ввода.

При установке элементов защиты следует однозначно понимать, что они ограничивают импульсные перенапряжения на измерительном выводе, но не устраняют их влияние полностью, токи через вывод могут остаться очень большими. В случае, когда защитные элементы устанавливаются внутри шкафа КИВ-500, импульсное напряжение на измерительном выводе будет еще больше.

Мы подошли к рассмотрению вопроса «о влиянии или не влиянии КИВ-500 на состояние вводов с RIP-изоляцией» с другой стороны – с точки зрения общих параметров самого этого устройства, защищающего ввод. Для этого необходимо сделать некоторое пояснение.

Для нормальной работы всех известных систем защиты вводов достаточно, чтобы входное напряжение на входе таких систем не превышало 10–20 вольт, при этом обеспечивается достаточная чувствительность работы

системы защиты и хорошая помехозащищенность. В этом случае устройства защиты измерительных выводов следует рассчитывать на напряжение 50–100 вольт, чтобы они не снижали точность работы измерительной части системы и ограничивали максимальное значение перенапряжений и токов через измерительный вывод ввода.

При использовании систем КИВ-500 ситуация выглядит несколько иначе. Наличие в составе функций этого реле встроенной защиты от неполнофазного режима работы трансформатора приводит к тому, что напряжение на измерительном выводе может повышаться до значения 750 и даже 1000 вольт. Ограничивать напряжение на измерительном выводе ниже этого уровня нельзя, так в этом случае защита от неполнофазного режима будет работать неправильно, увеличится количество ложных срабатываний реле КИВ-500. В стандартной схеме подключения КИВ-500 основное защитное устройство – варистор или разрядник (обычно на 2 кВ), устанавливаемый в шкафу КИВ. При воздействии мощных коммутационных импульсов напряжение на измерительном выводе в такой защитной схеме может превышать 3 кВ. Следовательно, можно говорить о том, что напряжение на измерительном выводе ввода, в случае использования систем КИВ-500, будет ограничиваться на уровне в 30 раз больше, чем при использовании современных электронных систем защиты вводов.

Если не учитывать влияние высокочастотных процессов, то такое различие не окажет существенного значения на токи в измерительном выводе, так как ввод, по классическому определению, это источник тока, на параметры которого величина нагрузки обычно не оказывает существенного влияния. Все будет выглядеть иначе, если учитывать индуктивности ТПС, который является обязательной частью системы КИВ-500, и выполнить анализ процессов при импульсном воздействии на ввод. Интенсивность высокочастотных процессов может оказаться опасной, так как напряжение на измерительном выводе будет ограничено на достаточно высоком уровне. Вероятность выхода ввода из строя

из-за проблемы с выводом от последней обкладки ввода, или пробоем обкладок, будет существенно выше.

В заключение необходимо отметить некоторые дополнительные конструктивные и эксплуатационные особенности, которые приводят к увеличению влияния высокочастотных проблем в системах защиты вводов с RIP-изоляцией, и также могут привести к выходу вводов с твердой изоляцией из строя.

### Конструктивные и алгоритмические особенности работы КИВ-500

В первую очередь это касается используемых значений амплитудных и временных настроек КИВ-500, величины которых для вводов с твердой изоляцией должны отличаться от аналогичных значений для вводов с изоляцией бумага – масло.

Во-вторых, это часто непродуманные и недостаточно проверенные модернизации систем КИВ-500. Схемы с использованием отдельных ТПС в каждой фазе стали почти повсеместными, а сама гениальная идея П.М. Сви [2] о балансировке первичных токов проводимости (а не токов вторичных обмоток ТПС, что не равнозначно на высоких частотах!) уже почти забыта. Мало того, что во всех новых инсталляциях устройства КИВ-500 используются три фазных ТПС, в качестве отрицательного примера можно привести случаи появления в эксплуатации систем КИВ-500, в которых в каждой фазе используется уже по два (!) последовательно включенных ТПС. Результаты таких модернизаций предсказуемы.

### Влияние частотных заградителей и реакторов

Большая часть повреждений вводов, как уже отмечено выше, происходит в моменты воздействия на изоляцию ввода высокочастотных импульсов. О важности этого пункта говорит статистика, согласно которой, при прочих равных условиях, чаще всего повреждаются высоковольтные вводы, не защищенные высокочастотными заградителями (если на подстанции они смонтированы не во всех фазах). В результате высокочастотные процессы в таких вводах протекают более интенсивно, и они чаще выходят из строя.

### Различие свойств изоляции двух типов: «бумага– масло» и «RIP-изоляция»

В твердой изоляции выше вероятность возникновения локальных дефектов, плюс отсутствует присущая маслоснаполненному оборудованию некоторой «регенерации» свойств изоляции после частичных пробоев, что, в конечном итоге, может приводить к более частым перекрытиям изоляции между обкладками ввода с RIP-изоляцией. По этой причине вводы с твердой изоляцией значительно чаще страдают от мощных высокочастотных импульсов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Возникновение на высоких частотах реактивных компенсационных процессов в системах КИВ-500, оснащенных согласующими трансформаторами марки ТПС, может приводить к увеличению импульсных перенапряжений на изоляционных промежутках ввода до 5–15 %, и, как результат, к их пробоев.

2. Возникновение «околорезонансных», а иногда даже и высокочастотных резонансных процессов в системах КИВ-500 с ТПС приводит к возрастанию суммарных токов через измерительный вывод вводов до 30 %. Это может приводить к локальному перегреву зоны подключения измерительного вывода (до 70 %), и, в конечном итоге, к повышенной повреждаемости вводов с твердой изоляцией.

3. Радикальным способом повышения надежности работы вводов с RIP-изоляцией должен быть отказ от использования релейных систем КИВ-500 с согласующими трансформаторами ТПС и переход на использование современных электронных аналогов системы КИВ-500, которые не нуждаются в использовании ТПС.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ботов С.В., Русов В.А. Особенности организации защиты и мониторинга трансформаторных вводов с RIP-изоляцией. «Энергоэксперт», 2011. – № 6.
2. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 239 с.