



“Fizika-2005”
Beynəlxalq Konfrans
International Conference
Международная Конференция



7 - 9 İyun 2005 №140 səhifə
June 2005 page 534-545
Июнь 2005 стр.

Баки, Азербайжан

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

**ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ С ТРАНСФОРМАТОРОМ
НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ПОДАВЛЕНИЯ**

ГАШИМОВ А.М., ДМИТРИЕВ Е.В., ГАСАНОВА С.И.

*Институт Физики НАН Азербайджана
AZ1143, Баку, пр.Г.Джавида 33
e-mail: arif@physics.ab.az*

Рассмотрен ряд физических и математических вопросов, касающихся защиты распределительных устройств высокого напряжения от феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений. Обсуждаются имеющиеся и предложенные устройства, объединяющие защиты от обоих видов перенапряжений в едином комплексе

**1. ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И АНАЛИЗ ИХ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ**

Феррорезонансные перенапряжения, которые способствуют повреждению изоляции высоковольтного оборудования и кумулятивным возрастаниям дефектов, имеющих в изоляции, возникают при взаимодействии емкости конденсаторов, шунтирующих контактов выключателей, в том числе элегазовых, и нелинейной индуктивности намагничивания электромагнитных трансформаторов напряжения.

При исследовании феррорезонансных перенапряжений, проходящих по схеме - суммарная емкость C_{Σ} делителей напряжения выключателя, нелинейная индуктивность ТН, шунтированная емкостью оборудования распределительного устройства $C_{\text{ш}}$ относительно земли, для правильного описания физики явлений необходим анализ переходных процессов в выбранных схемах. На основе точного анализа возможно разработать и внедрить мероприятия по защите от феррорезонансных перенапряжений.

Опубликовано достаточно много теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованиям нестационарных феррорезонансных перенапряжений, результаты которых обобщены в методических и руководящих указаниях по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения, содержащими емкостные делители напряжения [1, 2]. Однако, феррорезонансные процессы с учетом многообразности схем и распределенности параметров шины, соединяющие ТН с выключателями, а так же учет повторного зажигания дуги между контактами выключателя при включении

присоединения, которое осложняет описание процессов, не были рассмотрены.

Известно, что возникновение феррорезонансных процессов возможно при равенстве индуктивности ТН и суммарных емкости делителей напряжения выключателя и емкости оборудования РУ относительно земли, а так же превышение величины магнитного потока от начального участка насыщения кривой намагничивания, и при выполнении условия становления, значение потери в контуре меньше критического сопротивления контура [3]. В этой же работе приведены области возбуждения феррорезонансных колебаний и интерполированы действующие значения тока установившегося режима, протекающего через ТН. Приведенные результаты хорошо совпадают с данными других авторов [4-6 и др.] и позволяют рекомендовать мероприятия по предотвращению феррорезонансных процессов.

Для определения параметров схемы, необходимых для выяснения возможности возникновения феррорезонанса, используются: данные о суммарных емкостях делителей напряжения выключателя, в зависимости от числа параллельных присоединений и пропорционально числу отключенных выключателей, о емкостях оборудования относительно земли, характеристика намагничивания трансформаторов напряжения [7]. Учитывая, что токи холостого хода и индуктивности ТН не указываются в паспортных данных ТН, их значения необходимо определять по измеряемым токам холостого хода со стороны низкого напряжения ТН. Как известно, ТН работает и в режиме холостого хода, поэтому по нагрузочному току (например, для 220 кВ-го ТН приблизительно 0,03 А) можно определить индуктивность холостого хода, активное сопротивление обмотки и вычислить

наиболее близкие данные к резонансным собственным частотам схемы.

Выполненные исследования в области феррорезонансных перенапряжений и их последствия с учетом влияющих факторов позволяют дать комплексную оценку возможностей исследований по разработкам создания защитных устройств по предотвращению этого процесса в различных условиях эксплуатации. При этом должны быть учтены возможности развития феррорезонансных и высокочастотных перенапряжений и взаимодополняющих методов их защиты. Общая схема исследований феррорезонансных перенапряжений состоит из двух основных частей:

- комплексная оценка (с учетом взаимных сопротивлений) возможного развития феррорезонанса в исследуемой схеме в целом, выявление области развития феррорезонанса и формирование возможных режимов по обеспечению его предотвращения;
- оценка вариантов защиты от феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений и обоснование мероприятий по их осуществлению.
- для проведения исследований по оценке схемы РУ при возможных развитиях указанных перенапряжений, с позиции обеспечения защиты от этих перенапряжений, возможно построить компьютерную модель. Эта модель состоит из двух частей, связанных между собой параметрами и схемными соотношениями, но выполняющихся последовательно;
- модель оценки параметров схемы при нормальных функционированиях и при возникновении резонансных ситуаций;
- модель приведения параметров в режим расстройки от резонанса с учетом возможности возникновения резонанса второй раз после восстановления предрезонансного режима.

Полученные результаты по проведенным исследованиям подтверждают работоспособность рекомендуемых подходов, возможность их использования для анализа феррорезонансных и высокочастотных переходных процессов при коммутации присоединений. Принятая к использованию модель, состоящая из двух частей, позволяет наиболее полно и адекватно отразить вероятности возникновения феррорезонансных перенапряжений в электрических сетях, могла бы служить и при оценке различных видов перенапряжений, в том числе и кумулятивных измерений.

Осуществление в электрических сетях мероприятий по ограничению токов коротких замыканий, как известно, приводит к возрастанию опасности феррорезонансных и высокочастотных перенапряжений. Предложенные мероприятия пригодны к оценкам проверки возникновения феррорезонансных перенапряжений и для дополнительной проверки эффективности ограничения токов коротких замыканий в электрических сетях с точки зрения необходимости одновременного осуществления защиты от феррорезонансных перенапряжений.

Как указано, при плановых и аварийных отключениях присоединений от шины РУ воздушными или

элегазовыми выключателями с емкостными делителями напряжений возникают феррорезонансные процессы в цепи "источник напряжения-делители напряжения-трансформатор напряжения". При феррорезонансном процессе ТН повреждаются от больших токов; если полученные перенапряжения не опасны для ТН, то происходят ложные срабатывания устройств релейных защит. Поэтому при решении проблемы феррорезонансных перенапряжений еще дополнительно необходимо решать и вопросы, связанные с АПВ шин после гашения феррорезонансных процессов с наличием остаточных напряжений ($\approx 0,5 U_{фн}$), вызванных емкостной передачей. Несмотря на то, что феррорезонансным перенапряжениям посвящены многочисленные работы, ни одного комплексного подхода с учетом указанных явлений практически не было рассмотрено и не предложено единого устройства защиты от этих перенапряжений.

Выполненные в Институте Физики НАН Азербайджана работы показывают, насколько были важными изучения этих процессов и разработки соответствующих мероприятий защиты от этих перенапряжений. В настоящее время, одновременно с эксплуатацией старых воздушных выключателей, осуществляются и замены воздушных выключателей элегазовыми. Однако, проведенные анализы показывают, что повреждения электромагнитных ТН, возникающие в цикле отключения шин выключателями с емкостными делителями напряжения, были и остаются источником определенного числа аварий в энергосистемах. Проведенные статические данные по аварийности ТН, анализ характерных аварий по указанным алгоритмам, позволяют сказать, что феррорезонансная природа процессов сохраняется и нуждается в дополнительных исследованиях с учетом коммутации присоединений при одном цикле АПВ. Для этого сначала, как указано, необходимо определить возможность возникновения феррорезонансных процессов, как начальные условия быстропротекающего переходного процесса.

2. ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ

Развитие компьютерной техники и методов вычислительной математики многократно расширяет возможности разностороннего анализа феррорезонансных процессов. Реализация этих возможностей связана с переходом от традиционных моделей изучения феррорезонансных процессов, предназначенных только для изучения этих процессов с сосредоточенными элементами, к моделям, охватывающим диапазон от высокочастотных до промышленной частоты, включающих основные виды перенапряжений, которые могут возникнуть на РУ от исходного состояния схемы к конечному.

В современных условиях оценка перспективности новых способов защиты от феррорезонансных процессов не может основываться только на защите от этих перенапряжений. Уже на самых ранних стадиях исследования и разработки желательно определить возможность возникновения перенапряжений в

РУ, опасных с точки зрения изоляции оборудования которые, в конечном счете, будут осложнять ее эксплуатацию и снижать надежность [8].

Есть все основания полагать, что использование компьютерной модели для численного эксперимента феррорезонансных перенапряжений с целью организации защиты от различных перенапряжений одновременно с феррорезонансными, будет возрастать. Этому способствуют прогресс в области многопроцессорной вычислительной системы и применение алгоритмов для параллельного счета. С подобной же ситуацией разбиения исходной расчетной сетки приходится часто сталкиваться и при изучении восстанавливаемых напряжений между контактами выключателей во время ликвидации коротких замыканий и высокочастотных перенапряжений при коммутации разъединителями холостых шин РУ [9, 10].

Численные исследования феррорезонансных перенапряжений в РУ с ТН, содержащих емкостные делители напряжения, проводились в работах Института Физики НАН Азербайджана, ведущих институтах бывшего Союза и ряде работ в этом направлении выполненных за рубежом [11-15].

В работах Института Физики в качестве расчетной схемы для моделирования и численного эксперимента феррорезонансных процессов была выбрана схема, показанная на рис.1. Исследования были выполнены для трехфазной сети в матричной записи уравнений [1].

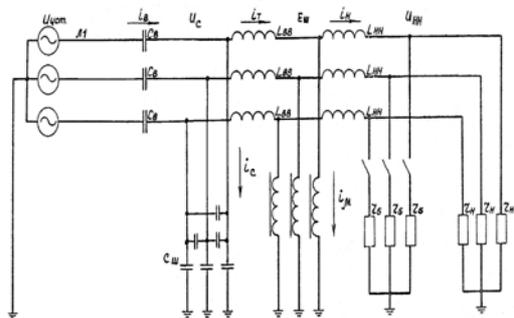


Рис.1. Расчетная схема

Характеристика намагничивания ТН аппроксимировалась полиномом одиннадцатой степени. Электромагнитные процессы по указанной схеме с учетом холостого хода ТН ($L_{нн}^{-1} = 0$) описываются системой

$$\frac{d\psi}{dt} = [1 + l_{BB}\varphi(\psi)]^{-1} u_c \quad (1)$$

где

$$\varphi(\psi) = (a + bm\psi^{m-1} + Cn\psi^{n-1}),$$

$$i_\mu = a\psi + b\psi^m + C\psi^n,$$

$n=9, m=11, a=0,15, b=0,18, c=0,67$ - коэффициенты и переменные являются квадратными и столбцовыми матрицами третьего порядка [17]. Начальные условия для системы (1) приняты нулевыми.

Для решения уравнений (1) был использован метод решения системы дифференциальных уравнений первого порядка с резко различающимися по величине коэффициентами, предложенный Институтом

Физики [18]. Преимуществом предложенного метода, по сравнению с широко распространенным методом Рунге-Кутты четвертого порядка при решении переходных процессов по электрической схеме с резко отличающимися коэффициентами, является гарантия, что применением этого метода поставленные цели будут достигнуты и не потребуются дополнительных методов уменьшения шагов расчета во время расчета.

По упомянутому методу система уравнений

$$y' = f_i(x_1, y_1, y_2 \dots y_n), \quad i = 1, 2, \dots n \quad (2)$$

решается с помощью расчетных характеристик

$$y_i(x+h) = y_i(x) + k_m \quad (3)$$

где h -шаг расчета, сек.

$$k_{1i} = hf_i(x_1, y_{1x}, y_{2x}, \dots y_{nx});$$

$$k_{2i} = hf_i(x + \frac{h}{m-1}, y_{1x} + \frac{1}{m-1}k_{1m}, \dots y_{nx} + \frac{1}{m-1}k_{1n});$$

$$k_m = hf_i(x + \frac{h}{2}, y_1 + \frac{1}{2}k_{m-1}, \dots y_{nx} + \frac{1}{2}k_{m-1})$$

Численный алгоритм для решения изложенной выше задачи был построен на базисной величине, которая равна $u_m=100$ п. Масштаб приведения низшего напряжения к базисному, независимо от типа и класса ТН, равен $100 \cdot \sqrt{2} / 100 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi$. При этом для всех классов ТН индуктивность $L_B+L_n = 0,33 \cdot 10^{-2}$ Гн или $L_{нн} = 0,22 \cdot 10^{-2}$ Гн, $L_{Bн} = 0,11 \cdot 10^{-2}$ Гн. Коэффициенты в выражении для тока намагничивания, которые даны в относительных единицах, аппроксимируют кривые намагничивания ТН и приводятся в базисных единицах, где $u_m=100$ п. Для учета кривых намагничивания в указанных исследованиях были использованы кривые, построенные на основе экспериментальных данных [19], в которых кривые намагничивания аппроксимируются выражением, которое предложено в [20] и удачно внедрено при изучении феррорезонансных процессов с силовыми трансформаторами и автотрансформаторами. При проведении практических расчетов необходимо, чтобы выбранная кривая намагничивания обеспечивала выполнение расчета как переходных, так и установившихся режимов для того, чтобы учесть, во-первых, основные факторы, влияющие на точность расчета, во-вторых, обеспечивала погрешность компьютерной модели не более погрешности решения для дифференциального уравнения узловых точек разностным методом [21]. Численный алгоритм для решения изложенных выше уравнений с принятой базисной величиной, был построен на устойчивой конечно-разностной схеме. Анализируя отклонения результатов натуральных экспериментов феррорезонансных перенапряжений от соответствующих расчетных по указанной модели, более точно оценили влияние многих параметров на достоверность предложенной модели и алгоритма

анализа феррорезонансных процессов. Заметим, что предложенная математическая модель, описывает процессы не только в стационарном режиме, поэтому результаты математического моделирования и влияния указанных параметров можно сравнивать с результатами в стационарном режиме и в параллельном режиме с учетом защитных устройств. Это обстоятельство расширяет область его использования.

Однако, при применении указанной модели при анализе процессов, происходящих с частотой, отличающейся от феррорезонансных процессов, например, как повторные включения или отключения присоединений или защитных аппаратов, разница между результатами натурных экспериментов и расчетов увеличивается. При этом изложенную модель можно использовать для качественных оценок феррорезонансных процессов в ограниченном масштабе и, которая была весьма полезна при анализе высокочастотных кумулятивных перенапряжений, обнаруженных при обработке экспериментальных результатов феррорезонансных перенапряжений. Поэтому приведем некоторые результаты полученных ранее исследований.

Результаты численного расчета при четырех выключателях ВВБ-220 кВ с ТН-220 кВ приведены на рис.2. Установившаяся величина феррорезонансных перенапряжений $1,5u_{\phi m}$, максимальный ток в высоковольтной обмотке $0,96 \text{ А}$. Было показано, что с увеличением числа выключателей интенсивность феррорезонансного процесса увеличивается. Этими исследованиями показано, что амплитуды перенапряжений могут достигать $3,5 u_{\phi m}$, токи в первичной обмотке $6-8 \text{ А}$.

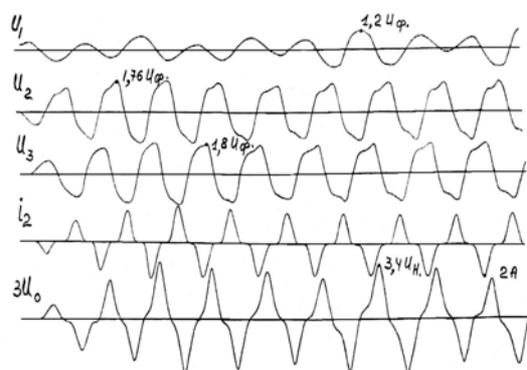


Рис.2 Результаты численного расчета и эксперимента

Установлено, что феррорезонансные процессы развиваются неодинаково, на одной из фаз напряжения развиваются очень быстро, с запаздыванием на второй фазе и очень длительным запаздыванием, а в некоторых случаях и вообще не развиваются, на третьей фазе. В работе [22] объясняются причины такого характера развития феррорезонансного процесса.

Полученные результаты дали полное основание для всестороннего изучения феррорезонансных процессов и при разработке и лабораторных апробациях устройств защиты от этих перенапряжений и рассмотрения трехфазных схем с учетом взаимных влияний элементов схемы.

Аналогичные результаты получены спустя несколько лет в Новосибирском Государственном Техническом Университете расчетным путем [23, ст.45]. Расчеты проведены при вариации емкостей шин (от 3 до 50 нФ) и емкостей делителей напряжения (825 пФ) при соответствующем числе выключателей ВВБ-220 кВ от 1 до 10. Максимальные уровни перенапряжений в переходном режиме достигли $2,2 u_{\phi m}$, а в установившемся режиме $1,5 u_{\phi m}$, максимальное значение тока $1,5 \text{ А}$.

Как известно, проведение натурных экспериментов для достоверного исследования феррорезонансных процессов или высокочастотных перенапряжений в настоящее время осложнено, с одной стороны, высокими требованиями энергоснабжения и дефицита мощности, не дающими возможность выделения отдельной сети, а с другой стороны, тем, что проведение экспериментов на новом объекте само по себе недоступно с точки зрения его принадлежности.

Существующие экспериментальные данные касаются, в основном, РУ с воздушными выключателями, по этим данным невозможно, или, в крайнем случае, нежелательно разрабатывать устройства, отвечающие сегодняшним требованиям. Поэтому актуальной остается задача использования математической модели, описывающей процесс развития феррорезонансных перенапряжений, включая начальный этап образования перенапряжений, который поможет правильно выбрать устройство обнаружения феррорезонанса, исследовать процесс с учетом защитных аппаратов на РУ, позволит прогнозировать внедрение выбранных мероприятий в аварийных режимах.

Стабильность режимов, их удаленность от переходного процесса в определенной степени повышают надежность защитных устройств, что немаловажно при существующем невысоком уровне компьютеризации системы защиты от перенапряжений РУ. В дополнение к исследованиям работы [24,25] осуществлен вычислительный эксперимент, в котором расчетные схемы были взяты из указанной работы, и поставлена задача показать степень корректности выбранной схемы и адекватности расчетных формул. Можно было бы говорить о какой-то степени упрощения расчетной модели, т.к. при решении практических задач требуется расширенный диапазон частоты ограничивающий перенапряжения.

Приведены некоторые результаты вычислительного эксперимента, демонстрирующие характер изменения феррорезонансных перенапряжений. Расчеты выполнены с помощью программы, реализующей описанные выше процессы феррорезонансного явления. В качестве одного из примеров были взяты следующие варианты: емкости выключателей меняются от 1000 пФ до 9000 пФ при изменении емкости системы шин РУ относительно земли также от 1000 пФ до 9000 пФ, без нелинейных ограничителей перенапряжений. При изменении емкости $C_{ш}$ от 1000 до 4000 пФ в переходном режиме перенапряжения значительны в интервале C_B от 1000 пФ до 6000 пФ, хотя некоторые отклонения от характера кривых имеют место при $C_B=3000 \text{ пФ}$ и ниже.

Указанная закономерность сохраняется и при установившемся режиме феррорезонанса. В переходном

режиме пятая гармоника более устойчива до $C_B=3000\text{пФ}$. При значении $C_B=1000\text{пФ}$ область значительных перенапряжений в переходном режиме находится в интервале емкости делителей напряжения выключателя от 2000 пФ до 6000пФ. Как отмечено, пятая гармоника в переходном режиме во всех случаях практически одинакова, поэтому можно при компьютерном моделировании взять на пятую гармонику за основу и настроить датчик обнаружения феррорезонанса на эту гармонику.

Выполненные комплексные исследования феррорезонансных процессов с ТН позволили получить следующие новые результаты:

- разрабатывать защитный аппарат, обладающий качественно новыми свойствами, включая многовариантность относительно возможных сочетаний искомых и задаваемых величин в РУ, чем обеспечивается его применимость для решения задачи предотвращения феррорезонансных перенапряжений;
- разрабатывать принципы формирования модели для феррорезонансных процессов, а также сами модели для наиболее важных случаев математического описания феррорезонансных перенапряжений с сосредоточенными, переменными и распределительными параметрами, чем обеспечивается применимость предложенного алгоритма для сложных схем различного назначения;
- предложить комплекс подходов, методов и алгоритмов анализа феррорезонансных процессов позволяющих, качественно и количественно оценить адекватность разработанных мероприятий по выявлению и подавлению феррорезонансных процессов;
- разрабатывать методические и руководящие материалы, которые создают необходимую основу для анализа, выбора и внедрения устройств повышения надежности РУ.

Анализ феррорезонансных перенапряжений в сетях крупной энергосистемы выявил, что, несмотря на значительное число проведенных исследований по указанным методикам, ни один из этих исследований в настоящее время практически не связан с одновременным ограничением перенапряжений разного характера, а определялся условиями выбора параметров устройств ограничения феррорезонансных перенапряжений. Исследования показали, что полученные результаты имеют заметный эффект только для отдельно взятого РУ или его присоединения. С учетом влияния других факторов, связанных с срабатыванием коммутационных аппаратов РУ, не удастся получить достоверные результаты. Поэтому в основных сетях, в том числе РУ, оснащенными элегазовыми выключателями, не рекомендуется использование этих результатов без надлежащего обоснования. Требуется продолжение исследований эффективности ограничения перенапряжений в сочетании с комплексным подходом в реальных условиях РУ энергосистем [26].

3. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ И ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ, СОДЕРЖАЩИМИ ЕМКОСТНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЙ

В результате научно-исследовательских и проектных работ выявлено множество возможных вариантов по защите от феррорезонансных перенапряжений. В качестве более надежного и рекомендуемого [27] рассматривается устройство, как подходящее для разработки основных положений по предотвращению и подавлению феррорезонансных процессов в РУ и вывода ТН из феррорезонанса. Ниже кратко анализируется устройство, содержащее два резисторных блока с отдельным управлением включения и выключения. Одним из перспективных направлений разработок защитных устройств следует признать созданные компактные устройства с двухступенчатым резисторным блоком. Для разработки устройства обнаружения и подавления феррорезонанса важно было установить зависимость значения сопротивления резисторов от режимов возникновения и развития феррорезонансных процессов. Для этого были проведены численные исследования по изучению феррорезонансных процессов методом математического моделирования. В расчетах использовалась трехфазная схема без нагрузки и с учетом нагрузки для режима наиболее характерного феррорезонансного процесса. Полученные результаты исследований позволили сделать оптимальный выбор сопротивлений, зависящих, в свою очередь, от параметров ТН.

В результате проведенных комплексных теоретико-экспериментальных исследований изучены феррорезонансные процессы при отсутствии устройств подавления феррорезонанса, разработана и идентифицирована в условиях сетевых экспериментов математическая модель взаимосвязанных режимов обнаружения, развития и подавления, обладающая достаточной точностью, пригодная для разработки новых эффективных защитных аппаратов.

В методических, руководящих указаниях и в новой редакции методических указаний предотвращения феррорезонанса в РУ и предотвращения высокочастотных кумулятивных перенапряжений для подавления феррорезонанса были рекомендованы следующие методы:

- выбор схемы, исключающей возникновение феррорезонансных перенапряжений;
- неприменение емкостных делителей напряжения, если это допустимо;
- увеличение емкости системы шин;
- разработки и согласование инструкции по проведению оперативных переключений, исключающих схемы возникновения феррорезонансного процесса;
- при отключении шин поставить запрет на отключение одной из линий электропередачи;
- поставить запрет на отключение автотрансформатора или трансформатора с заземленной нейтралью со стороны системы шин с не отключившимися присоединениями;

- применение емкостных ТН вместо электромагнитных;
- согласовать действие АПВ шин;
- применение специальных устройств защиты от феррорезонансных перенапряжений.

Указанные мероприятия являются основными, которые в настоящем в какой-то степени находят применение. Предложенные мероприятия считаются основными и в качестве резервного мероприятия предложено применять второе устройство защиты феррорезонанса, изменения порядка оперативных переключений и схемы действия релейных защит. Для применения одного из указанных методов они были изучены в отдельности и, в некоторых случаях, в совокупности. Как и следовало ожидать, число потенциальных мероприятий по ограничению феррорезонанса и связей между ними, даже на достаточно простом иллюстративном примере выбранной схемы РУ, оказывается достаточно большим. Если рассматриваемый пример в достаточной степени приблизить по аналитическим схемам к другим примерам, то следует учесть еще некоторые факторы и обрабатывать информацию на ЭВМ с целью нахождения их точки соприкосновения. Правда, это не представляет особой проблемы для анализа такой задачи, как задачи технического вывода защитных устройств, поскольку в этой задаче не содержится многочисленных элементов.

Результаты натурных испытаний разных защитных устройств показывают, что для каждого типа устройства могут быть заданы некоторые количественные, либо качественные оценки в целом или его элементов, которые носят более или менее устойчивый характер. Под элементами устройства понимаются, например, резисторы – по отдельности, либо пофазно. Для выбора устройства были использованы результаты натурных измерений и наблюдений. Выборы проводятся в рабочих режимах РУ, при этом возможно специально создать резонансный режим в отдельно взятой ячейке РУ.

Защитное устройство выявления и гашения феррорезонансных процессов с начала было одним резисторным блоком, т.е. одноступенчатым, затем для исключения возможности возникновения повторных перенапряжений предлагалось устройство, содержащее два резистивных блока.

Анализ результатов исследований и публикаций свидетельствует о том, что эффективность подавления феррорезонансных перенапряжений в этих устройствах существенно превосходит защитные характеристики одноступенчатых устройств с обычными способами взаимодействия сопротивления или емкости в РУ с ТН, что способствует заметному повышению функциональных возможностей.

3.1. Защита от феррорезонансных перенапряжений с устройствами, содержащими резисторы во вторичной цепи ТН.

Для исключения феррорезонансных процессов, сопровождающихся возникновением перенапряжений, резисторы вводятся в цепи вторичной обмотки ТН. Резисторы включаются в цепь при наличии

феррорезонанса, в период работы релейных защит ввод резисторов приводит к неправильным действиям этих защит при отключении присоединений от системы шин. Полное гашение феррорезонанса напряжения возможно с помощью резисторов сопротивлением 0,3-0,5 Ом.

Принцип работы устройства заключается в том, что после возникновения феррорезонанса подается сигнал на блок управления включения резистора во вторичной цепи ТН. Принципиальная схема устройства представлена на рис.3.

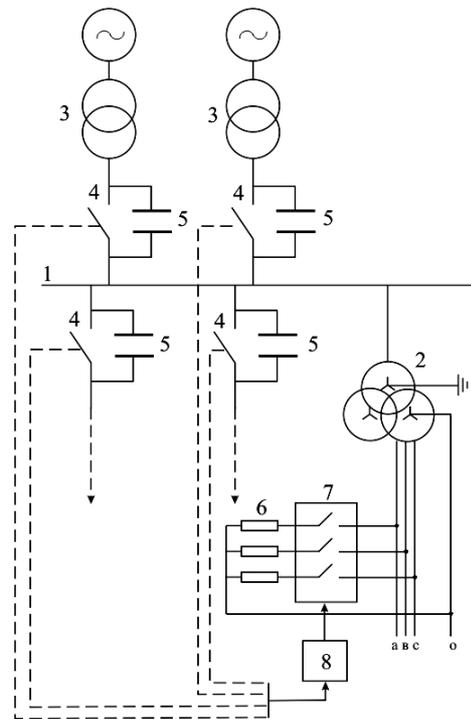


Рис.3 Принципиальная схема устройства защиты от феррорезонанса, содержащего резисторы во вторичной цепи ТН.

1 – система шин; 2 – трансформатор напряжения; 3 – присоединения; 4 – выключатели; 5 – емкостные делители; 6 – резисторы; 7 – коммутационный аппарат; 8 – блок управления коммутационного аппарата.

При аварийных отключениях присоединения 3 от шин релейной защиты, одновременно сигнал на отключение присоединения 3 подается на блок 8 управления коммутационного аппарата, включающего резисторы 6. Резисторы можно отключить вручную, они отключаются после подключения к шинам 1 по крайней мере одного присоединения. При таких подключениях резисторов 6 к цепи ТН исключается возможность возникновения феррорезонансных перенапряжений, тем самым защищается изоляция высоковольтного оборудования РУ.

Следует отметить, что указанный алгоритм работы устройства с одним резисторным блоком относится к условиям ограничения перенапряжения до уровня $1,8 u_{фм}$, т.к. резисторы с сопротивлением 0,3-0,5 Ом не исключают возможности появления перенапряжения более $3 u_{фм}$. Это перенапряжение воздействует на изоляцию до включения защитных ре-

зисторов и, тем самым, снижает эффективность указанного устройства. Для снижения уровня перенапряжения до установившегося значения в период между возникновением феррорезонансного процесса и вводом резистивного блока в цепи вторичной обмотки предложено использовать второй резистивный блок, который должен подключаться к цепи вторичной обмотки ТН до возникновения феррорезонансного процесса. Значение сопротивления резисторов расчетным путем установлено в пределах 6-7 Ом и натурными экспериментами были подтверждены. Установлено, что эти резисторы после подключения до возникновения феррорезонансного процесса остаются в цепи все время, т.е. до восстановления нормального режима. Таким образом, алгоритм работы двухступенчатого защитного устройства сформирован следующим образом:

- до возникновения феррорезонансного процесса опережением включается первый (в работе [28] этот блок считается вторым блоком) резистивный блок с резистором сопротивления 6-7 Ом;
- для ограничения перенапряжения до уровня $1,8 U_{фн}$ с момента подключения второй (в работе [28] этот блок считается первым) резистивный блок, сопротивлением 0,3-0,5 Ом;
- после ограничения феррорезонансных перенапряжений, через заданное время, примерно 0,1-0,2 с, второй резистивный блок отключается;
- для исключения повторного возникновения феррорезонансных перенапряжений после отключения второго резистивного блока первый резистивный блок остается в цепи до восстановления нормального режима, примерно 0,5 с., после этого отключения.

Принципиальная схема устройства с учетом изложенного алгоритма, отражающего его работу на РУ, представлена на рис.4. При нормальном режиме и отсутствии феррорезонансного процесса, резисторы отключены от вторичного ТН с помощью блока управления 8, работающим от реле минимального напряжения и нулевой последовательности защиты РУ. Во время развития феррорезонансного процесса при отключающейся системе шин РУ срабатывает от отмеченных реле и блок управления 8 получает команду о включении резистора 6 к ТН. Резисторы, в соответствии с разработанным алгоритмом, должны остаться в цепи ТН до полного гашения феррорезонанса напряжения и включения шин, т.е. до восстановления номинального напряжения. После восстановления номинального напряжения исчезает напряжение нулевой последовательности и блок управления 8 отключает резисторы 6 от цепи ТН. Устройство при полном отключении РУ и обесточении системы шин обнаруживает феррорезонансные процессы и осуществляет их гашение с помощью фильтра, настроенного на частоту третьей гармоники, или так называемого логического блока 8, резистора 9 с сопротивлением 0,2-0,5 Ом подключен к ТН. После подавления феррорезонанса логический блок отключает резистор от цепи. На определенное

время, т.е. до полного восстановления напряжения на системе шин, резистор 6 остается подключенным к вторичной обмотке ТН.

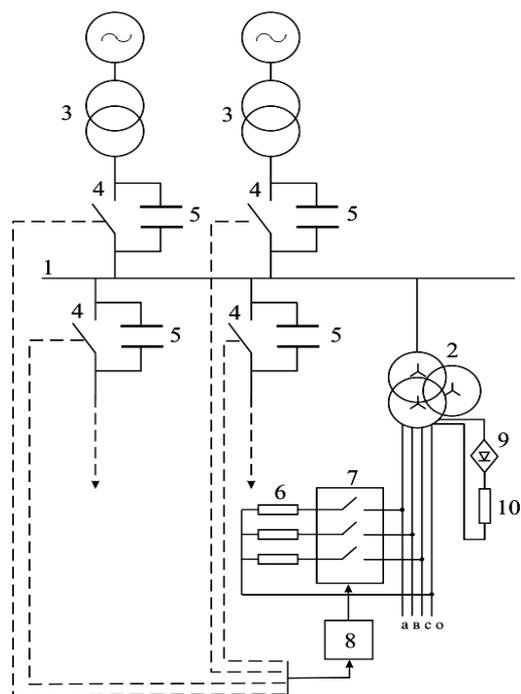


Рис. 4 Принципиальная схема устройства защиты от феррорезонанса, содержащего двухступенчатый резистивный блок во вторичной цепи ТН
1 – система шин; 2 – трансформатор напряжения; 3 – присоединения; 4 – выключатели; 5 – емкостные делители; 6 – первый резистивный блок; 7 – коммутационный аппарат; 8 – блок управления коммутационного аппарата; 9 – логический блок; 10 – второй резистивный блок

Таким образом, разработанное и широко внедренное устройство выявления и гашения феррорезонансных процессов, содержащее двухступенчатые резистивные элементы, первая ступень, которых сопротивлением 6-7 Ом, предназначена для исключения повторного возникновения феррорезонанса, подключается к ТН и удерживается во включенном состоянии при появлении и существовании напряжения нулевой последовательности, вторая ступень которых сопротивлением 0,3-0,5 Ом, включается при появлении феррорезонанса к ТН через датчик феррорезонанса и после его гашения отключается тем самым датчиком.

До разработки организации серийного производства и внедрения этого устройства в мировой практике не было устройства такого характера и назначения. Необходимо отметить, что создание двухступенчатого устройства полностью обосновано, благодаря моделированию и численному анализу электромагнитных переходных процессов в сложных электрических сетях, выполненным в Институте Физике НАН Азербайджана. Проведение анализа позволило разработать устройство, которое коренным образом отличается от изложенного устройства.

3.2. Защита от феррорезонансных перенапряжений с помощью устройства, содержащего посторонние источники напряжения во вторичной цепи ТН.

После разработки и внедрения устройства выявления и гашения феррорезонансных перенапряжений были выпущены методические указания, в которых изложены основные положения по предотвращению феррорезонанса в РУ. Эти методические указания в определенное время были широко использованы при внедрении разработанного устройства. Однако, дальнейшая эксплуатация устройств выявила их недостатки. Эти недостатки в основном были связаны с использованием резисторов, которые были термически не устойчивы. Для устранения недостатков были проведены комплексы многоплановых численных и экспериментальных исследований, позволивших установить качественные признаки феррорезонанса, т.е. феррорезонансные токи, потоки намагничивания, поток сцепления, и т.д., в результате которых предложен способ гашения феррорезонанса, основанный на размагничивании сердечника ТН.

При проверке возможности гашения феррорезонанса путем подключения резисторов ко вторичной обмотке ТН установлено, что феррорезонансный процесс возникает при промышленной частоте и амплитуде тока через первичную обмотку ТН в той фазе, где возникает резонанс, достигающей приблизительно до 2А. Эти результаты подтвердили эксперименты, проводимые во многих РУ при различных условиях, и дали возможность уточнить причины повреждения ТН. Установлено, что при феррорезонансе максимальные токи в первичной обмотке ТН в установившемся режиме могут достигать 3,5А, что в 50 раз больше, чем номинальный ток ТН. Из многочисленных экспериментальных осциллограмм и численных результатов, иллюстрирующих переходные процессы токов на первичной стороне ТН, видно резкое увеличение магнитного потока. Такое увеличение тока представляет опасность и для самих воздушных выключателей. Расчеты показали, что феррорезонансные процессы не могут развиваться, если нелинейная индуктивность ТН, которая зависит от приложенного напряжения при переходных и установившихся режимах, была, как называется, под контролем.

Сущность изложенного подхода состоит в том, что размагничиванием сердечника ТН осуществляется подавление феррорезонансного процесса и при этом отказываемся от элементов, которые имеют определенные недостатки, о которых уже сказано.

В этой связи математический аппарат, хорошо приспособленный для исследования феррорезонансных процессов с учетом устройств гашения этих процессов, основанных на понятиях физических моделей, не является эффективным средством для анализа феррорезонансных моделей при изучении размагничивания сердечника ТН. Эффективность предложенного подхода была подтверждена результатами эксперимента. На основании экспериментальных результатов были составлены указания по выбору параметров и

установки устройства фиксации и подавления феррорезонанса в РУ 150 – 500 кВ.

Эффективность устройства, основанного на размагничивании сердечника ТН, была теоретически изучена результатами компьютерного моделирования и численным исследованием показаны возможности расширения его функциональных возможностей. Несмотря на существующие алгоритмы вычисления феррорезонансных процессов с ТН, решение задач подавления феррорезонанса с использованием напряжения 0,38 кВ от собственных нужд РУ для размагничивания сердечника ТН в общем случае было невозможно, поэтому необходимо проведение работ по разработке математической модели для анализа этих процессов, которые реально отражают практические процессы с учетом защитного устройства. Исходя из сказанного, рассмотрено устройство, учитывая, что практическая реализация соответствующего устройства уже осуществлена во многих РУ, оно наиболее реально для фиксации подавления феррорезонансных перенапряжений и на его основе было разработано новое устройство подавления феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений [29].

Устройство фиксации и подавления феррорезонанса, которое принято как базисное, представлено на рис.5

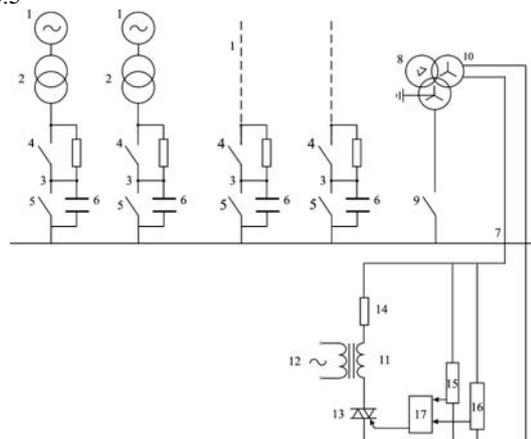


Рис.5. Распределительное устройство:

1-линия электропередачи; 2-силовые блоки; 3-выключатели; 4-шунтирующие резисторы; 5-отделитель; 6-делитель напряжения; 7-сборные шины; 8-трансформатор напряжения; 9-разъединитель; 10-выводы низшего напряжения; 11-трансформатор связи; 12-источник энергии собственных нужд; 13-электронный коммутатор (симистор); 14-балластная нагрузка; 15-датчик феррорезонанса; 16-датчик уровня напряжения; 17-блок управления симистором.

При отсутствии феррорезонанса симистор заперт и устройство не подает напряжение на вторичную обмотку ТН. В случае феррорезонансного явления блок управления симистра его отпирает и на вторичную обмотку ТН подается напряжение, находящееся вследствие феррорезонанса в противофазе с напряжением шин РУ. Это приводит к размагничиванию ТН и тем самым подавлению феррорезонансного процесса.

После подавления феррорезонансного перенапряжения датчик управления напряжения удерживает сигнал, который сохраняет симистор во включенном состоянии и тем самым исключает повторное возникновение феррорезонансного процесса. С появлением нормального напряжения симистор отключает посторонний источник от ТН. Опыт эксплуатации этого устройства показывает, что данный способ подавления феррорезонанса позволяет снизить аварии на РУ, но не исключает возможности появления опасного перенапряжения при коммутации системы шин, ликвидации аналогичного процесса, например, отсутствия блокировки повторного включения линии в случае феррорезонанса, а также способствовало рассмотрению возможности испытания изоляции оборудования РУ с ТН путем искусственного возбуждения управляемого феррорезонансного процесса.

В некоторых случаях в качестве дополнительного мероприятия по повышению возможностей устройства, основанного на размагничивании, были поставлены задачи использования постороннего источника с управлением формой подаваемого напряжения на вторичной обмотке ТН. Были рассмотрены импульсные, с некоторыми интервалами синусоидальной и сложной форм напряжения. Эффектов от этих напряжений можно достичь. Однако, невозможно только расчетным путем с помощью компьютерного моделирования полностью апробировать предложенный способ. Поэтому результаты этих исследований не были включены в работу, т.к. полученные результаты не позволили решить поставленные задачи и разработать рекомендации по практическому использованию созданного устройства. С другой стороны, не были решены вопросы полученной формы кривых напряжений в заданной форме в РУ и не были разработаны алгоритмы синхронизации углов включения напряжения постороннего источника и напряжения на шинах РУ. Основными преимуществами указанного метода (подача импульсного, регулярно повторяющегося синусоида, сложной формы напряжения и т.п.) по сравнению с другими известными устройствами для гашения феррорезонансного перенапряжения является его высокое быстродействие и возможность использования ограничения других опасных перенапряжений, происходящих на очень высоких частотах. Расчетная методика для определения параметров устройства и алгоритма расчета переходных процессов тоже требуют дополнительного исследования и уточнения. Полученные и представленные результаты по моделированию феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений в данной работе позволяют решить эту задачу с определенными уточнениями расчетной схемы и соответствующего метода с применением параллельных процессов в широких пределах изменения частоты и амплитуды перенапряжений.

3.3. Защита от феррорезонансных перенапряжений по принципам размагничивания сердечника ТН.

Предложены и другие варианты реализации способа размагничивания сердечника ТН, из них можно показать метод борьбы с феррорезонансными явлениями, предложенными в последние годы, и основным

является недопущение насыщения магнитопровода ТН, и тем самым, возникновения феррорезонансного перенапряжения.

Принципиальная схема защиты ТН при феррорезонансных процессах, основанная на указанном методе, приведена на рис.6. Устройство работает следующим образом: при отключении выключателей 4, безинерционно, с помощью электронного устройства, во вторичную обмотку ТН вводится сопротивление 1-2 Ом, чем достигается размагничивание сердечника ТН на момент отключения последнего выключателя присоединений. После режима феррорезонансного явления, приблизительно 1,5-2с, сопротивление отключается и, как утверждают авторы, феррорезонансные колебания не возникают.

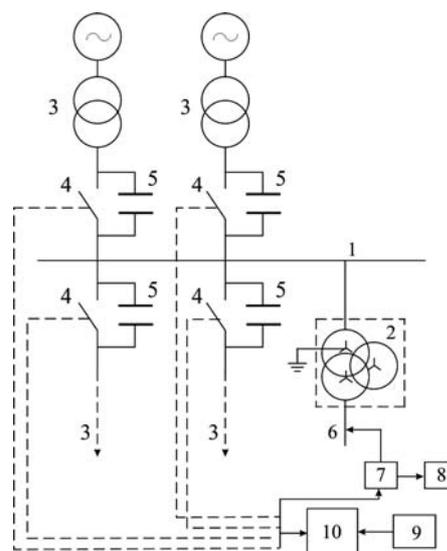


Рис. 6 Принципиальная схема устройства защиты ТН от феррорезонансных процессов.

1 – система шин; 2 – трансформатор напряжения; 3 – присоединения; 4 – выключатель; 5 – емкостные делители; 6 – основная вторичная обмотка ТН; 7 – коммутационное устройство; 8 – низкоомное сопротивление; 9 – релейная защита системы шин; 10 – исполнительный элемент

Если учитывать, что к основным функциям устройства выявления и гашения феррорезонансных перенапряжений РУ с ТН и емкостными делителями напряжения, служащего для исключения повреждения ТН, трансформатора тока и связанных с ними отключений шин и другого оборудования РУ, а также обеспечения правильности действия АПВ, прибавляется предотвращение высокочастотных кумулятивных перенапряжений [30], тогда устройство может оказаться неустойчивым. Это зависит, прежде всего, от так называемого характера развития кумулятивного перенапряжения.

В результате исследований физических процессов для феррорезонансных схем выявлены потенциально опасные эксплуатационные явления, которые способствуют расширению функциональных возможностей изложенных устройств, и разработки соответствующих новых руководящих указаний, где указано

обязательное одновременное использование подавления феррорезонансных и высокочастотных кумулятивных перенапряжений в одном исполнении.

Чтобы осуществить данный подход рассмотрены понятия коммутационных кумулятивных высокочастотных перенапряжений, доказываются и обосновываются необходимости их отражения в решении задач выявления и гашения феррорезонансных перенапряжений в РУ с электромагнитными ТН, содержащими емкостные делители напряжения.

Следует отметить, что не менее важной задачей в плане организации защиты от обоих перенапряжений в едином устройстве, является задача определения оптимальных параметров защитных элементов в зависимости от условий возникновения этих перенапряжений. При таком подходе защиты от перенапряжений в едином защитном устройстве, естественно возникает ряд новых задач, ранее не возникающих в области моделирования и анализа волновых переходных процессов в сложных электрических схемах. Одной из важнейших среди них является моделирование коммутационных кумулятивных перенапряжений. При этом, естественно, выдвигаются требования изучения этого явления с точки зрения электротехнических задач, как с взаимно связанной или составляющей одной из двух компонентов феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений. Если в процессе эксплуатации РУ осуществляется защита от феррорезонансных перенапряжений непосредственно на вторичной цепи ТН, то такими дополнительными условиями могут быть условия осуществления, необходимые для защиты от кумулятивных перенапряжений.

3.4. Защита от феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений.

Для обеспечения надежности работы распределительного устройства необходимо защитить трансформаторы тока и напряжения, шины распределительных устройств и присоединенные к ним элементы не только от феррорезонансных перенапряжений, но и от высокочастотных перенапряжений при включении шин под напряжение одним из выключателей устройства.

При включении под напряжение шин, вследствие их малой емкости, возникает кумулятивное нарастание перенапряжения при сходящихся контактах выключателя. Для исключения этих перенапряжений необходимо увеличить ток включения.

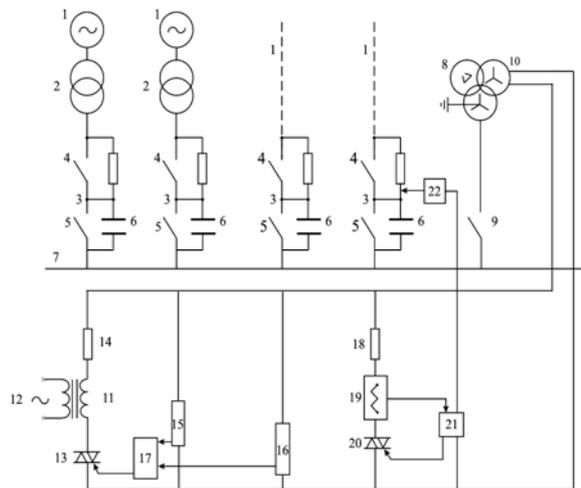
Задачей данного устройства является повышение надежности функциональных возможностей известного устройства путем предотвращения перенапряжения при коммутации - включении выключателя присоединений с целью восстановления нормальной работы РУ.

Для решения указанной задачи РУ высокого напряжения, содержащее сборные шины, к которым подключены через выключатели с отделителями, шунтированными емкостными делителями напряжения присоединения, ТН через разъединитель, первичная обмотка которого с заземленной нейтралью подключена к шинам, а к вторичной обмотке подключен через электронный коммутатор трансформатор связи с источником собственных нужд распределительного уст-

ройства, вторичная обмотка которого включена последовательно в цепь балластной нагрузки, блок управления коммутатором соединен с выходом датчиков феррорезонанса и уровня напряжения, подключенных входами к вторичной обмотке трансформатора напряжения дополнительно снабжено балластной нагрузкой, трансформатором тока, коммутирующим аппаратом (симистором), причем они соединены последовательно и включены параллельно с ветвью, содержащую последовательно соединенные балластную нагрузку, электронный коммутатор и трансформатор связи с источником собственных нужд РУ, блоком управления симистором, который введен в цепь управления включением выключателя, осуществляющего автоматическое повторное включение шин под напряжение, и соединен с выходом блока трансформатора тока. Последовательное соединение блока управления симистором с блоком управления включением выключателя, осуществляющего автоматическое повторное включение шин под напряжение, должно обеспечить опережающее включение балластной нагрузки к вторичной стороне ТН, для того, чтобы ограничить высокочастотные перенапряжения при включении присоединений к сборным шинам выключателями.

Такое решение применения РУ с предотвращением возникновения и подавления феррорезонанса позволяет отказаться от дополнительных мероприятий по его защите от высокочастотных перенапряжений при коммутации - включении выключателя.

На рис. 7 представлено описываемое устройство.



7. Распределительное устройство

1-линия электропередачи; 2-силовые блоки; 3-выключатели; 4-шунтирующие резисторы; 5-отделитель; 6-делитель напряжения; 7-сборные шины; 8-трансформатор напряжения; 9-разъединитель; 10-выводы низшего напряжения; 11-трансформатор связи; 12-источник энергии собственных нужд; 13-электронный коммутатор (симистор); 14-балластная нагрузка; 15-датчик феррорезонанса; 16-датчик уровня напряжения; 17-блок управления симистором 13; 18-дополнительная балластная нагрузка; 19-блок трансформатора тока; 20-симистор; 21- блок управления симистором 20; 22-блок управления выключателем

Линии 1 электропередачи и силовые блоки 2, генератор-трансформатор (присоединение) через выключатели 3 с основными контактами, шунтированными резисторами 4, и отделителями 5, шунтированными емкостными делителями 6 напряжения, подключены к сборным шинам 7 через разъединитель 9. К выводам 10 низшего напряжения трансформатора 8 напряжения подключены трансформатор 11 связи с источником 12 энергии собственных нужд через электронный коммутатор (симистор) 13 балластную нагрузку 14, датчики феррорезонанса 15 и уровня напряжения 16. Выходы датчиков 15 и 16 подключены к блоку 17 управления симистором 13. Дополнительная балластная нагрузка 18 с блоком трансформатора тока 19 и симистором 20 включена параллельно ветви, содержащей балластную нагрузку 14, электронный коммутатор (симистор) 13 и трансформатор связи 11. Выход трансформатора тока 19 соединен с блоком 21 управления симистором 20. В цепь управления включением выключателя 3, осуществляющего автоматическое повторное включение шин, введен блок 21 управления симистором 20 путем последователь-

ного соединения его с блоком 22 управления выключателем 3.

При подаче сигнала на включение выключателя 3, осуществляющего автоматическое повторное включение шин, сигнал проходит через блок 21 и включает балластную нагрузку 18 с помощью симистора 20 и подготавливает к включению выключатель 3. Тем самым достигается опережающее включение балластной нагрузки 22 и обмотка низшего напряжения трансформатора напряжения закорачивается через низкоомную нагрузку 18.

В результате через трансформатор напряжения 8 после включения выключателя 3 протекает ограниченный ток короткого замыкания в несколько ампер, а не емкостной ток шин. Это приводит к предотвращению кумулятивного нарастания перенапряжений при коммутации – включении ненагруженных шин выключателем. Ток короткого замыкания в трансформаторе тока 19 приводит к отключению дополнительной балластной нагрузки.

После этого система переходит в исходное состояние.

-
- [1]. Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения / Под ред. К.М. Антипов, В.М. Максимов, С.С. Шур и др. М.: Союзтехэнерго, 1987, 36с.
- [2]. Руководящие указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения / Под ред. К.М. Антипов, Ч.М. Джуварлы, Е.М. Дмитриев и др. К.: НПО Энергопроект, 1993, 28с.
- [3]. Качесов В.Е., Пятков А.В. Феррорезонансные перенапряжения при отключении ненагруженных шин подстанции 220 кВ с присоединенными трансформаторами напряжения типа НКФ / Сб. научн. трудов. Техника и электродинамика высоких напряжений. Новосибирск, НГТУ, 1993, с.45-53.
- [4]. Максимов В.М. Исследование повреждаемости электромагнитных трансформаторов напряжения, разработка способов и технических средств их защиты в распределительных устройствах 110-750 кВ: Автореф. дисс. ...канд. тех. наук. Новосибирск, 1997, 19 с.
- [5]. Зихерман М.Х., Максимов В.М. Определение возможности возникновения феррорезонанса в ОРУ 220-500 кВ электростанций и подстанций энергосистем / Экспресс-информация. Серия: Эксплуатация и ремонт электрических сетей. М.: ИнформЭнерго, 1979, вып.1, с. 14-18.
- [6]. Nikiforova W.N., Walow W.M., Maximov W.M. Erarbeitung lines Systems fur die Uberwachung der Elektroenergiequalität in elektrischen Netzen / 28 Internationales Wissenschaftliches colloquium 24 October bis 28 October 1983, Heinerduck ilmenau, 1983, s.267-271.
- [7]. Назаров А.И. Балластные резисторы в цепи трансформатора напряжения распределительных устройств сетей 150-500 кВ: Автореф. дисс. ... канд.тех.наук. Баку, 1983, 23 с.
- [8]. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Явление переходного резонанса в двухчастотном колебательном контуре // Изв. РАН, Энергетика, 2002, № 1, с. 95-103.
- [9]. Голдобин Д.А., Козловская О.М., Овсянников А.Г. Анализ электромагнитных процессов при коммутации разъединителями высокого напряжения / Сб. научн. трудов. Техника и электродинамика высоких напряжений Новосибирск, НГТУ, 1993, с. 66-73.
- [10]. Ковалев Б.И., Киндяков В.С., Ковалева А.В., Максимов В.М. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защиты от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. М.: СПО ОРГРЭС, 1998, 26 с.
- [11]. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Шидловский А.К. и др. Защита от феррорезонансных напряжений в электрических сетях //Техническая электродинамика, 1991, №4, с. 92-98.
- [12]. Kuznetsov V., Tugoi J., Dmitriev V., Molchanov V. Elimination of ferreazonanse processes in electrical networks 110-750 kV / In: Proc. VII Int. Sump. On shortcircuit currents in power systems, Wrawa, Poland, 1996, v.z. 10,1-2,10,4.
- [13]. Ferroresonanz vor allem in Netren mit Spannuugswandereen Teib.r. Abhilfemasnahmen bei versche-

- denen Netanlagen / Dettann klaus – Dieter, Heuck. Klaus, Kegel Reihard // ETZ: Elektrotechn.Z. 1988, - 109, №19, p.900-904
- [14]. Large mil power outages Caused by Potential transformer ferroresonance / Crane D.Ray, walsh Georgew // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1988, - 24, №4, p. 635-640.
- [15]. Chakravarty S.K. and Nayar C. Series ferroresonance in power systems // Electrical Power & Energy Systems, 1995, Vol. 17, № 4, pp. 267-274.
- [16]. Гашимов А.М., Борисенко Л.С., Джуварлы Ч.М. и др. Предотвращение резонанса напряжений с трансформаторами напряжения 150-500 кВ / Ограничение токов коротких замыканий и сопутствующих перенапряжений, Баку, Элм, 1983, с.145-159.
- [17]. Артемьев Д.Е., Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Статистические основы выбора изоляции линии электропередачи высших классов напряжения. М.: Энергия, 1965, 215 с.
- [18]. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М. Задачи математического моделирования в проблеме повышения надежности электрических сетей высокого напряжения // Изв. АН Азербайджана, 1999, № 6, с. 128-133.
- [19]. Поляков В.С., Черноусов В.М. Феррорезонанс в сети 220 кВ и меры борьбы с ним / Труды ЛПИ, 1982, № 382, с. 65-71.
- [20]. Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Изоляция электрических сетей. Л.: Энергия, 1979, 304 с.
- [21]. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Максимов В.М., Шидловский А.К. Анализ подавления феррорезонанса с трансформаторами напряжения 110-500 кВ / В кн.: Численные эксперименты при исследованиях переходных и квазиустановившихся процессов в электрических сетях, Баку, Элм, 1991, с. 126-131.
- [22]. Назаров А.И. Исследование феррорезонансных процессов с выключателями типа ВВБ в сетях 150 кВ / В сб.: Энергетика и электрофикация, Киев, 1982, № 1, с. 38-42.
- [23]. Качесов В.Е., Пятков А.В. Феррорезонансные перенапряжения при отключении ненагруженных шин подстанции 220 кВ с присоединенными трансформаторами напряжения типа НКФ / Сб. научн. трудов. Техника и электродинамика высоких напряжений. Новосибирск, НГТУ, 1993, с.45-53.
- [24]. Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения / Под ред. К.М. Антипов, В.М. Максимов, С.С. Шур и др. М.: Союзтехэнерго, 1987, 36с.
- [25]. Руководящие указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения / Под ред. К.М. Антипов, Ч.М. Джуварлы, Е.М. Дмитриев и др. К.: НПО Энергопроект, 1993, 28с.
- [26]. Головинский И.А. Объектно-ориентированный подход к разработке программ анализа коммутационных схем электрических сетей // Изв. РАН, Энергетика, 2001, № 2, с. 46-56.
- [27]. Руководящие указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения, Киев, УНПО Энергопроект, 1995, с. 34.
- [28]. Назаров А.И. Балластные резисторы в цепи трансформатора напряжения распределительных устройств сетей 150-500 кВ: Авторф. дисс. ... канд.тех.наук. Баку, 1983, 23 с.
- [29]. Гасанова С.И., Гашимов А.М., Дмитриев Е.В. Распределительное устройство / Бюллетень изоб. Азерб. Респ., № 3, 2003, 10, (а 201 0207), с. 72.
- [30]. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. Новосибирск, НГТУ, 2004, 368 с.