

Исследование высокочастотных импульсных перенапряжений на Саяно-Шушенской ГЭС

БОРИСОВ Р.К.¹, СМЕРНОВ М.Н.², ГОЛДУН А.В.¹, БЕЛОБОРОДОВ В.В.³, ИВАНОВ Н.А.³

¹НИИ "МЭИ", Москва, Россия

²НПФ ЭЛНАП, Москва, Россия

³СШ ГЭС, Красноярск, Россия

Коммутационные импульсные высокочастотные перенапряжения с частотой колебаний до нескольких МГц представляют наибольшую опасность для силовых трансформаторов и кабельных муфт из сшитого полиэтилена. В рамках СИГРЭ создана рабочая группа для изучения влияния импульсных высокочастотных перенапряжений на надежность работы силовых трансформаторов. Проведены исследования высокочастотных импульсных перенапряжений в сети 500 и 15,75 кВ на Саяно-Шушенской ГЭС. Для измерений импульсных перенапряжений использована новая цифровая система регистрации с бесконтактными емкостными датчиками. Такая система регистрации позволила одновременно получать информацию о перенапряжениях на кабельных муфтах и силовых трансформаторах со стороны 500 и 15,75 кВ. Проведенные исследования показали, что наибольшие амплитудные значения высокочастотных импульсных перенапряжений имеют при коммутациях разъединителей в КРУЭ 500 кВ. Через емкости между обмотками трансформатора импульсные перенапряжения передаются из сети 500 кВ на напряжение 15,75 кВ. В этом случае уровень перенапряжений может более чем в десять раз превышать амплитудное значение рабочего напряжения. Сформирована расчетная модель в программе АТР-ЕМТР и проведена ее верификация по экспериментальным данным. Проведенные расчеты и эксперименты показали, что наиболее эффективным средством защиты от высокочастотных перенапряжений являются RC-цепочки.

Ключевые слова: импульсные высокочастотные перенапряжения, экспериментальные исследования, устройства защиты

Исследованиям коммутационных и грозовых перенапряжений и защите от них в сетях высокого напряжения посвящено большое количество работ, например [1–3]. Разработаны нормативные документы по защите от перенапряжений [4, 5]. Однако, как справедливо отмечается в [6, 7], с появлением нового силового оборудования (КРУЭ, элегазовые и вакуумные выключатели) возникающие при коммутациях высокочастотные (ВЧ) процессы с большой вероятностью могут привести к повреждению силовых трансформаторов и кабелей из сшитого полиэтилена. При коммутациях в КРУЭ сети высокого напряжения переходный процесс, как правило, сопровождается импульсными ВЧ перенапряжениями с частотой колебаний до нескольких МГц [8–10]. Наибольшую опасность представляют коммутации шинных разъединителей. В работах [11–14] показано, что при резонансе такие перенапряжения могут вызвать повреждение силовых трансформаторов. При импульсных перенапряжениях в твердой изоляции (например в кабельных муфтах из сшитого полиэтилена) наблюдается последовательный пробой изоляции вследствие кумулятивного эффекта [15].

Для защиты от опасного воздействия на изоляцию ВЧ импульсных перенапряжений необходимо знать их

амплитудно-частотные характеристики. Эта задача решается с помощью стандартных и нестандартных пакетов программ *ЕМТР*, *MatLab* и др.

Известные эксперименты по регистрации перенапряжений в сетях ВН и СН немногочисленны. При проведении таких экспериментов необходимо использовать делители напряжения, что связано с техническими и организационными трудностями в действующих электроустановках.

Статья посвящена экспериментально-расчетным исследованиям импульсных ВЧ перенапряжений, проведенных на Саяно-Шушенской ГЭС. Для измерений импульсных перенапряжений вместо традиционных делителей напряжения была использована новая цифровая система регистрации с бесконтактными емкостными датчиками.

Система регистрации ВЧ перенапряжений. Система регистрации коммутационных ВЧ перенапряжений включала в свой состав цифровой регистратор [16], бесконтактные датчики напряжения и устройства связи для передачи информации в АРМ. Основным преимуществом такой системы регистрации является применение бесконтактных датчиков напряжения вместо традиционных делителей напряжения.

Электрические соединения ГЭС на напряжении 500 кВ выполнены по схеме «три вторых» в виде КРУЭ-500 кВ. К КРУЭ подключены пять блочных трансформаторов 500/15,75 кВ и четыре воздушные линии электропередачи ВЛ 500 кВ. Подключение блочных трансформаторов к КРУЭ выполнено с помощью воздушных перекидок 500 кВ. Между КРУЭ и воздушными перекидками, а также между КРУЭ и ВЛ 500 кВ выполнены кабельные вставки 500 кВ.

Система регистрации ВЧ перенапряжений устанавливалась на блоках Т1–Т5. Датчики напряжения установлены на токопроводах генераторного напряжения 15,75 кВ на фазах *A*, *B* и *C* на генераторах Г1, Г3, Г5, Г7 и Г9 вблизи трансформатора (рис. 1). Также датчики напряжения установлены под токопроводами напряжением 500 кВ на фазах *A*, *B* и *C* на трансформаторах Т1–Т5 и на ОРУ в местах перехода с КЛ на ВЛ под каждой фазой шин 500 кВ на металлоконструкциях порталов. Для передачи сигналов от датчика к регистратору были применены экранированные кабели типа «витая пара» для защиты от помех.

Результаты регистрации ВЧ перенапряжений. После установки системы регистрация ВЧ перенапряжений на блоках трансформаторов выполнялась в период с 11 февраля по 20 сентября 2022 г. Такой продолжительный период регистрации в сети 15,75 кВ (15 точек регистрации) и в сети 500 кВ (30 точек регистрации) позволил получить большой объем информации по амплитудно-частотным характеристикам импульсных ВЧ перенапряжений практически при всех возможных видах коммутаций. Были зарегистрированы следующие типичные события:

- ввод/вывод блоков Т1–Т5;
- короткое замыкание на ВЛ 500 кВ;
- вывод/ввод шиносоединительного выключателя В-С1;
- вывод/ввод ВЛ 500 кВ;
- вывод/ввод реакторов РШ-541 и РШ-542.

ВЧ перенапряжения регистрировались при коммутациях: в сети 15,75 кВ выключателей и разъединителей генераторов, в сети 500 кВ разъединителей и выключателей в КРУЭ.

По результатам регистрации установлено, что ВЧ перенапряжения, возникающие при коммутациях на генераторном напряжении, носят локальный характер. Длительность импульсов перенапряжений составляет единицы микросекунд, основная частота колебаний – около 2 МГц, амплитуда – не более 40 кВ (рис. 2).

При коммутации разъединителей в сети 500 кВ у трансформатора ВЧ перенапряжения также носят локальный характер. Наибольшие уровни ВЧ перенапряжений наблюдались при коммутации разъединителей в КРУЭ. При коммутации шинных разъединителей ВЧ перенапряжения возникают на всех блоках трансформаторов. Амплитуда импульсных перенапряжений в сети 15,75 кВ достигает 150 кВ, основная частота



Рис. 1. Трансформатор Т5

Fig. 1. T5 transformer

примерно 2 МГц, а длительность импульса составляет десятки микросекунд. При этом наблюдается явление резонанса напряжения на частоте около 2 МГц (рис. 3).

В сети 500 кВ наибольшие значения ВЧ перенапряжений (примерно 1 МВ), зарегистрированных за указанный период, наблюдались на выходе из КРУЭ (кабельные муфты). На выводах 500 кВ трансформаторов наибольшие значения ВЧ перенапряжений не превышали 700 кВ. При коммутации разъединителей за период 50 Гц регистрируется несколько импульсов перенапряжений (рис. 4) в сети 500 и 15,75 кВ.

Наибольшие амплитудные значения ВЧ перенапряжений в сети 500 и 15,75 кВ зарегистрированы при коммутациях шинными разъединителями в КРУЭ. Следует отметить, что при таких коммутациях ВЧ перенапряжения регистрируются на всех блоках трансформаторов.

Расчет ВЧ импульсных перенапряжений. Расчеты проводились в программе *АТР-ЕМТР*. При проведении расчетов были получены исходные данные и определены критерии для формирования расчетных схем.

Провести расчеты для схемы замещения, полностью эквивалентной реальной схеме сети 500 и 15,75 кВ, очень сложно. При формировании расчетных схем с целью упрощения расчетов были приняты следующие решения и основные допущения:

схемы замещения составлены в однофазном варианте (рис. 5), так как влиянием фаз на переходные процессы можно пренебречь;

переходные процессы на генераторном напряжении не влияют на переходные процессы на стороне 500 кВ, поэтому расчетные схемы подготовлены отдельно на напряжении 500 и 15,75 кВ;

оборудование представлено в виде сосредоточенной емкости на землю, индуктивность заземления не учитывается;

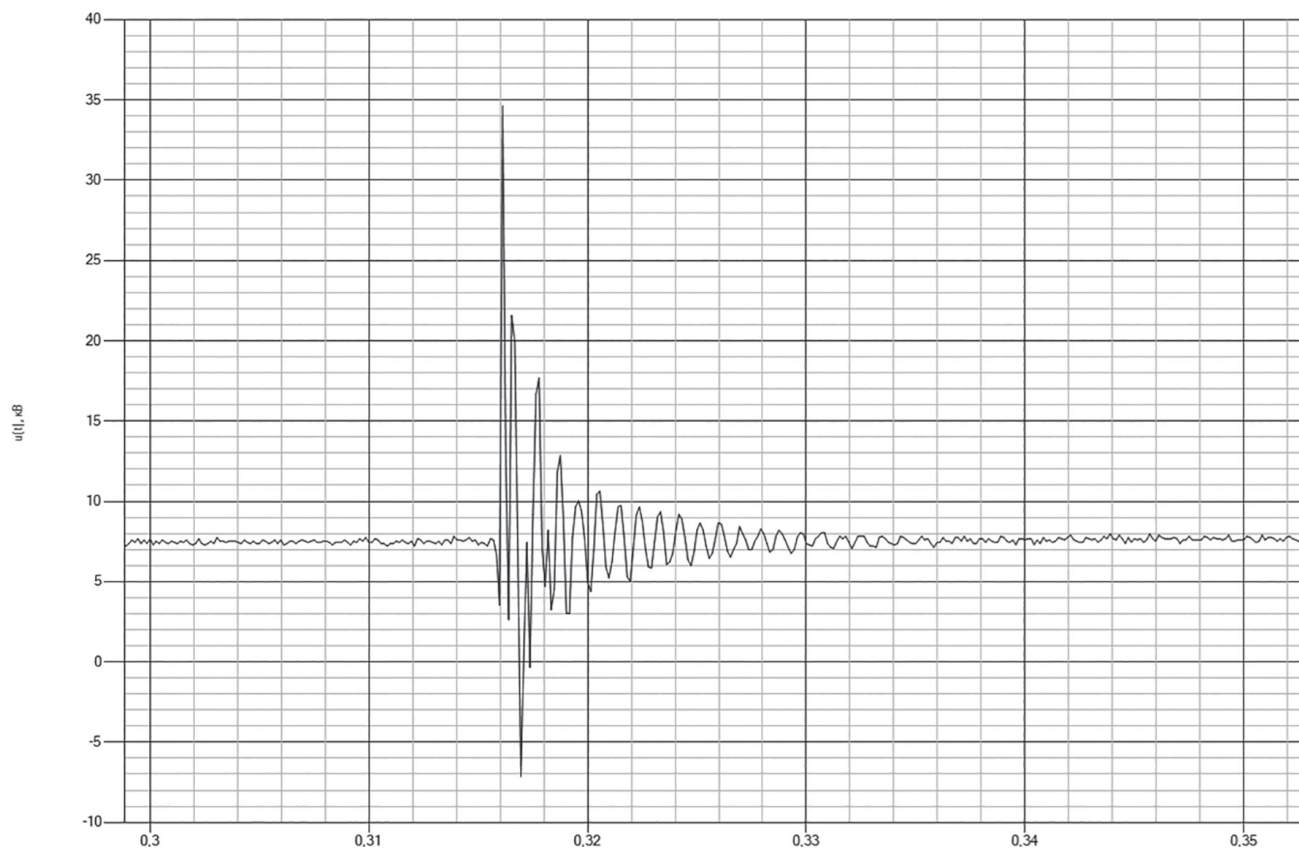


Рис. 2. Типичная осциллограмма ВЧ перенапряжения при коммутации разъединителя на генераторном напряжении

Fig. 2. Typical high frequency overvoltage waveform during 15.75 kV generator disconnector switching

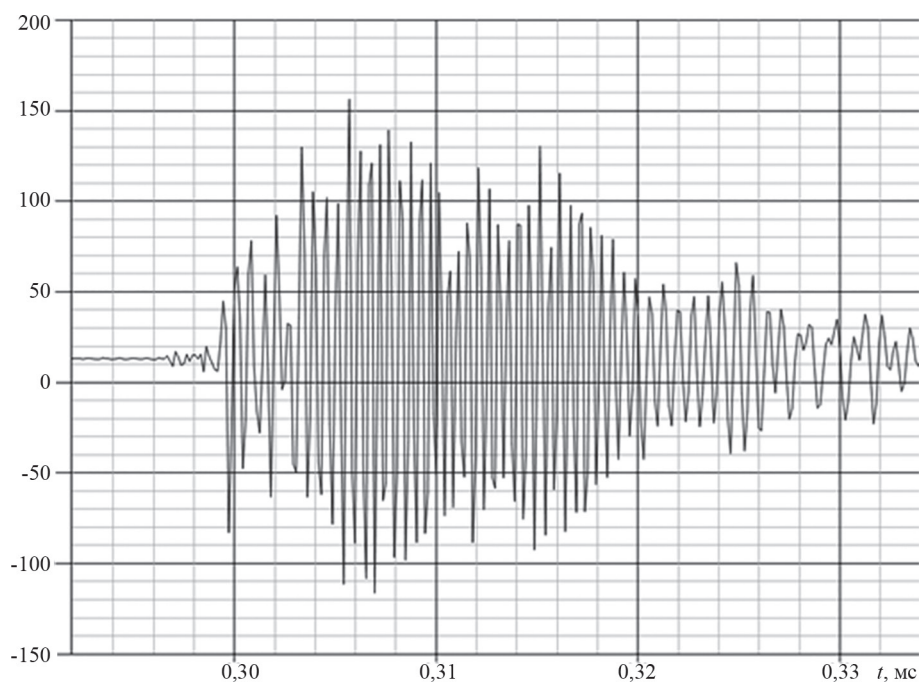


Рис. 3. Типичная осциллограмма напряжения на шинном проводе генераторного напряжения при коммутации разъединителя в КРУЭ

Fig. 3. Typical high frequency overvoltage waveform at 15.75 kV busbar during GIS disconnector switching

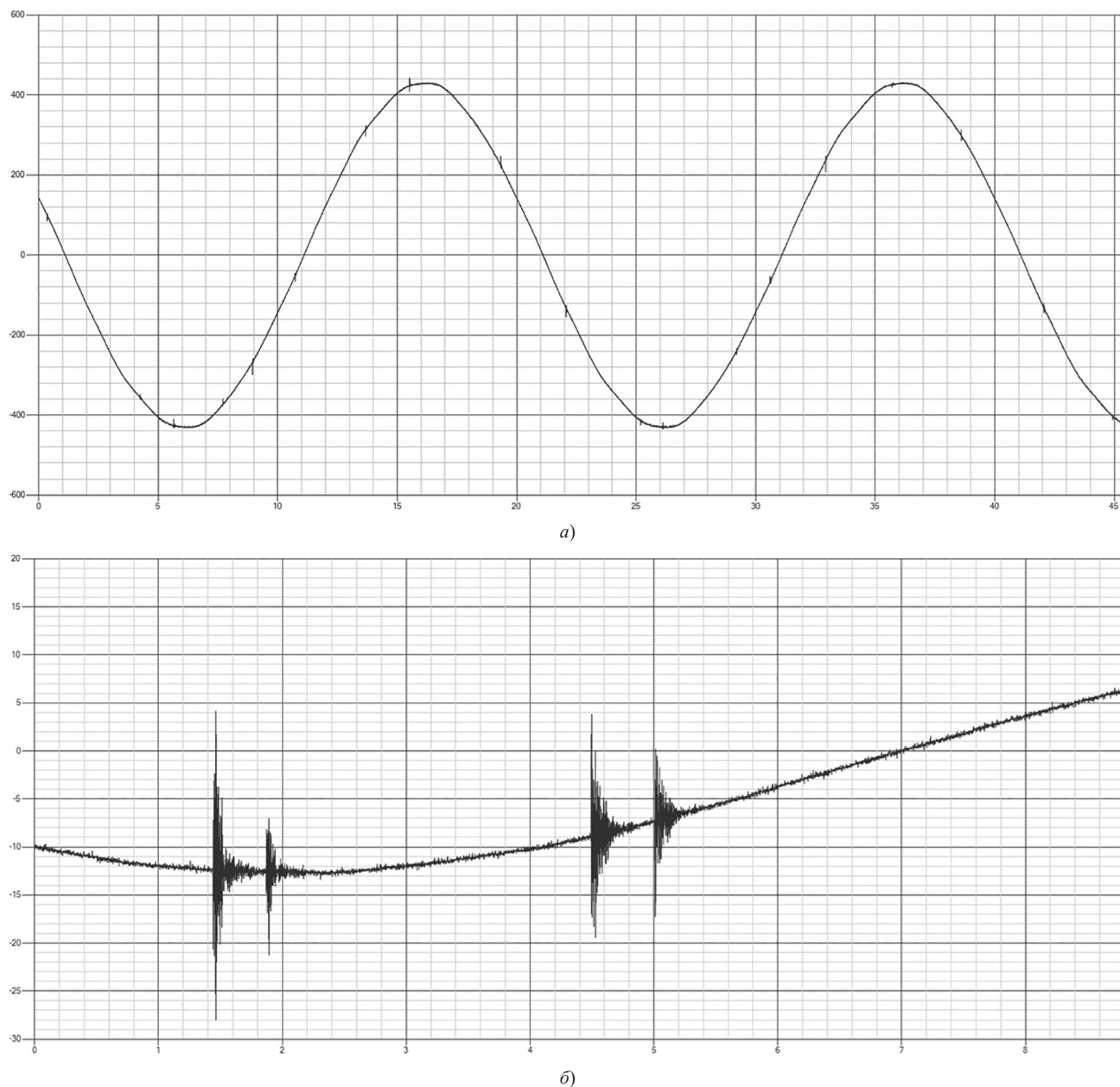


Рис. 4. Типичные осциллограммы напряжения при коммутации разъединителя в КРУЭ: а – в сети 500 кВ; б – в сети 15,75 кВ

Fig. 4. Typical voltages during GIS disconnector switching recorded: а – in 500 kV network; а – in 15.75 kV network

ошибки КРУЭ, токопроводы на генераторном напряжении, кабели 500 кВ, воздушная часть переключателя между ОРУ и блочными трансформаторами представлены в виде линий с распределенными параметрами («длинной» линии);

трансформаторы Т1–Т5 смоделированы в виде колебательного контура, моделирующего «длинную» линию с параметрами, соответствующими обмотке ВН;

поскольку переходный процесс в отходящих линиях 500 кВ имеет длительность, большую на порядки, чем переходные процессы в КРУЭ (из-за разности длины участков цепи в КРУЭ и ВЛ), то длина отходящих линий не играет существенной роли в расчете;

активные сопротивления элементов не учтены, кроме воздушных переключателей 500 кВ;

в схемы замещения включалось только то оборудование, от которого существенно зависят амплитудно-частотные характеристики ВЧ перенапряжений.

По результатам анализа данных регистрации перенапряжений составлены расчетные схемы замещения и выполнены расчеты переходных процессов в цепях 500 и 15,75 кВ для выбранных коммутаций.

Для верификации расчетных схем были проведены расчеты перенапряжений при различных коммутациях и их сравнение с результатами, полученными при измерениях. Пример результатов расчетов и измерений представлен на рис. 6.

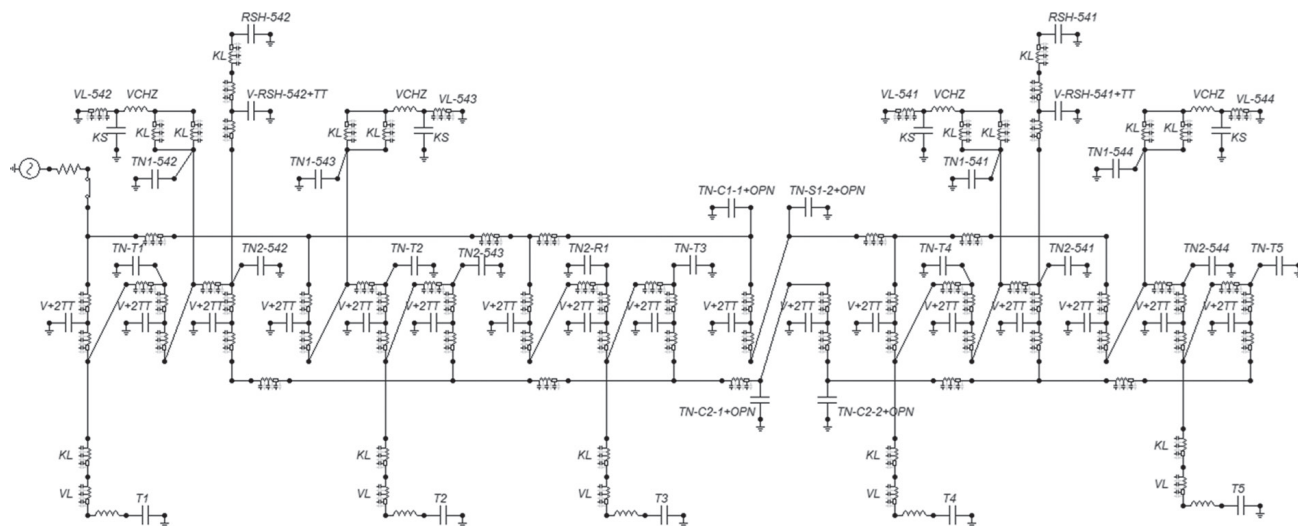
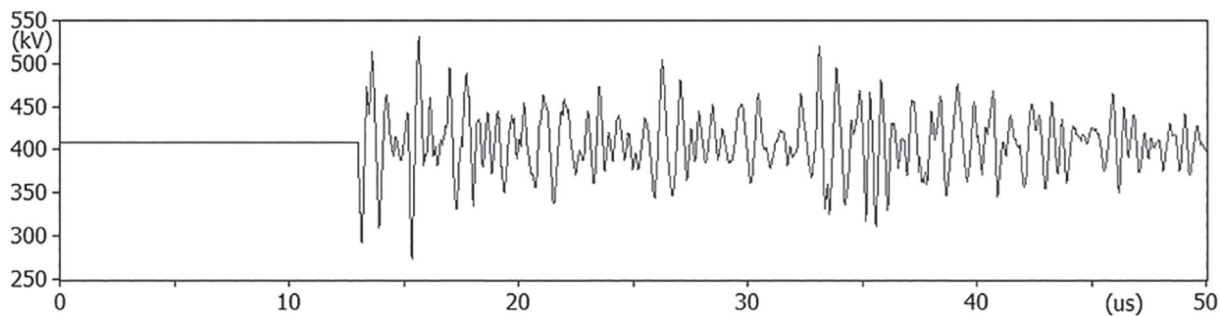


Рис. 5. Схема замещения на напряжении 500 кВ в программе ATP-EMTP

Fig. 5. Equivalent circuit of 500 kV network in ATP-EMTP program

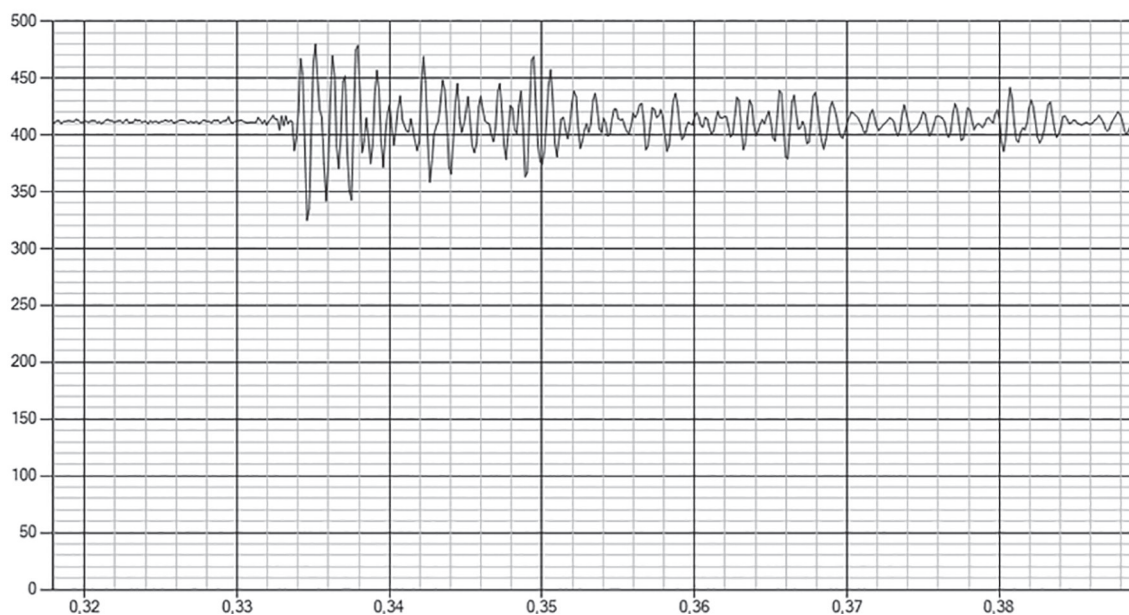


(file SSHGES_KRUE500_T_ver_VS2T5_ON_capac+_Ztr_no_SHR_exper.pl4; x-var t) v:XX0046

a)

T4 Датчик напряжения ф.А 500 кВ [18 мая 2022 4:52.15]

t = 0,360 нс
U = 138,0 кВ



b)

Рис. 6. Пример осциллограмм напряжения на стороне 500 кВ Т4 при включении В-С2-Т5: а – расчетное напряжение; б – измеренное напряжение

Fig. 6. Example of voltage waveform at 500 kV of T4 transformer during B-C2-T5 circuit breaker closing: a –calculated; б –measured

Расчеты перенапряжений при различных коммутациях и их сравнение с результатами, полученными при измерениях, показали, что разница в амплитудно-частотных характеристиках расчетных значений и зарегистрированных не превышает 15 %. Такое расхождение расчетных и экспериментальных значений вполне допустимо (в пределах погрешности измерений), что подтвердило правомерность принятых допущений.

Анализ полученных результатов расчетов показывает, что частотный диапазон перенапряжений, источником которых являются коммутации на напряжении 500 кВ, составляет примерно от сотен кГц до 4 МГц. Основная частота максимальных перенапряжений – примерно 2 МГц.

На напряжении 500 кВ расчетные амплитудные значения помех составляют до 650 кВ импульсной составляющей, на напряжении 15,75 кВ – до 165 кВ импульсной составляющей.

Полученные значения опасности для изоляции 500 кВ не представляют, так как согласно ГОСТ 1516.3 изоляция трансформаторов 500 кВ испытывается коммутационным импульсом амплитудой не менее 1050 кВ. Известно, что для импульсных испытательных напряжений 1,2/50 мкс (для воздушной изоляции) разрядное напряжение примерно в 1,7 раза выше, чем при переменном напряжении 50 Гц. Т.е. коэффициент импульса примерно 1,7. Для более высоких частот (например для 2 МГц) коэффициент импульса, который был установлен при лабораторных экспериментах, составляет более трех.

Необходимо предусмотреть мероприятия по защите от ВЧ перенапряжений для генераторного напряжения [5, 7]. Защита от перенапряжений в сетях высокого и среднего напряжения осуществляется, как правило, с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН). Проведенные исследования [15] показали, что ОПН имеет ограниченную зону защиты в действующих электроустановках. Связано это с тем, что при срабатывании ОПН происходит скачок тока и индуктивное падение напряжения на петле присоединения компенсирует защитное действие ОПН. Для снижения уровней перенапряжений на напряжении 15,75 кВ рекомендовано установить RC-цепь с параметрами: $R = 1 \text{ Ом}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$.

Экспериментальное исследование эффективности защиты от ВЧ импульсных перенапряжений. Для проверки эффективности защиты с помощью RC-цепочки с параметрами, полученными в результате проведенных расчетов, были проведены эксперименты по моделированию ВЧ перенапряжений. В экспериментах от генераторов импульсных напряжений на стороне 500 кВ подавались колебательные затухающие импульсы ВЧ напряжений с частотой, характерной для ВЧ перенапряжений по данным мониторинга: 0,01, 0,05, 0,5, 1,0 и 2,0 МГц.

Измерение напряжения (тока) на стороне 500 и 15,75 кВ проводилось при отсутствии и наличии RC-цепочки для ограничения перенапряжений.

По результатам экспериментов установлено, что при установке RC-цепей ($R = 1 \text{ Ом}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$) с короткими проводниками присоединения на выводах

обмотки 15,75 кВ относительно земли ВЧ перенапряжения практически полностью подавляются с коэффициентом ослабления не менее 1000.

RC-цепи необходимо устанавливать на обмотки 15,75 кВ каждой фазы трансформаторов Т1–Т5 на обоих выводах.

Выводы. Расчетно-экспериментальные исследования на Саяно-Шушенской ГЭС показали, что при коммутациях в КРУЭ возникают ВЧ перенапряжения. Наибольшую опасность представляют резонансные явления на высокой частоте на генераторном напряжении при коммутациях шинными разъединителями в КРУЭ. В этом случае уровень ВЧ перенапряжений в сети 15,75 кВ может более чем в десять раз превышать амплитудное значение рабочего напряжения.

При проектировании энергообъектов с КРУЭ необходимо выполнять расчеты ВЧ перенапряжений и определять мероприятия по защите от них. Большой объем экспериментальных данных позволил сформировать упрощенные схемы замещения для расчетов в программе АТР-ЕМТР и провести их верификацию. Можно рекомендовать их для проведения расчетов при проектировании.

Установлено, что защита от ВЧ перенапряжений эффективно осуществляется с помощью RC-цепочки, параметры которой определены расчетным путем.

Эксперименты по моделированию ВЧ перенапряжений показали, что при установке RC-цепей с выбранными параметрами относительно земли на обоих выводах обмотки 15,75 кВ каждой фазы трансформаторов Т1–Т5 ВЧ перенапряжения практически полностью подавляются с коэффициентом ослабления не менее 1000.

Предложенная методика моделирования экспериментальной проверки эффективности защиты от ВЧ перенапряжений может применяться на этапе пусконаладочных работ на электрических станциях и подстанциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004, 368 с.
2. Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевига. М.: Энергия, 1976, 488 с.
3. Базуткин В.В. и др. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. СПб.: Энергоатомиздат, 1995, 316 с.
4. СТО 56947007-29.240.01.221-2016. Руководство по защите электрических сетей напряжением 110–750 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений, 2016, 46 с.
5. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. М.: СПО ОРГРЭС, 1998, 26 с.
6. Кадомская К.П. Перенапряжения в сетях среднего и высокого напряжения. – Новости электротехники, 2009, № 2(56), с. 12–14.
7. Шейко П.А. Трансформаторы высокого напряжения. Повреждения вследствие коммутационных перенапряжений. – Новости электротехники, 2013, № 1(79), с. 22–25.
8. Лавров Ю.А. и др. Перенапряжения при коммутациях блочного трансформатора 500 кВ элегазовым выключателем. – Электро, 2010, № 6, с. 24–27.
9. Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П. Исследование высокочастотных перенапряжений и способы их ограничения. – Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2010, № 1, с. 244–250.

10. Зильберман В.А. Предотвращение повреждений трансформаторов на электростанциях с укрупненными энергоблоками, подключенными к комплектному распределительному устройству через высоковольтные кабели. – Электричество, 2017, № 10, с. 47–54.

11. Matveev D.A., Larin V.S., Zuikov A.V. Approach to Analysis of Resonance Phenomena and Overvoltages Due to Interaction between Power Transformer and External Network. – CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium, 2013, pp. 1–8.

12. Larin V., Matveev D., Volkov A. Study of Transient Interaction in a System with Transformer Supplied from Network through a Cable: Assessment of Interaction Frequencies and Resonance Evolution. – 3rd International Colloquium Transformer Research and Asset Management, 2014, pp. 1–11.

13. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 1. Условия возникновения и защитные мероприятия. – Электричество, 2015, № 11, с. 33–40.

14. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 3. Измерение напряжения в обмотках на резонансных частотах. – Электричество, 2016, № 1, с. 20–24.

15. Борисов Р.К., Коломиец Е.В., Гаффаров Р.Ф. Высоко-частотные коммутационные перенапряжения в сети среднего напряжения. – Электричество, 2020, № 4, с. 4–9.

16. Борисов Р.К. и др. Система мониторинга электромагнитной обстановки на подстанциях. – Энергоэксперт, 2019, № 1(69), с. 38–40.

Поступила в редакцию [20.10.2022]
Принята к публикации [17.11.2022]

Авторы:



Борисов Руслан Константинович – кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений», Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия.



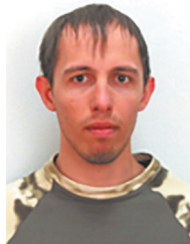
Смирнов Максим Николаевич – заместитель ген. директора ООО «Научно-производственная фирма Электротехника: Наука и Практика», Москва, Россия.



Голдун Андрей Викторович – инженер кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений», Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия.



Белобородов Василий Владимирович – начальник службы мониторинга оборудования, Филиал ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожнего», Красноярск, Россия.



Иванов Никита Александрович – инженер Службы мониторинга оборудования, Филиал ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожнего», Красноярск, Россия.

Experimental Study of High Frequency Impulse Overvoltages at Sayano-Shushenskaya HPP

BORISOV Ruslan K. (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia) – Leading Researcher of the High Voltage Engineering and Electrophysics Dept., Cand. Sci. (Eng.).

SMIRNOV Maksim N. (LLC "Electrical Engineering: Science and Practice Scientific and Production Company", Moscow, Russia) – Deputy General Director.

GOLDUN Andrey V. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia) – Engineer of the High Voltage Engineering and Electrophysics Dept.

BELOBORODOV Vasily V. (Branch of PJSC RusHydro – Sayano-Shushenskaya HPP named after P.S. Neporozhny, Krasnoyarsk, Russia) – Head of the Equipment Monitoring Dept.

IVANOV Nikita A. (Branch of PJSC RusHydro – Sayano-Shushenskaya HPP named after P.S. Neporozhny, Krasnoyarsk, Russia) – Engineer of the Equipment Monitoring Dept.

High-frequency switching overvoltages with an oscillation frequency of up to several MHz are most dangerous for power transformers and cable bushings with XLPE insulation. A working group in charge for studying the influence of high-frequency impulse overvoltages on the operational reliability of power transformers has been

established within the CIGRE framework. Experimental studies of high-frequency impulse overvoltages in the 500 and 15.75 kV networks at the Sayano-Shushenskaya HPP were carried out. A new digital recording system equipped with contactless capacitive sensors was used for measuring impulse overvoltages. By using such recording system, it became possible to obtain data on the overvoltages experienced simultaneously by cable bushings and power transformers on the 500 and 15.75 kV voltage sides. The study results have shown that the highest peak values of high-frequency overvoltages are induced by switching operations of disconnectors in the 500 kV GIS. The overvoltages emerging in the 500 kV network are transferred to the 15.75 kV voltage level via the capacitances between the 500/15.75 kV transformer windings. The resulting overvoltage level may be more than a factor of ten higher than the amplitude value of the nominal 15.75 kV voltage. An analysis model was developed in the ATP-EMTP software, which has been verified against the experimental data. The accomplished numerical analyses and experiments have shown that the use of RC circuits is the most efficient protection measure against high-frequency overvoltages.

К е y w o r d s: impulse high frequency overvoltages, experimental study, protection devices

REFERENCES

1. **Kadomskaya K.P., Lavrov Yu.A., Reyherdt A.A.** *Perenapryazheniya v elektricheskikh setyah razlichnogo naznacheniya i zashchita ot nih* (Overvoltage in Electrical Networks for Various Purposes and Protection Against Them). Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004, 368 c.
2. **Tekhnika vysokikh napryazheniy** (High voltage technology) / Under Ed. D.V. Pazevig, M.: Energiya, 1976, 488 p.
3. **Bazutkin V.V. et al.** *Perenapryazheniya v elektricheskikh sistemah i zashchita ot nih* (Overvoltage in Electrical Systems and Protection Against Them). SPb.: Energoatomizdat, 1995, 316 p.
4. **STO 56947007-29.240.01.221-2016.** *Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey napryazheniem 110–750 kV ot grozovykh i vnutrennih pere-napryazheniy* (Guidelines on Protection of Electrical Networks of 110–750 kV from Lightning and Internal Overvoltages), 2016, 46 p.
5. **Metodicheskie ukazaniya po ogranicheniyu vysokochastotnykh kommutatsionnykh perenapryazheniy i zashchite ot nih elektrotekhnicheskogo oborudovaniya v raspredelitel'nykh ustroystvakh 110 kV i vyshe** (Guidelines on Mitigation of High Frequency Switching Overvoltages and Protection from Them of Power Equipment and Switchgears of 110 kV and Higher). M.: SPO ORGRES, 1998, 26 p.
6. **Kadomskaya K.P.** *Novosti elektrotekhniki* – in Russ. (Electrical Engineering News), 2009, No. 2(56), pp. 12–14.
7. **Sheyko P.A.** *Novosti elektrotekhniki* – in Russ. (Electrical Engineering News), 2013, No. 1(79), pp. 22–25.
8. **Lavrov Yu.A. et al.** *Elektro* – in Russ. (Electro), 2010, No. 6, pp. 24–27.
9. **Nevretdinov Yu.M., Fastiy G.P.** *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU* – in Russ. (Scientific and Technical Bulletin of SPbSPU), 2010, No. 1, pp. 244–250.
10. **Zil'berman V.A.** *Elektrichestvo* – in Russ. (Electricity), 2017, № 10, c. 47–54.
11. **Matveev D.A., Larin V.S., Zuikov A.V.** Approach to Analysis of Resonance Phenomena and Overvoltages Due to Interaction between Power Transformer and External Network. – CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium, 2013, pp. 1–8.
12. **Larin V., Matveev D., Volkov A.** Study of Transient Interaction in a System with Transformer Supplied from Network through a Cable: Assessment of Interaction Frequencies and Resonance Evolution. – 3rd International Colloquium Transformer Research and Asset Management, 2014, pp. 1–11.
13. **Larin V.S.** *Elektrichestvo* – in Russ. (Electricity), 2015, No. 11, pp. 33–40.
14. **Larin V.S.** *Elektrichestvo* – in Russ. (Electricity), 2016, No. 1, pp. 20–24.
15. **Borisov R.K., Kolomiets E.V., Gaffarov R.F.** *Elektrichestvo* – in Russ. (Electricity), 2020, No. 4, pp. 4–9.
16. **Borisov R.K. et al.** *Energoekspert* – in Russ. (Energoexpert), 2019, No. 1(69), pp. 38–40.

Received [20.10.2022]

Accepted [17.11.2022]