

Департамент научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России»

Новосибирский государственный технический университет

Сибирская энергетическая академия

Производственное научное предприятие «Болид»

ОАО «СибНИИЭ»

ЗАО «Феникс-88»

*Посвящается 40-летию факультета энергетики
Новосибирского государственного технического университета*

ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И РЕЖИМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СЕТЕЙ 6–35 кВ

**ТРУДЫ ВТОРОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**15–17 октября 2002 года
Новосибирск**

ББК 31.279.1

УДК 621.316.92+621.311.1.027.5

П 27

Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ
Труды Второй Всероссийской научно-технической конференции.
Новосибирск, 2002. — 200 с.

ISBN 5-93889-020-9

Редакционная коллегия:

Кадомская К.П., д-р тех. наук, проф. (отв. редактор)
Сарин Л.И. (зам. отв. редактора)
Виштибеев А.В., канд. тех. наук (ученый секретарь)
Емельянов Н.И., канд. тех. наук, доц.
Заболотников А.П., канд. тех. наук

Рецензенты:

Манусов В.З., д-р тех. наук, проф.
Горелов В.П., д-р тех. наук, проф.

Представленные доклады посвящены режимам заземления нейтрали электрических сетях 6–35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения. Рассматриваются способы ограничения всех видов перенапряжений (коммутационных, дуговых, грозовых), параметры и конструктивное исполнение устройств ограничения перенапряжений. Анализируется опыт эксплуатации сетей 6–35 кВ с использованием устройств для ограничения перенапряжений.

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел I

Сравнительная эффективность различных способов заземления нейтрали

Г.А. Евдокуин

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Анализ внутренних перенапряжений в сетях 6–10 кВ и обоснование необходимости перевода сетей в режим с резистивным заземлением нейтрали | 9 |
| Н.В. Даки, С.Н. Великий, А.А. Челазнов | |
| Режимы заземления нейтрали сетей 6–10 кВ ОАО «Газпром» | 13 |
| Н.А. Зыков, Т.А. Стогний | |
| О режиме заземления нейтрали в сетях СН электростанций | 23 |

Раздел II

Эффективность резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения

М.В. Ильиных, Л.И. Сарин, В.И. Павлов, С.М. Асосков, А.А. Лыков

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Оценка эффективности применения высокоомных резисторов по результатам опытов искусственного ОДЗ в сети 10 кВ КС «Давыдовская» ООО «Мострансгаз» | 31 |
| Л.И. Сарин, М.В. Ильиных, Н.Г. Царегородцев, Н.И. Емельянов | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Высоковольтные резисторы заземления нейтрали типа РЗ. Опыт эксплуатации | 36 |
| М.В. Ильиных, Л.И. Сарин, В.И. Кучеренко, Д.В. Багаев, И.И. Хуртов | |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Внедрение резисторов в сети собственных нужд ТЭЦ-3 ОАО «Саратовэнерго» | 40 |
| М.В. Ильиных, Л.И. Сарин, Н.А. Дарков, Б.И. Тагильцев, В.И. Ваганов, Д.С. Кудряшов | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ограничения высокоомными резисторами перенапряжений при ОДЗ в сети 35 кВ ПС «Тяжинская» ОАО «Кузбассэнерго» | 45 |
| М.В. Ильиных, Л.И. Сарин, А.А. Челазнов | |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Применение высокоомных резисторов в сети с компенсированной нейтралью | 49 |
| С.М. Коробейников, Л.И. Сарин, А.А. Челазнов | |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Резистор с частотной зависимостью для уменьшения перенапряжений | 52 |
| Ю.В. Целебровский | |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Выбор сопротивления резистора в нейтрали по условиям электробезопасности | 59 |
| А.И. Шалин, Ю.В. Целебровский, А.И. Щеглов | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Особенности резистивного заземления в городских сетях 10 кВ | 63 |
| А.И. Гаврилко | |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Анализ технических мероприятий по ограничению перенапряжений при замыканиях на землю в сети 6 кВ собственных нужд электростанций | 68 |
| А.С. Зубков, К.П. Кадомская | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Повышение надежности эксплуатации изоляции сетей средних классов напряжения, содержащих двухцепные воздушные линии, оснащением нейтралей сетей высокоомными резисторами | 73 |
| А.В. Виштибеев, Н.И. Емельянов, М.В. Ильиных, Л.И. Сарин | |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| О длительности работы резистора для заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ | 78 |
| В.И. Виштибеев, А.В. Виштибеев, В.В. Дубровский | |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| К вопросу об учете токов небаланса при выборе уставок токовых защит от 033 | 81 |
| А.В. Виштибеев | |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Эффективность резистивного заземления нейтрали в кабельных электрических сетях 6–10 кВ | 84 |
| М.В. Ильиных, Л.И. Сарин, В.И. Павлов, С.М. Асосков, А.А. Лыков | |

Раздел III

Эффективность резонансного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения

А.М.Брянцев, Б.И.Базылев, В.В.Базуткин, А.Г.Долгополов

К проблеме компенсации емкостных токов в сетях 6–10–35 кВ 97
Д.И.Никонов

Опыт эксплуатации сетей с компенсированной нейтралью в ОАО «Башкирэнерго» 103
М.П.Дергилев, В.К.Обабков

Перенапряжения в сетях 6–10 кВ с двигательной нагрузкой при различных способах
заземления нейтрали 106
Н.П.Гуров, В.Г.Сажаев, В.К.Обабков

Перенапряжения в кабельной сети 6 кВ с большими емкостными токами и борьба
с ними средствами резонансного заземления нейтрали 112

Раздел IV

Перенапряжения в сетях средних классов напряжения (моделирование и экспериментальные исследования)

С.М.Коробейников, Л.И.Сарин, М.В.Ильиных

Особенности пробоя воздушного промежутка в опытах искусственного ОДЗ
при различных режимах заземления нейтрали 123

С.В.Нестеров, А.И.Щеглов, Ю.В.Целебровский

Анализ осциллограмм токов и напряжений при однофазных дуговых замыканиях
в сети 10 кВ с резистивным заземлением нейтрали 127

В.Е.Дмитриев, В.Н.Ларионов, А.И.Лавринец

Испытания силикатного изоляционного покрытия токоведущих и конструктивных
элементов в КРУ 10 кВ 132

В.Е.Качесов, Ю.А.Лавров, А.Г.Овсянников, В.Н.Ларионов, Д.Е.Павлик

О мониторинге распределительных сетей 136

Н.Д.Кузнецов, И.Л.Дегтярёв

Перенапряжения при коммутациях высоковольтных электродвигателей вакуумными
выключателями 142

И.Л.Дегтярёв, К.П.Кадомская, Р.В.Копылов

Режимы заземления нейтрали и защита от перенапряжений электрических сетей
с вращающимися электрическими машинами 147

А.В.Портнягин, И.Ф.Суворов

Моделирование коммутационных перенапряжений при отключении электродвигателя
в сети 6 кВ 152

Раздел V

Повышение надежности эксплуатации изоляции электрических сетей при установке нелинейных ограничителей перенапряжений и RC-цепочек

О.А.Аношин, Е.Н.Красильников

Повышение надежности работы электрических сетей на основе глубокого
ограничения внутренних перенапряжений 157

О.А.Аношин

Повышение надежности эксплуатации ограничителей перенапряжений
в электрических сетях 6–10 кВ 159

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Г.А. Евдокуин, С.С. Титенков</i> | |
| О методических указаниях по применению нелинейных ограничителей перенапряжений в сетях 6–35 кВ | 162 |
| <i>Ю.Ф. Васюра, А.В. Вильнер, А.В. Вычегжанин</i> | |
| Результаты экспериментальных исследований и опыта эксплуатации нелинейных ограничителей перенапряжений в сетях 6–10 кВ | 165 |
| <i>А.А. Безносов, Е.А. Борисов, К.П. Кадомская</i> | |
| Моделирование ограничителей перенапряжений при воздействии срезанных грозовых волн и высокочастотных коммутационных перенапряжений | 170 |
| <i>А.П. Заболотников, Л.И. Сарин, Б.И. Тагильцев</i> | |
| Анализ повреждений ограничителей перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в «Кузбассэнерго» | 175 |
| <i>А.П. Заболотников</i> | |
| Выбор ограничителей перенапряжений для сетей 6–35 кВ | 177 |
| <i>С.В. Кузьмин, А.И. Кожин</i> | |
| Анализ коммутационных перенапряжений в сетях 6–10 кВ угольных разрезов | 183 |

Раздел VI
Релейная защита в электрических сетях 6–35 кВ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>А.И. Гаврилко</i> | |
| Комплекс токовых защит нулевой последовательности для сетей собственных нужд электростанций | 191 |
| <i>С.И. Головко, Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, С.М. Юдин</i> | |
| Опыт разработки защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока замыкания на землю | 196 |
| <i>В.О. Столбов, С.Н. Розова, И.Ф. Суворов</i> | |
| Исследование электромагнитной совместимости трансформатора напряжения типа НТМИ с изоляцией в сетях 6–10 кВ | 198 |

Раздел V

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ УСТАНОВКЕ
НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
и *RC*-ЦЕПОЧЕК**

Анализ коммутационных перенапряжений в сетях 6–10 кВ угольных разрезов

С.В.Кузьмин, А.И.Кожин (ООО «Разработка универсальных технологий
и автоматизированных систем (РУТАС)», Красноярск)

Анализ аварийности электрических сетей и потребителей напряжением 6–10 кВ угольных разрезов Красноярского края и Иркутской области показывает, что за период 2000–2002 г. по сравнению с 1990 г. аварийные отключения возросли в 4,3 раза. Основной причиной аварийных отключений являются однофазные замыкания на землю, на их долю приходится около 78% аварийных отключений, двух и трехфазные короткие замыкания, на долю которых приходится около 18% аварийных отключений.

Более детальное изучение причин возникновения однофазных замыканий на землю и коротких замыканий показало, что основной причиной является пробой изоляции за счет коммутационных перенапряжений. Это связано с тем, что за последнее десятилетие доля вакуумных выключателей в системах электроснабжения угольных разрезов возросла с 15% до 68%.

Хорошо известно, что вакуумные выключатели могут создавать достаточно высокие коммутационные перенапряжения при отключении электрических двигателей и трансформаторов, работающих в режиме холостого хода или близкому к нему.

Максимальный уровень коммутационных перенапряжений оценивался с помощью коэффициента кратности:

$$K_{\max} = \frac{U_{\max}}{U_{II}}, \quad (1)$$

где U_{\max} — максимальное напряжение на отдельных фазах сети, В; U_n — номинальное напряжение сети, В.

Известно [1], что допустимый коэффициент кратности для кабельных линий и трансформаторов, находящихся в эксплуатации до 5 лет, составляет 4,3, а при эксплуатации свыше 5 лет — 2,8. Для электродвигателей и крупных генераторов допустимый коэффициент кратности равен 2,4, если срок эксплуатации не превышает 5 лет, и 1,8 — при эксплуатации свыше 5 лет. Учитывая, что срок эксплуатации кабельных линий электродвигателей и трансформаторов на вышеуказанных предприятиях значительно превышает пятилетний срок, то безопасные кратности перенапряжений для кабельных линий электродвигателей и трансформаторов равны 2,8, 1,8 и 2,8. Если реальные уровни перенапряжений в сети 6–10 кВ угольных разрезов будут превышать вышеприведенные значения, то это может послужить причиной пробоя изоляции высоковольтного оборудования и кабельных линий.

Исследования коммутационных перенапряжений, выполненные на угольных разрезах ОАО «Красноярская угольная компания» и ОАО «Востсибуголь», показали, что для синхронных двигателей при использовании масляных выключателей максимальная кратность перенапряжения не превышает 2,7, а для асинхронных двигателей данный показатель составляет 2,9. При переходе с масляных выключателей на вакуумные кратность возрастает и составляет для синхронных двигателей — 4,9, а для асинхронных двигателей — 5,6. С увеличением мощности как синхронных, так и асинхронных двигателей кратность перенапряжений заметно снижается, однако не достигает безопасного предела ($K_{\max} < 1,8$). Последнее обстоятельство указывает на необходимость использования защиты от коммутационных перенапряжений в не зависимости от мощности двигателя и вида коммутационного аппарата. Для трансформаторов характерны менее низкие уровни перенапряжений. Так, для трансформаторов $S < 1000 \text{ кВА}$ и $S > 1000 \text{ кВА}$, которые эксплуатируются совместно с масляными выключателями, соответственно $K_{\max} = 2,0$ и $K_{\max} = 1,8$. Если трансформаторы будут эксплуатироваться совместно с вакуумными выключателями, кратность перенапряжений возрастет и соответственно составит $K_{\max} = 3,9$ и $K_{\max} = 3,0$. В последнем случае необходимо предусмотреть защиту от коммутационных перенапряжений.

Кабельные линии могут служить как средством, так и объектом защиты от коммутационных перенапряжений.

Если кабельную линию рассматривать как средство защиты от коммутационных перенапряжений, то при длине линии более 200 м между масляным выключателем и трансформатором защита от коммутационных перенапряжений не требуется, так как $K_{\max} < K_{\text{доп}}$.

Если коммутация осуществляется вакуумным выключателем, то длина кабельной линии, при которой не требуется защита от коммутационных перенапряжений между выключателем и трансформатором, должна быть более 800 м. Защита электродвигателей от коммутационных перенапряжений не требуется, если длина кабельной линии между масляным или вакуумным выключателем и двигателем соответственно будет превышать 400 м и 1200 м. Свойство кабельных линий снижать кратность перенапряжений связана с тем, что с увеличением длины и сечения увеличивается присоединенная емкость защищаемого объекта.

Если кабельную линию рассматривать как объект защиты, то, начало кабельной линии, которая связана с коммутационным аппаратом, будет подвергаться опасным перенапряжениям при включении, а конец линии, который связан с трансформатором или двигателем, при отключении. Причем кратность коммутационных перенапряжений в зависимости от типа коммутационного аппарата и характера нагрузки будет

колебаться от 1,3 до 6. Учитывая вышесказанное, защиту кабельной линии от коммутационных перенапряжений необходимо выполнять с обоих концов линии.

Анализ более 60 осциллограмм, на которых зафиксирован процесс коммутации, позволил установить зависимость между кратностью коммутационных перенапряжений и частотой коммутационного импульса. Исследованиями установлено, что частота коммутационного импульса зависит не только от характера нагрузки, но и от скорости и одновременности размыкания (замыкания) контактов коммутационного аппарата: чем больше скорость и одновременность размыкания контактов, тем больше частота коммутационного импульса.

Исследования также показали, что с ростом частоты коммутационного импульса растет крутизна переднего фронта импульса и его амплитуда, т.е. увеличивается кратность перенапряжения.

Частота коммутационного импульса, который создается масляными выключателями, находится в диапазоне от 1,8 кГц до 30 кГц, при этом кратность перенапряжений колеблется от 1,8 до 2,8. Частота коммутационного импульса, создаваемого вакуумными выключателями, изменяется от 20 кГц до 120 кГц, соответственно кратность перенапряжений изменяется от 2,5 до 5,8.

Установлено, что при снижении частоты коммутационного импульса до 250 Гц кратность перенапряжения не будет превышать значений 1,6. Данный эффект можно достичь при использовании в качестве защитного устройства RC-ограничителя, так как он является простейшим высокочастотным фильтром.

Коммутационные перенапряжения возникают не только на зажимах двигателей и трансформаторов при их включении или отключении, но и на секциях шин подстанций при отключении незагруженных линий [1].

Исследования показывают, что в сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью угольных разрезов при отключении ненагруженной линии от шин подстанции, суммарная присоединенная емкость которой меньше емкости отключаемой линии в 2–3,5 раза, можно ожидать появления коммутационных перенапряжений на стороне питающих шин с кратностью от 2,3 до 3,5. Перенапряжения такого уровня могут вызвать пробои изоляции электродвигателей, которые питаются от данных секций шин, если длина кабельных линий менее 300 м.

Пробои изоляции, связанные с коммутационными перенапряжениями, как правило, сопровождаются дуговым однофазным замыканием на землю.

В сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью при пробое изоляции одной из фаз на землю возможны три режима горения дуги.

1. При весьма большом токе однофазного замыкания ($I_{0zz} > 50$ А) дуга горит устойчиво, падение напряжения на дуге сравнительно мало, и вследствие большой остаточной проводимости при переходе тока через нуль не успевает восстанавливаться сколько-нибудь значительная прочность изоляции. Данный режим близок к глухому замыканию на землю, поэтому коэффициент кратности перенапряжений $K_{max} < 1,73$.

2. При достаточно малом токе ($I_{0zz} < 3$ А) дуга горит неустойчиво и после одного или нескольких (не более 3–4) повторных зажиганий и погасаний дуги гаснет окончательно, изоляция восстанавливает свою электрическую прочность и сеть восстанавливает свой нормальный режим работы. Максимальные значения коэффициента кратности перенапряжений находятся в пределах $1,73 < K_{max} < 2,5$.

3. При промежуточном значении тока ($3 \text{ A} < I_{0zz} < 50 \text{ A}$) наблюдаются многократные повторные погасания и зажигания дуги, сопровождающееся колебательными перезарядами емкостей сети, что приводит к значительным перенапряжениям. Максимальное значение коэффициента кратности перенапряжений находится в пределах $2,2 < K_{max} < 3,8$.

Согласно принципу суперпозиции наиболее высокие кратности перенапряжений возникают при наложении процесса коммутации на процесс однофазного замыкания на землю с перемежающейся дугой, а максимальные кратности перенапряжений определяются как сумма отдельных кратностей по отдельным процессам.

Подобный режим коммутации возможен в случае ложной работы защиты от однофазного замыкания на землю, когда отключается неповрежденный электроприемник. В этом случае максимальная кратность может достигать значения, равного $K_{\max} = 5,6$; если коммутация осуществляется масляным выключателем и $K_{\max} = 7,6$, если коммутация будет осуществляться вакуумными выключателями. При ложном отключении в режиме однофазного замыкания на зажимах синхронных двигателей мощностью 1600; 1300; 1250; 1160; 800; 630; 600; 500; 340 кВт могут возникать соответственно следующие кратности перенапряжений: 5,4; 5,6; 5,7; 5,8; 6; 7,1; 7,1; 7,2; 7,4. Для асинхронных двигателей мощностью 2880; 2650; 1000; 400; 320; 315; 250; 200; 100 кВт данные кратности перенапряжений соответственно равны: 5,4; 5,5; 5,7; 6,3; 6,6; 6,6; 6,8; 7,2; 7,4. Для трансформаторов максимальная кратность перенапряжений может достигать значения $K_{\max} = 4,7$.

В настоящее время для ограничения внутренних перенапряжений используются нелинейные ограничители перенапряжений и RC-ограничители [2].

Рассмотрим нелинейные ограничители перенапряжений типа ОПН-6 и ОПНК-6.

Данные ограничители устанавливаются непосредственно в ячейках выключателей. Перенапряжения ограничиваются до (2,8–3) за счет среза амплитуды импульса. Сравнивая требуемые нормы ограничения перенапряжений с возможностями ОПНК-6, видно, что данные устройства рационально использовать для защиты новых электродвигателей и трансформаторов от коммутационных перенапряжений.

Использование ОПНК-6 для ограничения перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю не представляется возможным, так как в режиме однофазного замыкания на землю наблюдается быстрый выход из строя: происходит выгорание ОПНК за счет кратковременных двух и трехфазных коротких замыканий через землю.

Использование RC-ограничителей позволяет увеличить присоединенную емкость, как на зажимах электродвигателей, трансформаторов, так и на секциях шин подстанций. Увеличение присоединенной емкости на зажимах электродвигателей и трансформаторов позволяет уменьшить волновое сопротивление данного оборудования, тем самым ограничить уровень перенапряжения. Кроме этого, RC-ограничитель является электрическим фильтром, что позволяет ему эффективно поглощать высокочастотные составляющие, которые возникают при дуговых замыканиях на землю и коммутации. RC-ограничитель за счет своей демпфирующей временной характеристики растягивает передний фронт импульса перенапряжений, делает его более пологим. Это приводит к более медленному нагреву изоляции электрических машин и кабельных линий, что позволяет избежать пробоя изоляции. Использование резистора в RC-ограничителе позволяет избежать повторных зажиганий дуги между контактами выключателя.

Таким образом, уменьшение волнового сопротивления электрических машин, фильтрация высокочастотных составляющих, растягивания переднего фронта импульса перенапряжений и ограничение повторных зажиганий дуги между контактами выключателя позволяет ограничивать как коммутационные, так и дуговые перенапряжения, а также их совместное сочетание до безопасных пределов: коэффициент кратности $K_{\max} < 1,6$.

При подключении RC-ограничителей к секциям шин подстанций увеличивается присоединенная емкость подстанции и тем самым можно избежать опасных перенапряжений, которые возникают при отключении (включении) протяженных кабельных линий.

Для подтверждения эффективности RC-ограничителя на СД-630 компрессорной станции ОАО «Разрез Березовский-1» были приведены измерения коммутационных перенапряжений без и с RC-ограничителем. Результаты данных экспериментов показаны в таблице.

| Объект исследования | Без защиты | | | | Ограничитель | | | |
|------------------------------------------------------------|------------|-------|------|-------|--------------|-------|-----------|-------|
| | K_{CP} | | K | | K_{CP} | | K_{max} | |
| | Вкл. | Откл. | Вкл. | Откл. | Вкл. | Откл. | Вкл. | Откл. |
| Компрессорная станция Сд 630, п/с №33 ячейка №2-10 м | 1,63 | 2,4 | 3,0 | 4,3 | 1,3 | 1,35 | 1,45 | 1,5 |

Из таблицы видно, что максимальная кратность перенапряжений при использовании RC-ограничителя снизилась с 4,3 до 1,5, что подтверждает высокую эффективность данного ограничителя.

Литература

- Гиндуллин Ф.А., Гольдштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
- Гончаров А.Ф., Тарнопольский В.Г., Кузьмин С.В., Береснев В.В., Куликовский В.Н. Трехфазный резистивно-емкостной ограничитель перенапряжений // Информационно-аналитический сборник Красноярскгосэнергонадзор. — 2000. — №3. — С.28–31.