

УДК 621.316

Современные концепции проектирования системы заземления нейтрали в кабельных протяженных распределительных сетях 6–35 кВ*

С.С. ЕКИМУКОВ, К.П. КАДОМСКАЯ

Обоснована необходимость тщательного анализа аварийных ситуаций в кабельных сетях для корректировки сложившейся практики их эксплуатации.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, однофазные дуговые замыкания, дугогасящий реактор, резистор, СПЭ-изоляция, вакуумный выключатель, коммутационные перенапряжения.

1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

До последних лет кабельные сети 6–35 кВ в России выполнялись на основе кабелей с бумажно-масляной изоляцией и коммутировались в основном маломасляными выключателями. При этом релейная защита от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в этих сетях срабатывала на сигнал с поиском поврежденного фидера и его последующим отключением. В протяженных кабельных сетях, как правило, требовалась компенсация токов замыкания на землю, осуществляемая дугогасящими реакторами (ДГР). Поскольку состав и структура распределительной сети в процессе эксплуатации может меняться, то, соответственно, требуется перенастройка степени компенсации емкости сети, осуществляемая изменением параметров ДГР. Такая перенастройка может быть произведена путем применения управляемых ДГР – РУОМ (реактор управляемый однофазный с масляной изоляцией) [1]. Однако в случае однофазных дуговых замыканий дуги (ОДЗ) в относительно не протяженных кабельных сетях далеко не всегда требовалось отключение поврежденного фидера. При благоприятном исходе ОДЗ, т. е. при погасании дуги, включение фидера, на котором произошло ОДЗ, позволяло эксплуатировать сеть и далее. Такая ситуация возникала при использовании в сети кабелей с бумажно-масляной изоляцией, наделенной свойством самовосстановления.

Однако практика эксплуатации кабельных распределительных сетей требует серьезной корректировки при внедрении кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляции) и вакуумных выключателей. У СПЭ-изоляции свойства «самозалечивания» отсутствуют и при высокочастотных воздействиях (кратковременном вводе энергии в изоляцию) электрическая прочность будет недостаточной. Высокочастотные воздействия возникают при ОДЗ и при коммутациях вакуумных выключателей (ВВ), если эти коммутации сопровождаются повторными зажиганиями дуги в вакуумных дугогасительных камерах (ВДК). В применявшихся ранее маломасляных выключателях также наблюдались повторные зажигания, но они происходили при малых напряжениях на контактах и поэтому не приводили к высоким кратностям перенапряжений. Чем электрически прочнее изолирующая и дугогасящая среда в выключателях, тем более высокую кратность имеют возникающие при повторных зажиганиях дуги пере-

* *Статья получена 15 января 2010 г.*

напряжения. Таким образом, одновременное внедрение в распределительные сети кабелей с СПЭ-изоляция и ВВ требует тщательного анализа сложившейся практики эксплуатации этих сетей.

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ОДЗ

Как известно, высокие кратности перенапряжений на «здоровых» фазах возникают при повторных зажиганиях дуги вследствие «смещения» нейтрали сети, сопровождающем ОДЗ. Следовательно, уменьшение напряжения смещения нейтрали может быть осуществлено путем компенсации емкостного тока с помощью установки в нейтрали сети ДГР. Напряжение на нейтрали сети зависит от степени расстройки ДГР. Однако современные конструкции РУОМ вследствие инерционности механизма насыщения магнитной системы реактора для выхода на рабочий режим не позволяют управлять этим аппаратом достаточно быстро, т. е. в течение времени развития перенапряжений при ОДЗ [2].

В статье приводятся результаты расчетов для достаточно протяженной распределительной кабельной сети номинальным напряжением 6 кВ. Оценка перенапряжений, возникающих при ОДЗ, производилась с помощью программы, разработанной в среде MatLab, реализующей дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитные процессы в рассматриваемой сети. На рис. 1 приведены компьютерные осциллограммы процессов при ОДЗ в кабельной сети при суммарных фазной и междуфазной емкостях присоединений – $C_{\Sigma\phi} = 16$ мкФ, $C_{\Sigma\phi\phi} = 5$ мкФ (рис. 1, а – при изолированной нейтрали сети, рис. 1, б – при заземлении нейтрали сети через ДГР при степени компенсации фазной емкости сети $K_L = 1.05$).

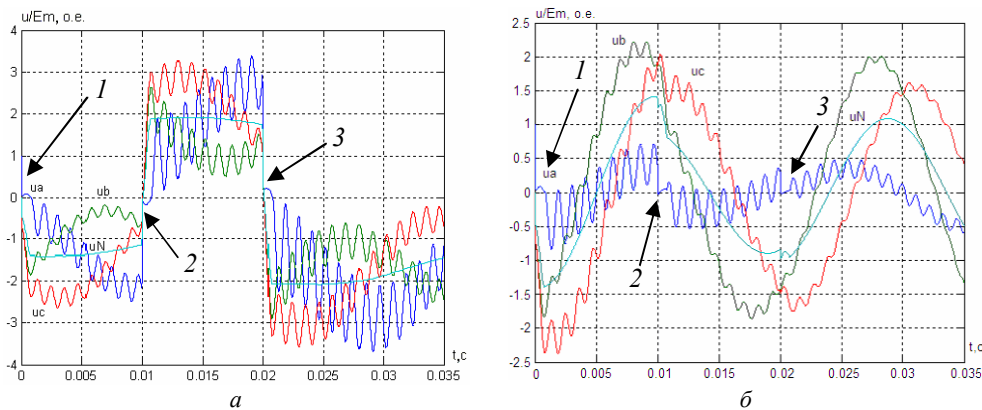


Рис. 1. Компьютерные осциллограммы процессов при ОДЗ на фазе А в случае изолированной нейтрали (а) и при заземлении нейтрали через ДГР ($K_L = 1.1$)

Из рисунка видно, что при установке ДГР за счет колебательного характера напряжения на нейтрали сети уровень перенапряжений снизился с 3.8 до $2.2 U_{\text{ф.м}}$. На рисунках отмечены основные стадии электромагнитного процесса: 1 – первое зажигание дуги; 2 – повторное зажигание дуги; 3 – второе повторное зажигание дуги. Уровень высокочастотных составляющих в напряжениях на фазах сети также снизился. Однако при прокладке в сети кабелей с СПЭ-изоляция целесообразно определять, на каком фидере произошло ОДЗ. Это позволит при наличии резерва в сети производить отключение поврежденного фидера, а при отсутствии резерва фиксировать факт замыкания и в последующем вести наблюдение (в том числе и мониторинг) за изоляцией этого кабеля.

Эти задачи могут быть решены при оснащении нейтрали сети резистором. В этом случае активный ток, определяемый током в резисторе, протекает лишь по поврежденному фидеру. Поскольку по остальным фидерам текут лишь емкостные токи относительно малой величины, определяемой протяженностью кабеля, то распознавание поврежденного фидера при установ-

ке в нейтрали резистора не составляет большого труда. Процессы, сопровождающие ОДЗ при установке в нейтрали резистора, отражены на компьютерной осциллограмме (рис. 2, а).

Из рисунка видно, что напряжение на нейтрали сети после погасания дуги носит аperiодический характер. На рис. 2, б приведена компьютерная осциллограмма при оснащении сети параллельным соединением резистора и ДГР. Характер напряжения на нейтрали практически не изменился, уровень же перенапряжений несколько снизился. Следует отметить, что при оснащении нейтрали сети лишь резистором (при нескомпенсированном емкостном токе сети) токи замыкания на землю могут достигать величин, недопустимых по тепловой стойкости электрооборудования сети. Поэтому в распределительных протяженных кабельных сетях, характеризующихся большой емкостью, нейтраль сети целесообразно оснащать параллельным соединением ДГР и резистора.

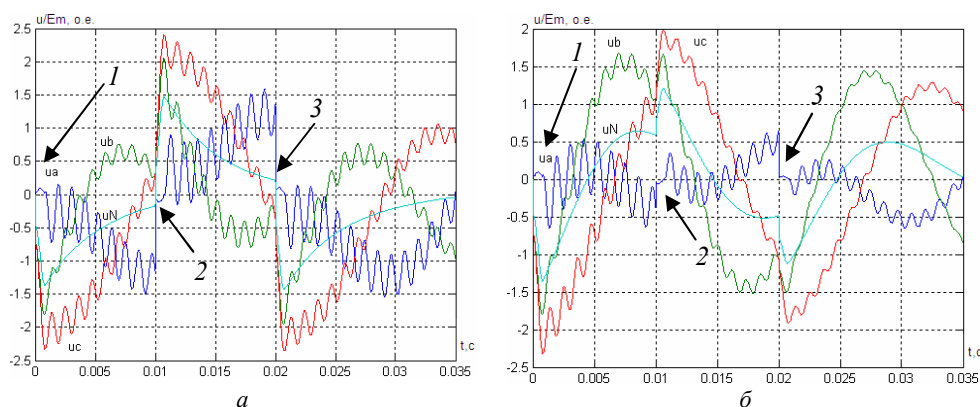


Рис. 2. Компьютерные осциллограммы процессов при ОДЗ при оснащении нейтрали сети резистором (а) и параллельным соединением резистора и ДГР(б)

При этом индуктивность ДГР целесообразно выбирать исходя из полной компенсации емкости сети на землю, а сопротивление резистора принимать равным индуктивному сопротивлению реактора на частоте 50 Гц. При таком выборе параметров оборудования в нейтрали переходные процессы при ОДЗ будут определяться практически сопротивлением резистора (см. таблицу).

Сравнительная таблица результатов расчетов при ОДЗ при резистивном заземлении нейтрали и параллельной установке в нейтрали резистора и ДГР

Характеристики процесса	В нейтрали только резистор	В нейтрали резистор и ДГР
$I_{OЗЗ}, A$	51.5	28.0
$U_{Amax}/U_{фм}$	1.6	1.0
$U_{Bmax}/U_{фм}$	2.1	1.8
$U_{Cmax}/U_{фм}$	2.4	2.3
$U_{Nmax}/U_{фм}$	1.5	1.3

Как следует из таблицы, установка в нейтрали сети ДГР практически не влияет на величину кратностей перенапряжений, а лишь приводит к снижению стационарных токов замыкания на землю (при выбранных параметрах устройств – в 1,8 раза).

На поврежденной фазе при оснащении сети параллельным соединением ДГР и резистора напряжение не превышает фазного максимального значения, что существенно снижает вероятность возникновения повторных зажиганий дуги.

3. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ КОММУТАЦИИ КЛ

Основной характеристикой, определяющей коммутационную способность выключателя, является скорость восстановления электрической прочности между расходящимися контактами в начальный момент времени. Начальный период восстановления электрической прочности можно описать выражением

$$u_{\text{эл.пр}}(t) = k(t + t_0),$$

где t_0 – время между началом расхождения контактов и моментом прохождения тока промышленной частоты в выключателе через нулевое значение, k – угловой коэффициент, характеризующий скорость нарастания электрической прочности в ВДК.

Эти характеристики различны у ВВ, производимых разными фирмами. При проведении последующих расчетов для получения незаниженных значений коэффициента k величина t_0 принималась в диапазоне 0...50 мкс. Цель проводимых исследований заключалась в установлении величины параметра k , при котором не наблюдается повторных зажиганий в ВДК, приводящих к высокочастотным процессам на изоляции коммутируемого кабеля. Следует отметить, что в рассматриваемой коммутации способ соединения нейтрали сети с землей (через ДГР или резистор) практически не влияет на высокочастотные процессы, сопровождающие отключение кабельного присоединения со стороны ПС 6 кВ. Наибольшие коммутационные перенапряжения на контактах ВВ возникают при отключении первого полюса выключателя, так как при этой коммутации напряжение на нейтрали сети в стационарном режиме достигает наибольшего значения.

Компьютерная осциллограмма процесса при отключении ВВ кабельной линии длиной 500 м при параметрах ВДК, исключающих возникновение повторных зажиганий, приведена на рис. 3.

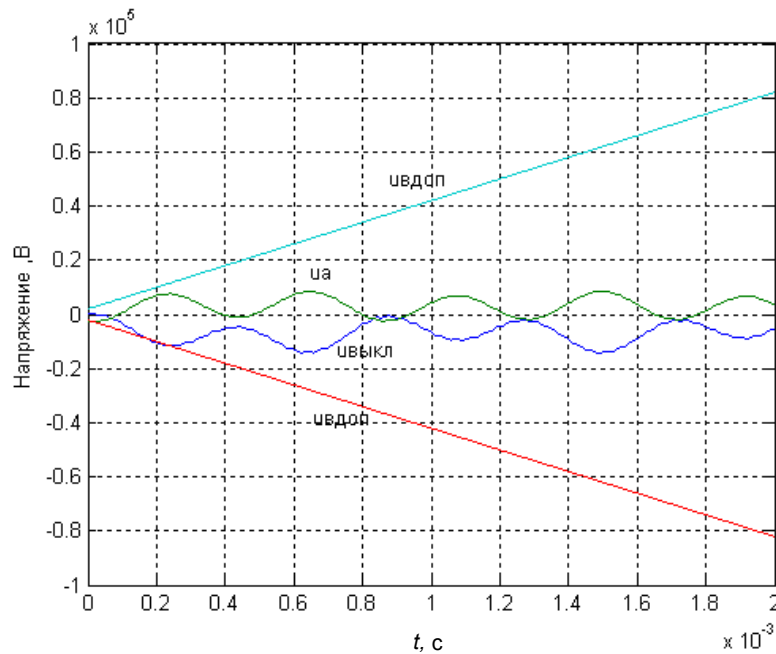


Рис. 3. Компьютерная осциллограмма процессов, сопровождающих отключение ВВ кабеля длиной 500 м от ПС 6 кВ до РП ($t_0 = 0$, $k = 40$ кВ/мс)

Из приведенной компьютерной осциллограммы следует, что в рассматриваемом случае повторных зажиганий дуги в ВДК не будет, если начальная скорость восстановления электрической прочности будет не менее 40 кВ/мс. Следует отметить, что в настоящее время такие параметры ВДК не являются чрезмерными как для отечественных, так и для зарубежных производителей коммутационного оборудования.

ВЫВОДЫ

Проведенные авторами исследования позволили прийти к следующим выводам.

1. Обеспечение надежной эксплуатации протяженных кабельных распределительных сетей на основе кабелей с СПЭ-изоляцией может быть достигнуто применением комбинированного заземления нейтрали сети, состоящего из параллельного соединения резистора и ДГР. Применение ДГР позволяет уменьшить стационарный ток однофазного замыкания на землю и тем самым обеспечить тепловую стойкость электрооборудования сети. Установка резистора в нейтрали сети позволяет уменьшить уровни перенапряжений, возникающих при ОДЗ, и добиться отсутствия повторных зажиганий дуги, характеризующихся высокими частотами, опасными для СПЭ-изоляции.

2. Оснащение нейтрали сети резистором позволяет надежно распознавать фидер, на котором произошло ОДЗ, так как именно по этому фидеру течет активная составляющая тока ОЗЗ (по остальным фидерам сети текут емкостные токи, меньшие по величине, чем активная составляющая тока в поврежденном фидере).

3. Выбор величин сопротивления резистора и индуктивности ДГР следует проводить индивидуально для конкретной сети с учетом её конструктивных параметров (типа и протяженности кабелей, а также схем питания потребителей и их резервирования).

4. Получение максимума преимуществ от выбранного способа заземления нейтрали сети должно увязываться со специфическими требованиями производственного процесса, основными из которых, как правило, является надежность системы электроснабжения и затраты на обеспечение заданной надежности.

5. Современные вакуумные выключатели для распределительных кабельных сетей, как правило, по отключающей и коммутационной способностям отвечают требованиям, которые предъявляются к этим характеристикам высокочастотными процессами, возникающими при коммутациях отдельных кабелей (вследствие приемлемой скорости восстановления напряжения на контактах ВВ при отключении кабельного присоединения практически любой конструкции).

6. Современные средства компьютерной техники при использовании, например, таких программных пакетов, как MatLab с входящей в него программой Simulink или ЕМТР (ЕТР) позволяют с приемлемой достоверностью проводить все исследования высокочастотных электромагнитных переходных процессов в распределительных кабельных сетях с целью выбора режима заземления нейтрали сети, а также оптимальных параметров коммутационной и защитной аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Базылев Б.И. и др. Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю. – СПб.: ПЭИПК, 1999.

[2] Кричко В., Миронов И. Особенности применения дугогасящих реакторов. – Новости электротехники. – 2007. – № 1(43).

Екимов Сергей Сергеевич, аспирант кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных интересов – исследование режимов эксплуатации нейтрали и современных способов защиты изоляции кабельных сетей среднего напряжения, эксплуатируемых с инновационным электрооборудованием.

E-mail: ekimov_s@ngs.ru Тел. (383)346-11-79

Кадо́мская Ки́ра Пантелеймо́новна, доктор технических наук, профессор кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета.
Тел (383)-346-11-79

S.S. Ekimukov, K.P. Kadomskaya

Projection contemporary conception of neutral ground system for 6-35 kV distributional cable network circuits

Progressive reconstruction leads in the mean stress distributional cable network circuits. Introduced modern power equipment has individual specification and specificity. They have to take into consideration when it is selected as they determine an operation reliability of both introduced equipment and in service. Therefore, thorough analysis of emergencies in the cable networks in question has to carry out for hands-on experience adjustment of it operation.

Key words: single-phase ground fault, single-phase arc-closing, ground-fault neutralizer, resistor, cross-linked polyethylene insulation, vacuum circuit breaker, switching overvoltages.