Федеральная Сетевая Компания Единой Энергетической Системы

РАСПОРЯЖЕНИЕ

10.12.2012 № 838р

О введении методики

С целью недопущения повреждений элегазовых выключателей 110 кВ и выше, связанных с отключением ЛЭП или систем шин, оснащенных средствами компенсации реактивной мощности, после неуспешного ТАПВ или неуспешного включения ЛЭП (систем шин) от ключа управления по причине возникновения апериодической составляющей тока в неповрежденных фазах при несимметричных КЗ:

1. Утвердить Методику расчета и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащенных шунтирующими реакторами, (далее - Методика) согласно приложению 1 к настоящему распоряжению.
2. Первым заместителям генеральных директоров - главным инженерам филиалов ОАО «ФСК ЕЭС» - МЭС:
2.1. Обеспечивать разработку соответствующих разделов проектной документации в соответствии с Методикой.
2.2. Включать Методику в перечень организационно-распорядительных и нормативно-технических документов ОАО «ФСК ЕЭС» задания на проектирование.
3. При выполнении технико-экономического сравнения вариантов снижения апериодической составляющей в токе холостого хода ЛЭП до допустимых значений (Раздел 8 методики) с применением выключателей, оснащаемых предвключаемыми резисторами, устройствами преднамеренной неодновременной коммутации полюсов:
3.1. Использовать стоимостные и технические характеристики выключателей, подтвержденные двумя и более изготовителями выключателей.
3.2. В целях недопущения ограничения конкуренции при проведении закупочных процедур исключать в проектной документации принятие технического решения, которое может быть обеспечено только одним изготовителем выключателей.
3.3. При отсутствии стоимостных и технических характеристик выключателей, подтвержденных двумя изготовителями, допускается

gost.e-ecolog.ru

выполнять технико-экономическое сравнение вариантов на основании показателей, приведенных в приложении 2 к настоящему распоряжению.

4. Контроль за исполнением настоящего распоряжения возложить на Заместителя главного инженера Дикого В.П.

Заместитель Председателя Правления -
главный инженер А.В. Черезов

Рассылается: секретариат Черезова А.В., Департамент ПС, Департамент РЗАиПА, Служба электрических режимов, филиалы ОАО «ФСК ЕЭС» - МЭС.
Столяров Е.И.
(604) 91-19
Пугаченко З.Е.
(604) 36-97
Визы: Воронин В.Т., Епифанов А.М., Пуляев В.И., Селезнев В.Ю., Зафесов Ю.К., Пелымский В.Л., Дикой В.П., Тюделеков П.Г., Акимов Л.Ю.

Приложение 1
к распоряжению ОАО «ФСК ЕЭС»
от 10.12.2012 № 838р

Методика расчета и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащенных шунтирующими реакторами

Настоящая Методика расчета и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащенных шунтирующими реакторами, (далее - методика) разработана в целях единого подхода к оценке возможности возникновения опасных значений апериодической составляющей в токах, коммутируемых элегазовыми выключателями.

Данная методика не рассматривает апериодическую составляющую в токах КЗ, расчет которой регламентируется РД 153-34.0-20.527-98 «Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования».

Методика направлена на оказание помощи проектным организациям при выполнении работ, связанных с обеспечением надежной коммутации элегазовыми выключателями линий электропередачи и сборных шин на подстанциях 110 кВ и выше.

Методика предназначена для проектных организаций, занимающихся проектированием новых линий электропередачи и подстанций, а также вопросами их технического перевооружения (реконструкции) и может быть использована при оценке полноты соответствия проектных решений требованиям по обеспечению надежной коммутационной способности выключателей в различных схемах их применения.

В настоящей методике:

- определены основные факторы, оказывающие влияние на характер изменения тока в выключателе, коммутирующем линию, оснащенную ШР;
- представлены основные положения формирования расчетных моделей для аналитического и численного расчетов электромагнитных переходных процессов, в которых возникают опасные значения апериодической составляющей токов в моменты коммутаций выключателями присоединений;
- выделены критерии отнесения присоединений подстанций 110 кВ и выше к категории, для которой обязательно проведение расчётов электромагнитных переходных процессов с целью выявления опасных значений апериодической составляющей токов в моменты коммутаций и определение условий осуществления таких коммутаций;
- приведены меры и средства по обеспечению коммутационной способности элегазовых выключателей, связанные со снижением величины апериодической составляющей коммутируемых токов до допустимых значений.

Список сокращений

АПВ - автоматическое повторное включение
ДК - дугогасительный контакт выключателя
ВН - высокое напряжение
ВЛ - воздушная линия электропередачи
ГК - главный контакт выключателя

КЗ - короткое замыкание
КВЛ - кабельно-воздушная линия электропередачи
КЛ - кабельная линия электропередачи
КСПЭ - кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена
ЛЭП - линии электропередачи
ОАПВ - однофазное автоматическое повторное включение
ОРУ - открытое распределительное устройство
ОПН - ограничитель перенапряжений нелинейный
ПС - подстанция электрическая
РЗ - релейная защита
ТАПВ - трехфазное автоматическое повторное включение
УПНКП - контроллер предназначенный для выполнения коммутации полюсов выключателя с преднамеренной задержкой (задержками) между коммутациями каждого полюса, трехполюсного комплекта выключателя с целью их коммутации в наперед заданные моменты времени по отношению к фазе тока или напряжения промышленной частоты. Может применяться совместно с выключателями, оснащенными как отдельным приводом на каждый полюс, так и одним приводом трех полюсов.
ШР - шунтирующие реакторы
$U_{ном}$ - номинальное напряжение
$U_{вын}$ - вынужденная составляющая напряжения

1. Общие положения

1.1 Апериодическая составляющая в токе, протекающем в «здоровых» фазах через линейный выключатель при одностороннем включении линии, может возникнуть лишь в случае, когда на линии установлены шунтирующие реакторы при наложении следующих условий:

момент начала протекания тока через контакты линейного выключателя при включении не совпал с моментом максимума амплитуды напряжения источника питания соответствующей фазы (±90 эл. градусов);

отключение здоровой фазы производится после включения (с интервалом не более 3 с).

При отсутствии ШР проблема, связанная с длительным существованием апериодической составляющей тока в выключателе, не возникает.

Следует принять во внимание также возможность образования такой схемы, в которой реактор, установленный на шинах ПС, подключается к разомкнутому концу линии, например, при пробном включении в цикле АПВ шин подстанции.

1.2 Апериодическая составляющая накладывается на меньшую по величине периодическую составляющую тока холостого хода линии, частично скомпенсированного индуктивностью ШР, что приводит к задержке перехода тока через ноль до 1,5 с (и более) от момента замыкания контактов выключателя и

создает условия, при которых выключатель (в случае отключения, следующего без задержки времени за включением) не может погасить дугу за время равное сумме времени срабатывания релейной защиты и полного времени отключения выключателя.

1.3 При расчетах апериодической составляющей в токах, протекающих через выключатель, необходимо учитывать следующие факторы:

наличие на ПС шунтирующих реакторов, установленных на линии;

наличие ШР на шинах ПС;

длину отходящих от шин ПС линий (определяющую зарядную мощность линий) различного конструктивного исполнения, на которых установлены ШР;

степень компенсации емкостной зарядной мощности отходящей от шин ПС линии индуктивностью ШР, подключенных к линии, влияющую на величину вынужденной составляющей тока промышленной частоты в коммутируемом линейном выключателе;

распределение мощностей ШР по концам линии;

добротность реакторов и остальных элементов расчетной схемы;

оснащение электропередачи устройствами ТАПВ или ОАПВ;

угол напряжения на шинах ПС при включении выключателя.

2. Исходные данные для расчета

Для выполнения расчетов токов, протекающих через выключатель при коммутации включения линии, необходимо иметь данные о следующих элементах исследуемой схемы (ЛЭП, ПС):

2.1 Схемы РУ рассматриваемой подстанции, а также ПС, находящихся на противоположных концах ЛЭП с линейными ШР, отходящих от рассматриваемой подстанции.

2.2 Типы, параметры, места подключения ШР, схемы подключения ШР, наличие ТОР на рассматриваемых линиях. Минимальное количество реакторов, при котором допускается постановка линии под напряжение в нормальных и послеаварийных (ремонтных) режимах эксплуатации.

2.3 Параметры линий электропередачи, отходящих от шин ПС.

2.3.1 Для ВЛ это следующие характеристики:

длина ВЛ;

тип (конструктивные характеристики) промежуточных опор ВЛ, длина изоляционной подвески проводов, максимальная стрела провеса проводов в пролете;

конструкция проводов ВЛ (количество проводов в фазе, шаг расщепления проводов фазы, марка фазных проводов, сечение одного провода фазы, погонное активное сопротивление провода), средние значения удельного сопротивления земли в районе прохождения трассы ВЛ, количество тросов на линии, способ их подвески и заземления.

2.3.2 Для КЛ это следующие характеристики:

длина и тип кабеля;

сечение токоведущей жилы;
способ прокладки жил кабеля;
погонная ёмкость кабеля;
погонная индуктивность кабеля;
погонное сопротивление кабеля;
сечение и способ заземления экрана кабеля.

2.3.3 Для КВЛ это следующие характеристики:
длина и параметры воздушной части КВЛ (п. 2.3.1.);
длина и параметры кабельной части КВЛ (п. 2.3.2).

2.4 Минимальное время срабатывания РЗ на рассматриваемых ЛЭП.

2.5 Минимальное собственное время отключения выключателей.

2.6 Результаты расчетов суммарных токов однофазного $I_{\text{КЗ}}^{(1)}$ и трехфазного $I_{\text{КЗ}}^{(3)}$ короткого замыкания на шинах всех рассматриваемых ПС и токов КЗ, подтекающих к месту КЗ со стороны исследуемых линий ($I_{\text{ВЛ}}^{(1)}$ и $I_{\text{ВЛ}}^{(3)}$).

3. Расчетные схемы электропередачи

Схема электропередачи для анализа основных характеристик и расчета переходных процессов при коммутациях линейными выключателями ВЛ приведена на рисунке 3.1.

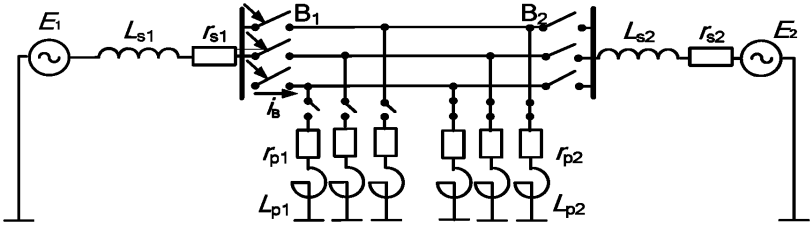


Рисунок 3.1 Расчётная схема электропередачи

Для проведения исследований в приведенной схеме необходимо на основе предварительно собранных исходных данных определить следующие параметры.

3.1 Параметры примыкающих к линии систем:

r_{s1}, r_{s10} – активные сопротивления системы 1 для прямой и нулевой последовательностей фаз (Ом);

L_{s1}, L_{s10} – индуктивности системы 1 для прямой и нулевой последовательностей фаз (Гн);

r_{s2}, r_{s20} – активные сопротивления системы 2 для прямой и нулевой последовательностей фаз (Ом);

L_{s2}, L_{s20} – индуктивности системы 2 для прямой и нулевой последовательностей фаз (Гн).

Индуктивные параметры систем определяются по известным суммарным токам однофазного $I^{(1)}_{\text{КЗ}}$ и трехфазного $I^{(3)}_{\text{КЗ}}$ короткого замыкания на шинах системы 1 (или системы 2) и токов КЗ, подтекающих к месту КЗ со стороны рассматриваемой линии ($I^{(1)}_{\text{ВЛ}}$ и $I^{(3)}_{\text{ВЛ}}$).

Индуктивности системы 1 (или системы 2) для прямой и нулевой последовательностей фаз при известных токах КЗ определяются по выражениям:

$$L_{s1} = \frac{E}{\omega \cdot I^{(3)}_{\text{КЗs1}}}, \tag{3.1}$$

$$L_{s10} = \frac{3 \cdot E}{\omega \cdot I^{(1)}_{\text{КЗs1}}} - 2 \cdot L_{s1}, \tag{3.2}$$

где $I^{(3)}_{\text{КЗs1}} = I^{(3)}_{\text{КЗ}} - I^{(3)}_{\text{ВЛ}}, \qquad I^{(1)}_{\text{КЗs1}} = I^{(1)}_{\text{КЗ}} - I^{(1)}_{\text{ВЛ}}.$

Активные сопротивления систем принимаются равными

$$r_{s1} = \frac{\omega \cdot L_{s1}}{Q_{\text{s}}}, \tag{3.3}$$

$$r_{s10} = \frac{\omega \cdot L_{s10}}{Q_{\text{s}}}, \tag{3.4}$$

где Q_s – добротность системы, примерно равная добротности трансформатора, установленного на ПС ($Q_s \approx 50 \div 70$, определяется по справочным данным).

3.2 Параметры трёхфазной ВЛ.

По справочникам, или в результате расчетов по специально разработанным программам расчёта погонных параметров ВЛ, или по встроенным блокам расчета параметров ВЛ в программных продуктах *EMTP* или *MATLAB Simulink* определяются погонные и волновые параметры линии:

r_1, r_0 – погонные продольные активные сопротивления ВЛ для прямой и нулевой последовательностей фаз (Ом/км);

L_1, L_0 – погонные индуктивности ВЛ для прямой и нулевой последовательностей фаз (Гн/км);

C_1, C_0 – погонные ёмкости ВЛ для прямой и нулевой последовательностей фаз (Ф/км).

(В пакете *EMTP* моделируются частотно зависимые параметры, а также транспозиция проводов ВЛ.)

3.3 Параметры ШР, установленных в начале линии относительно коммутируемого выключателя:

$L_{\text{р}}$ – индуктивность фазы одного ШР (Гн) определяемая по выражению

$$L_p = \frac{x_{\text{рф}}}{\omega}, \qquad x_{\text{рф}} = \frac{U^2_{\text{раб.max}}}{Q_{\text{р}}}; \tag{3.5}$$

$r_{\text{р}}$ – активное сопротивление одного ШР (Ом), определяемое по выражению

$$r_{\text{р}} = \frac{P_{\text{рф}}}{I_{\text{рф}}^2}, \quad \text{где} \quad I_{\text{рф}} = \frac{U_{\text{нрф}}}{x_{\text{рф}}}, \quad U_{\text{нрф}} = \frac{U_{\text{раб.max}}}{\sqrt{3}} \quad , \tag{3.6}$$

где

$Q_{\text{р}}$ – реактивная мощность трех фаз ШР,

$U_{\text{раб.max}}$ – наибольшее рабочее (линейное) напряжение,

$P_{\text{рф}}$ – активные потери в фазе обмотки (принимается по справочникам или исходя из характеристик установленного оборудования).

При установке в начале линии двух одинаковых групп шунтирующих реакторов $L_{\text{р1}} = L_{\text{р}}/2$, $r_{\text{р1}} = r_{\text{р}}/2$.

3.4. Параметры ШР, установленных в конце линии относительно коммутируемого выключателя:

$L_{\text{р}}$ – индуктивность фазы одного ШР (Гн);

$r_{\text{р}}$ – активное сопротивление фазы одного ШР (Ом);

при установке в конце линии двух одинаковых групп шунтирующих реакторов $L_{\text{р2}} = L_{\text{р}}/2$, $r_{\text{р2}} = r_{\text{р}}/2$.

3.5 Расчеты процессов в ЛЭП с применением КЛ можно проводить в однофазной схеме, поскольку кабельные линии ВН сооружаются с применением кабелей одножильного исполнения и включение КЛ на КЗ маловероятно (АПВ на КЛ не применяется). Расчетная схема электропередачи с КЛ ВН приведена на рисунке 3.2.

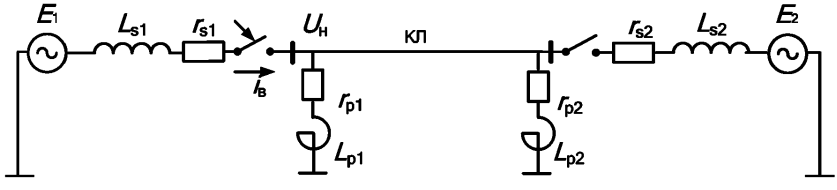


Рисунок 3.2 Расчетная схема электропередачи с КЛ ВН

Для проведения исследований в приведенной схеме предварительно следует помимо параметров примыкающих систем (пункт 3.1) и ШР (пункт 3.3 и 3.4) определить по справочникам следующие параметры кабельной линии:

r_1 – погонное продольное активное сопротивление кабеля (Ом/км);

L_1 – погонную фазную индуктивность кабеля (Гн/км);

C_1 – погонную фазную емкость кабеля (Ф/км).

3.6. При проведении расчетов в схемах, содержащих КВЛ (рисунок 3.3), часть электропередачи моделируется трехфазной ВЛ с параметрами, определенными аналогично п.3.2, часть ЛЭП моделируется тремя одножильными кабелями с параметрами, определенными аналогично п.2.3.2.

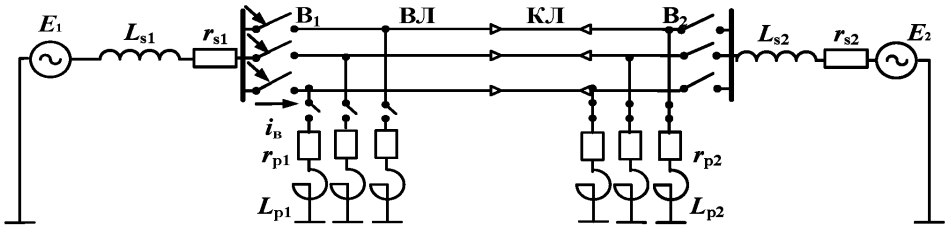


Рисунок 3.3 Расчётная схема электропередачи с КВЛ

4. Расчеты основных характеристик коммутируемого тока

4.1 Расчеты основных характеристик коммутируемого тока следует проводить для всех возможных симметричных и несимметричных режимов (в соответствии с перечнем п.6) с использованием специализированных программных продуктов.

Составление расчетных моделей производится в соответствии с рекомендациями [1].

Критерием правильности моделирования переходных процессов с использованием специализированных прикладных программ могут служить расчеты по аналитической методике.

4.2 Аналитическая методика может также использоваться для выявления необходимости ограничения апериодической составляющей в токе выключателя. Основные характеристики коммутируемого тока в линейном выключателе можно рассчитать по схеме замещения, моделирующей в однолинейной постановке задачи включения линии с ШР, подключенными по концам ЛЭП (рисунок 4.1).

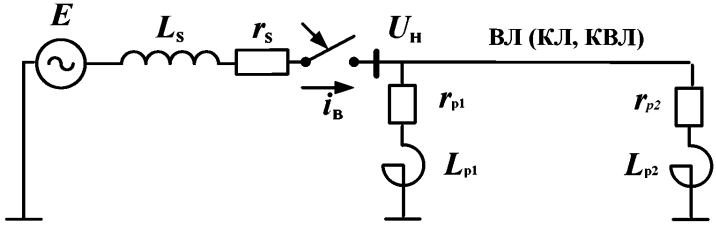


Рисунок 4.1 Расчётная однолинейная схема электропередачи

Для проведения расчетов в схеме рисунка 4.1 необходимо определить следующие параметры:

индуктивность (L_s) и активное сопротивление (r_s) примыкающей системы для прямой последовательности фаз;

индуктивность ($L_{р1}$) и активное сопротивление ($r_{р1}$) реакторной группы, установленной в начале линии по отношению к коммутируемому выключателю;

индуктивность ($L_{р2}$) и активное сопротивление ($r_{р2}$) реакторной группы, установленной в конце линии по отношению к коммутируемому выключателю;

параметры линии длиной $l_{ВЛ}$ для прямой последовательности фаз (погонная индуктивность L_1, погонное активное сопротивление r_1 и погонная емкость C_1).

4.3 Ток в выключателе в любой момент времени определяется по выражению [1]:

$$i_{в}(t) = i_{вын.}(t) + i_{ап.пер.}(t) + i_{кол.пер.}(t), \quad (4.1)$$

где

$i_{вын.}(t) = I_{выкл.} \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi)$ - вынужденная составляющая тока промышленной частоты в выключателе;

$i_{ап.пер}(t) = I_{апер.р1} \cdot e^{-\delta_{р1} \cdot t}$ - апериодическая составляющая тока в выключателе, определяемая в основном переходными процессами в реакторах, установленных на линии;

$i_{кол.пер}(t) = I_{пер.} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \psi_{пер.})$ - затухающая за несколько периодов промышленной частоты колебательная составляющая тока в выключателе, определяемая переходным процессом в линии.

В приведенных выражениях и далее по тексту Методики используются амплитудные значения токов и напряжений.

4.4 Основными характеристиками переходного процесса являются:

декремент затухания апериодической составляющей тока в линейном выключателе $\delta_р$;

собственная частота колебаний ω_0;

декремент затухания δ колебательной составляющей тока в линейном выключателе.

4.5 Декремент затухания апериодической составляющей тока в линейном выключателе при включении линии с ШР, подключенными в начале линии относительно коммутируемого выключателя, определяется по выражению:

$$\delta_{р1} = \frac{r_s + r_{р1}}{L_s + L_{р1}}, \quad (4.2)$$

Декремент затухания апериодической составляющей тока в линейном выключателе при включении линии с шунтирующими реакторами, подключенными в конце линии относительно коммутируемого выключателя, для эквивалентной расчетной схемы, приведенной на рисунке 4.2, определяется по выражению:

$$\delta_{р2} = \frac{r_s + r_{ВЛ} + r_{р2}}{L_s + L_{ВЛ} + L_{р2}}, \quad (4.3)$$

где

$$r_{\text{ВЛ}} = r_1 \cdot l_{\text{ВЛ}}, \qquad L_{\text{ВЛ}} = \frac{z_{\text{w}} \cdot \sin\lambda}{\omega}, \quad C_{\text{ВЛ}} = \frac{1}{\omega \cdot z_{\text{w}} \cdot \text{ctg}\dfrac{\lambda}{2}},$$

$$z_{\text{w}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \qquad \lambda = \omega \cdot l_{\text{ВЛ}} \sqrt{L_1 \cdot C_1}, \text{ (рад.)}.$$

z_w и λ волновое сопротивление и волновая длина линии для прямой последовательности фаз.

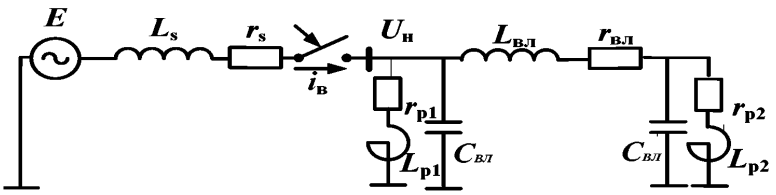


Рисунок 4.2 Расчётная схема для определения апериодической составляющей тока в выключателе при моделировании линии П-схемой замещения

4.6 Расчёт вынужденной составляющей тока в выключателе с учетом распределенности параметров линии (но без учёта активных сопротивлений элементов схемы) производится в схеме рисунка 4.3.

Входное сопротивление линии с реактором, подключенным в конце линии, определяется по выражению:

$$z_{\text{вх}} = jz_{\text{w}} \,\text{tg}(\lambda + \alpha_{\text{р}}), \tag{4.4}$$

где

$$\alpha_{\text{р}} = \text{arctg}\left(\frac{X_{\text{р2}}}{Z_{\text{w}}}\right), \qquad X_{\text{р2}} = \omega \cdot L_{\text{р2}}.$$

Модуль тока в выключателе в схеме на рисунке 4.3 (при замене длинной линии с реактором на конце входным сопротивлением) определяется по выражению:

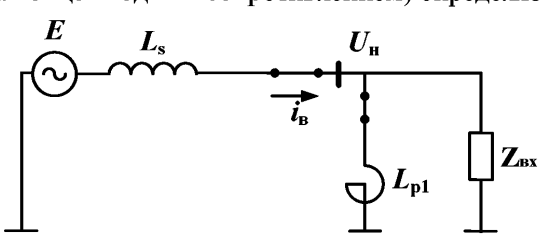


Рисунок 4.3 Расчётная схема электропередачи при учёте распределенности параметров ВЛ

$$I_{\text{выкл}} = \frac{E}{Z_{\Sigma}}, \tag{4.5}$$

где $Z_{\Sigma} = \dfrac{Z_{вх} \cdot X_{р1}}{Z_{вх} + X_{р1}} + X_{s}, \qquad X_{р1} = \omega \cdot L_{р1}, \qquad X_{s} = \omega \cdot L_{s},$

E – амплитудное фазное напряжение сети.

4.7 Начальное значение апериодической составляющей тока в линейном выключателе определяется процессами в ШР, подключенных к линии.

Вынужденные составляющие напряжения в начале и в конце линии определяются по выражениям:

$$U_{вын.н} = \frac{E_{s} \cdot \cos\alpha_{sэ} \cdot \sin(\lambda + \alpha_{р2})}{\sin(\lambda + \alpha_{s} + \alpha_{р2})}, \tag{4.6}$$

$$U_{вын.к} = \frac{E_{s} \cdot \cos\alpha_{sэ} \cdot \sin\alpha_{р2}}{\sin(\lambda + \alpha_{s} + \alpha_{р2})}, \tag{4.7}$$

где

$$\alpha_{sэ} = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{sэ}}{Z_{w}}\right),$$

$$\alpha_{р2} = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{р2}}{Z_{w}}\right),.$$

$$X_{sэ} = \frac{X_{s} \cdot X_{р1}}{X_{s} + X_{р1}},$$

$$E_{s} = \frac{E \cdot X_{р1}}{X_{s} + X_{р1}}.$$

Вынужденные составляющие токов в реакторах, установленных в начале и в конце линии, определяются по выражениям:

$$I_{р1} = \frac{U_{вын.н}}{X_{р1}}, \qquad I_{р2} = \frac{U_{вын.к}}{X_{р2}}. \tag{4.8}$$

Начальные значения апериодических составляющих токов в ШР1 и ШР2 при включении переменной э.д.с. $e(t) = E\sin(\omega \cdot t + \psi)$ определяются как:

$$I_{апер.р1} = i_{р1}(0) - I_{р1}\cos(\psi), \tag{4.9}$$

$$I_{апер.р2} = i_{р2}(0) - I_{р2}\cos(\psi), \tag{4.10}$$

При отсутствии начального тока в реакторах ($i_{р1}(0)=0$, $i_{р2}(0)=0$):

$$I_{апер.р1} = -I_{р1}\cos(\psi), \quad I_{апер.р2} = -I_{р2}\cos(\psi).$$

Апериодическая составляющая тока в выключателе в схемах с двумя группами реакторов, установленными по концам линии, состоит из суммы двух экспонент, у каждой из которых свой декремент затухания:

$$i_{\text{апер.в.}}(t) = I_{\text{апер.р1}} \cdot e^{-\delta_{\text{р1}} \cdot t} + I_{\text{апер.р2}} \cdot e^{-\delta_{\text{р2}} \cdot t}. \quad (4.11)$$

При установке ШР только в начале линии, апериодическая составляющая тока в выключателе определится как:

$$i_{\text{апер.в.}}(t) = I_{\text{апер.р1}} \cdot e^{-\delta_{\text{р1}} \cdot t}. \quad (4.12)$$

При установке ШР только в конце линии, апериодическая составляющая тока в выключателе определится как:

$$i_{\text{апер.в.}}(t) = I_{\text{апер.р2}} \cdot e^{-\delta_{\text{р2}} \cdot t}. \quad (4.13)$$

4.8 Опасными с точки зрения успешного гашения дуги в выключателе являются случаи не перехода через ноль тока в выключателе, имеющего лишь две составляющие – вынужденную и апериодическую переходную (после затухания высокочастотной колебательной переходной составляющей).

Время от момента начала протекания тока через контакты выключателя до перехода через нулевое значение тока в выключателе после затухания колебательной переходной составляющей определяется по выражениям:

для схем с реакторами, установленными в начале ВЛ

$$t_{0\text{н}} = \frac{\ln I_{\text{апер.в}} - \ln\left|I_{\text{выкл.}}\right|}{\delta_{\text{р1}}}, \quad (4.14)$$

для схем с реакторами, установленными в конце ВЛ

$$t_{0\text{к}} = \frac{\ln I_{\text{апер.в}} - \ln\left|I_{\text{выкл.}}\right|}{\delta_{\text{р2}}}, \quad (4.15)$$

для схем с реакторами, установленными по концам ВЛ, необходимо построить огибающую кривую и определить время её перехода через нулевое значение,

$$i_{\text{ог.}}(t) = i_{\text{апер.в}}(t) - \left|I_{\text{выкл.}}\right| \quad (4.16)$$

где

$I_{\text{апер.в}}$ - начальное значение (при t=0) апериодической составляющей тока в выключателе, определяемое по выражениям 4.11 (для схем с ШР, установленными по обоим концам ВЛ), 4.9 (для схем с ШР, установленными только в начале ВЛ) или 4.10 (для схем с ШР, установленными только на конце ВЛ),

$I_{\text{выкл.}}$ – амплитудное значение вынужденной составляющей тока в выключателе, определяемое по выражению 4.5.

Время практически полного затухания апериодической составляющей тока в выключателе определяется по выражению:

$$t_з \approx \frac{5}{\delta_р}. \qquad (4.17)$$

4.9 При расчете схем с КЛ в силу их небольшой протяженности (небольшого активного сопротивления кабеля) допускается все ШР, установленные на линии, при оценочных расчетах по аналитической методике, присоединить к началу или концу КЛ.

4.10 После проведения расчетов основных параметров апериодической составляющей токов в линейных выключателях и вынужденных составляющих напряжений на разомкнутом конце линии следует выполнить следующие действия.

4.10.1 Сравнить полученные перенапряжения по величине с допустимыми, регламентируемыми ГОСТ 1516.3-96, с учетом длительности оперативных переключений, и с допустимыми по длительности для ОПН (установленными на ЛЭП) [2,3] для различного состава ШР на ЛЭП для нормальных и наиболее тяжелых послеаварийных (ремонтных) режимов при включении линии со стороны обеих ПС, к которым она примыкает.

4.10.2 На ЛЭП, оснащенных линейным (ми) ШР может возникать резонанс напряжений в схемах с наличием хотя бы одной фазы ЛЭП, отключенной с двух сторон, и хотя бы одной фазы ЛЭП, подключенной хотя бы с одной стороны к источнику питания. Как правило, для исключения возникновения резонанса, рекомендуется отключать ШР, в паузу АПВ, а также при постановке ЛЭП под напряжение [2-3].

Схемы с количеством реакторов, при котором наблюдается резонанс из дальнейших расчетов апериодической составляющей необходимо исключить.

4.10.3 Результаты предварительных расчетов занести в таблицу 4.1.

Т а б л и ц а 4.1 - Результаты расчета вынужденных составляющих напряжения на разомкнутом конце ЛЭП в режиме одностороннего симметричного включения и основных характеристик коммутируемых токов, протекающих через линейные выключатели

№	Сторона включения	Количество подключенных к ЛЭП ШР	$K_р$	$U_{нач.}$ кВ	$U_{вын.к}$, кВ	$\frac{U_{вын.к}}{U_{ном.ф.m}}$	$K_{доп}$	$I_{в.вын}$ А	$I_{ап}$, А	t_0, с	$t_{0доп}$, с
1	ПС 1	один у ПС 1 один у ПС 2	1,1		390	0,956	1,05	50	500	0,4	0,08
2	ПС 1	один у ПС 1	0,55								
3	ПС 1	один у ПС 2	0,55								
4	ПС 1	нет	0								
5	ПС 2	один у ПС 1 один у ПС 2	1,1								
6	ПС 2	один у ПС-1	0,55								
7	ПС 2	один у ПС-2	0,55								
8	ПС 2	нет	0								

В таблице 4.1 приняты следующие обозначения:

$U_{\text{нач.}}$ – амплитудное фазное напряжение на шинах ПС со стороны включения до постановки ЛЭП под напряжение в нормальных и наиболее тяжелых послеаварийных (ремонтных) режимах;

$U_{\text{вын.к}}$ – амплитудное значение вынужденной составляющей напряжения на конце разомкнутой линии;

$K_{\text{доп}}$ – допустимая кратность вынужденной составляющей напряжения;

$K_{\text{р}}$ – коэффициент компенсации емкостного тока, генерируемого линией, индуктивностью ШР, подключенных к линии

$$K_{\text{р}} = \frac{Q_{p\Sigma}}{Q_{\text{з}}}, \quad Q_{\text{з}} = \frac{2U^2_{\text{ном}}}{Z_w \cdot \text{ctg}\dfrac{\lambda}{2}}, \qquad (4.18)$$

где

$Q_{\text{р}\Sigma}$ - суммарная мощность ШР, подключенных к линии;

$Q_{\text{з}}$ - реактивная емкостная мощность, генерируемая ЛЭП (для КЛ зарядная мощность линии определяется без учета распределенности её параметров по выражению $Q_{\text{з}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{зар}}$);

$I_{\text{зар}}$ – зарядный ток фазы КЛ при частоте 50 Гц);

$I_{\text{в вын}}$ – вынужденная составляющая в токе выключателя;

$I_{\text{ап}}$ – начальное значение апериодической составляющей тока в выключателе.

t_0 – время от начала коммутации до первого прохождения через нулевое значение тока в выключателе;

$t_{0\text{доп.}}$– сумма минимального времени срабатывания защит и минимального собственного времени отключения выключателя.

4.10.4 Условием успешного отключения ЛЭП является

$$t_0 < t_{0\text{доп}}. \qquad (4.19)$$

На основании полученных результатов при несоблюдении этого условия следует сделать вывод о необходимости применения комплекса мер, позволяющих предотвратить опасные для выключателя режимы эксплуатации при коммутируемых токах, содержащих апериодическую составляющую.

4.11 Для проверки эффективности выбранных мер по ограничению апериодической составляющей в отключаемом токе необходимо:

провести численные исследования с использованием программных продуктов для моделирования электромагнитных переходных процессов в электрических цепях и сетях (*EMTP, Simulink*, и др.) всех возможных в эксплуатации коммутаций ЛЭП ВН, оснащенных ШР и элегазовыми выключателями;

на основе технико-экономического сравнения выбрать оптимальный для конкретной сети вариант ограничения апериодической составляющей в коммутируемом токе.

4.12 При проведении численных исследований принять во внимание следующие моменты [1].

4.12.1 Угол (фаза) напряжения на шинах ПС при включении выключателя влияет на величину апериодической переходной составляющей тока в выключателе. Максимальное значение апериодической составляющей отвечает включению в момент минимального напряжения на контактах выключателя (при нулевом начальном заряде на линии – включение в момент нулевого напряжения на шинах системы). В этом случае перенапряжения на линии минимальны. При включении в другие моменты времени начальное значение апериодической составляющей тока уменьшается, а перенапряжения возрастают.

4.12.2 Время затухания апериодической составляющей в токе линейного выключателя, зависит прежде всего от добротности элементов схемы (ШР, линии, силовых трансформаторов и т.д.). Время полного затухания апериодической составляющей тока в выключателе лежит в диапазоне от 0,5 до 5 с.

4.12.3 В схемах с коэффициентом компенсации реактивной мощности, генерируемой линией, шунтирующими реакторами, подключенными на ЛЭП, $K_р \leq 0,5$ выключатель как правило успешно отключает токи в неповрежденных фазах за время не превышающее сумму минимального времени срабатывания защит и полного времени отключения выключателя во всех схемно-режимных ситуациях.

5. Выбор мер и средств по уменьшению апериодической составляющей токов в выключателе

Для снижения влияния (уменьшения начального значения) апериодической составляющей на надежность эксплуатации выключателей с интенсивным дугогашением можно предусмотреть следующие меры:

схемно-режимные мероприятия, включающие уменьшение степени компенсации $K_р$ (например, частичное отключение ШР) перед включением ВЛ и программируемое включение (заранее определенный порядок включения выключателей по концам ЛЭП, в зависимости от мощности питающих систем и расстановки ШР, обеспечивающий наименьшие значения апериодической составляющей тока в выключателях);

применение линейного выключателя с предвключаемым резистором;

применение выключателя с предвключаемым резистором в цепи ШР;

управляемое включение (включение в момент максимума напряжения на контактах выключателя).

5.1 Алгоритм программируемого включения устанавливается по признаку наименьшего времени затухания апериодической составляющей и наибольшего значения вынужденной периодической составляющей тока частоты 50 Гц, протекающего через выключатель.

5.2 Декремент затухания апериодической составляющей тока определяется в значительной степени активным сопротивлением коммутируемой цепи (включая активное сопротивление ЛЭП), поэтому, при выборе алгоритма программируемого включения ЛЭП, обеспечивающего уменьшение времени затухания апериодической

составляющей тока, следует во всех режимах включать линию со стороны, противоположной концу, на котором установлены компенсирующие устройства большей суммарной мощности. Такое включение обеспечивает также минимальное значение вынужденной составляющей напряжения на конце односторонне включенной линии.

5.3 При установке на ЛЭП нескольких групп ШР уменьшить начальное значение апериодической составляющей в отключаемом токе можно за счет отключения части ШР перед включением выключателя, уменьшив при этом $K_р$. Это можно выполнить как перед коммутацией планового включения, так и перед повторным включением в цикле АПВ (отключить часть ШР за время "бестоковой" паузы АПВ).

Однако, уменьшение степени компенсации $K_р$ перед включением ВЛ приведет к увеличению перенапряжений на разомкнутом конце линии. Оценить эффективность такой меры следует на основании предварительных расчетов, сведенных в таблицу 4.1, в которой также приведены значения вынужденных составляющих напряжения на разомкнутом конце ЛЭП при различном количестве ШР на ЛЭП.

При проектировании новых линий и ПС необходимо обосновывать места подключения ШР (на линии или на шинах ПС) как с точки зрения использования их для ограничения перенапряжений, так и с точки зрения уменьшения апериодической составляющей тока в линейном выключателе.

5.4 Эффективность схемно-режимных мер снижения влияния апериодической составляющей в отключаемом токе на надежность эксплуатации выключателей на конкретной линии можно повысить применяя одновременно программированное осуществление коммутации (во всех режимах включение линии со стороны, противоположной концу, на котором установлены компенсирующие устройства большей суммарной мощности) и уменьшение коэффициента компенсации (частичное отключение ШР перед включением ВЛ).

5.5 После проведения численных расчетов следует рассмотреть допустимость рекомендуемой меры не только с точки зрения уменьшения апериодической составляющей в отключаемом токе, но и с точки зрения возникающих перенапряжений, условий эксплуатации защитных аппаратов (ОПН) и уточнения при необходимости требований к их техническим характеристикам.

5.6 В расчетах учесть, что быстрое отключение может возникнуть в случае ложного срабатывания РЗ при пробном включении аварийной фазы в цикле успешного ОАПВ.

5.7 Для вновь проектируемой линии необходимо предусмотреть мероприятия, облегчающие погасание дуги подпитки за время "бестоковой" паузы ОАПВ и не допускающие резонансного повышения напряжения на отключенной фазе после её погасания [2,4].

Выбор в качестве меры ограничения апериодической составляющей уменьшение количества ШР (с реактором в нейтрали) требует дополнительной проверки режимов “бестоковой” паузы ОАПВ.

5.8 При установке на ВЛ выключателей с предвключаемыми резисторами апериодическая составляющая в токе возникает как на первом этапе включения - при включении дугогасительных контактов, так и на втором этапе включения – при включении главных контактов, шунтирующих резисторы. На первом этапе включения апериодическая составляющая за счет предвключаемого резистора, включенного в цепь, быстрее затухает, чем в цепи без резистора. На втором этапе включения вновь появляется апериодическая составляющая, начальное значение которой значительно меньше, чем на первом этапе (амплитуда апериодической составляющей на втором этапе включения может быть равна нулю, а может быть примерно на 30 % меньше, чем на первом этапе коммутации в зависимости от момента включения ГК).

Поэтому не при всех значениях сопротивления и не во всех схемно-режимных ситуациях гарантируется переход тока через нулевое значение к моменту начала расхождения контактов выключателя.

5.9 Решение вопроса о надежности гашения дуги в выключателе при установке на ВЛ выключателей с предвключаемыми резисторами следует принимать после обязательного точного подбора величины сопротивления предвключаемого резистора и времени его нахождения в цепи и проверки эффективности работы выбранного резистора при всех возможных коммутациях, приведенных в разделе 6.

5.10 Сопротивление предвключаемого резистора, как правило, находится в диапазоне от 200 до 1000 Ом. Время предвключения резистора у большинства изготовителей выключателя составляет 10 мс.

5.11 При установке на линии одной группы ШР предвключаемыми резисторами может быть оснащен выключатель, подключающий ШР к линии (при отсутствии такого выключателя в нейтраль каждой фазы ШР может быть присоединен резистор, шунтируемый дополнительным выключателем номинальным напряжением 35 кВ).

Предвключаемый резистор в цепи ШР может использоваться для двух целей: быстрого стекания заряда с отключенных на время бестоковой паузы ТАПВ фаз ВЛ и уменьшения апериодической составляющей тока в линейных выключателях при пробном включении в цикле ТАПВ.

Для этого после отключения фаз линии с двух сторон необходимо отключить выключатель (ГК), шунтирующий предвключаемые резисторы, и оставить резистор (сопротивление резистора от 150 до 300 Ом) в цепи ШР на время паузы ТАПВ плюс время отключения выключателя в случае неуспешного пробного включения линии (примерно 0,1 с).

5.12 УПНКП выключателями могут быть применены в целях снижения перенапряжений, увеличения эксплуатационного ресурса выключателей в цепях шунтирующих реакторов, батарей статических конденсаторов, длинных линий 110

кВ и выше, снижения динамических нагрузок на силовые трансформаторы и автотрансформаторы, при соответствующем техническом обосновании. Изготовитель должен гарантировать выполнение операции включения в требуемый момент времени, а отключения без повторных зажиганий дуги.

5.13 Для исключения опасного влияния апериодической составляющей в токе, протекающем через выключатель при одностороннем включении ЛЭП, оснащенной ШР, при повторном включении линии в цикле ТАПВ следует включать выключатель в момент времени, соответствующий моменту максимального напряжения на его контактах.

При этом необходимо учитывать, что напряжение на линии, оснащенной ШР, после её отключения от сети имеет вид затухающих колебаний, частота которых зависит от степени компенсации индуктивностью ШР фазных емкостей линии и может определяться по формуле.

$$u_{\text{ф}}(t) = U_0 \cdot \cos \omega_0 t \cdot e^{-\delta \cdot t},$$

где

$\delta \approx \frac{r_{\text{р}\Sigma}}{L_{\text{р}\Sigma}}$ – декремент затухания колебаний в отключенной фазе;

$r_{\text{р}\Sigma}$ – суммарное фазное активное сопротивление ШР, установленных на линии;

$L_{\text{р}\Sigma}$ – суммарная фазная индуктивность ШР, установленных на линии;

U_0 – напряжение на линии в момент погасания дуги в выключателе;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{p\Sigma} \cdot C_{\text{ф}}}}$ – частота собственных колебаний в отключенных фазах ВЛ.

Время полного стекания заряда с отключенной линии при добротности ШР 300-500 составляет от 2 до 5 с, что сопоставимо с временем “бестоковой” паузы ТАПВ (2-4 с).

Напряжение на контактах выключателя будет иметь вид биений, период которых определяется по выражению:

$$T_{\text{биений}} = \frac{2\pi}{\omega_0 - \omega}, \qquad (5.1)$$

период изменения напряжения на контактах выключателя определяется по выражению:

$$T_{\text{кв}} = \frac{4\pi}{\omega_0 + \omega}, \qquad (5.2)$$

где

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{p\Sigma} \cdot C_{\text{ф}}}}$ – частота собственных колебаний в отключенной фазе ВЛ;

$C_{\text{ф}}=C_0$ – суммарная фазная емкость линии;

$C_{ф} = C_0 = 1/(Z_{вх.0} \cdot \omega)$, $Z_{вх.0} = jZ_{w0} \cdot \mathrm{ctg}\,\lambda_0$,

$Z_{w0} = \sqrt{L_0/C_0}$, $\lambda_0 = 18 \cdot 10^3 \cdot l_{ВЛ}\sqrt{L_0 \cdot C_0}$ (град) –

параметры линии для нулевой последовательности фаз.

При изменении значения $K_р$ в диапазоне от 0,5 до 1,1 период биений составит от 0,2 до 10 с, при этом частота колебаний напряжения на контактах выключателя изменяется от 52,5 Гц до 45 Гц.

5.14 Допустимое отклонение угла включения $\Delta\varphi$ от 90° определяется по выражению

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{I_{доп}}{I_{ап.max}}\right), \qquad (5.3)$$

где

$I_{доп}$ – начальное значение апериодической составляющей тока, которую желательно получить;

$I_{ап.max}$ – максимальное начальное значение апериодической составляющей тока в рассматриваемой коммутации.

Если ориентироваться на максимальное возможное начальное значение апериодической составляющей тока при плановом включении в момент нулевого напряжения на контактах коммутируемого выключателя равное $I_{ап.max} \approx I_{р\Sigma m} \approx I_{р1} + I_{р2}$ (формула 4.8), а при включении линии в цикле ТАПВ (с учетом стекания заряда с линии за паузу АПВ) $I_{ап.max} \approx 1{,}5 I_{р\Sigma m}$ и на желательное начальное значение апериодической составляющей равное вынужденной составляющей тока в выключателе $I_{доп} \approx I_{вын}$ допустимое отклонение угла включения $\Delta\varphi$ от 90° составляет

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{I_{вын}}{I_{р\Sigma m}}\right). \qquad (5.4)$$

Допустимое отклонение времени включения Δt при рассчитанном $\Delta\varphi$ (в градусах) определится исходя из рассчитанного периода изменения напряжения на контактах выключателя (T) для рассматриваемой схемы

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi \cdot T}{360^o}, \qquad (5.5)$$

где $T = T_{КВ}$ (формула 5.2) при включении в цикле АПВ или $T = 1/f$ (f - частота изменения напряжения в сети в Гц).

5.15 В случаях применения УПНКП выключателя, предназначенного для выполнения операции включения в момент максимума напряжения на контактах выключателя, одновременно с анализом апериодической составляющей тока в выключателе необходимо проводить расчеты перенапряжений на линии во время выполняемых коммутаций, так как рекомендованный с точки зрения минимума апериодической составляющей тока в выключателе алгоритм включения приводит к максимальным перенапряжениям на изоляции оборудования ПС и ЛЭП, а также

оценивать повышенные нагрузки на ОПН и изоляцию основного оборудования ПС, ЛЭП.

6. Расчетные коммутации, которые необходимо рассматривать при анализе выбранных мер для ограничения апериодической составляющей тока в линейном выключателе

6.1 Для проверки выбранного комплекса мер по ограничению апериодической составляющей тока в коммутируемом выключателе следует на стадии проектирования провести численные исследования всех возможных в эксплуатации коммутаций ЛЭП ВН, оснащенных ШР. При расчетах необходимо учитывать, что время перехода тока через ноль должно происходить до момента начала расхождения контактов выключателя равного сумме минимального времени срабатывания устройств релейной защиты и собственного времени отключения выключателя.

6.2 В таблицах 6.1-6.3, приведены перечни расчетных схем, для которых необходимо выполнять расчеты с целью выбора комплекса мер ограничения апериодической составляющей тока в выключателе при коммутации ВЛ ВН, расчетные схемы коммутации, алгоритм коммутации и перечень информации о процессах в элементах схемы, которую необходимо получить в результате расчетов.

Расчеты должны производиться для рекомендуемого состава ШР на ЛЭП для нормальных и наиболее тяжелых послеаварийных (ремонтных режимов) при включении линии со стороны обеих ПС, к которым она примыкает (либо для рекомендуемого порядка коммутации).

6.3 В таблице 6.1 приведены расчетные коммутации ЛЭП, при которых могут возникать опасные значения апериодической составляющей тока в выключателе при использовании в качестве меры ограничения апериодической составляющей программированного осуществления коммутации и отключения части ШР перед включением линии (уменьшение $K_{\text{р}}$).

Если не задавать при включении линии определенный порядок коммутаций включения с той или иной стороны коммутируемой ВЛ, то количество расчетных коммутаций увеличивается вдвое (включение выключателя может произойти как со стороны ПС 1, так и со стороны ПС 2).

6.4 В таблице 6.2 приведены расчетные коммутации ЛЭП, при которых могут возникать опасные значения апериодической составляющей тока в выключателе при использовании в качестве меры ограничения апериодической составляющей в отключаемом токе выключателей с предвключаемыми резисторами.

6.5 При использовании в качестве меры ограничения апериодической составляющей в токе выключателя, оснащенного УПНКП расчетные коммутации ЛЭП, при которых могут возникать опасные значения апериодической составляющей тока в выключателе те же, что приведены в таблице 6.1. При этом процессы следует рассчитывать для двух моментов включения:

при расчете перенапряжений включение линии должно происходить при максимальном напряжении на контактах выключателя;

при расчете токов в выключателе включение линии должно происходить при максимальном напряжении на контактах выключателя $\pm\Delta t$, рассчитанное для конкретной схемы (по выражению 5.5).

6.6 В результате проведенных расчетов необходимо получить следующие расчетные осциллограммы процессов в элементах схемы:

токов в фазах *A, B* и *C* линейного выключателя;

напряжений в конце разомкнутой линии на фазах *A, B* и *C*;

напряжений на контактах выключателя в фазах *A, B* и *C*;

токов в фазах *A, B* и *C* ОПН, установленных на ВЛ;

энергии, выделяемой в ОПН в течение всего цикла коммутации;

токов или энергии, выделенной в предвключаемом резисторе выключателя.

6.7 Из полученных расчетных осциллограмм в проектной документации необходимо оставить расчетные осциллограммы для наиболее тяжелых режимов коммутации, а из остальных расчетных осциллограмм в проектную документацию включить следующую информацию:

начальное значение апериодической составляющей тока в выключателе;

амплитуду вынужденной составляющей тока в выключателе;

время первого перехода тока в выключателе через ноль;

максимальную амплитуду перенапряжений на разомкнутом конце ВЛ (для сравнения с напряжением, допустимым для изоляции оборудования, подключенного на конце ВЛ);

максимальную амплитуду токов в ОПН, установленных в схеме;

энергию, рассеиваемую в ОПН во время полного цикла коммутации для проверки установленного ОПН на энергоёмкость;

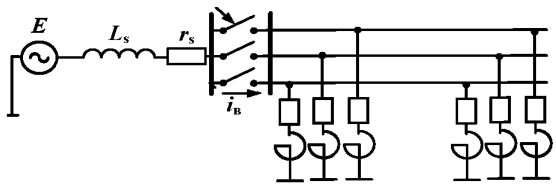
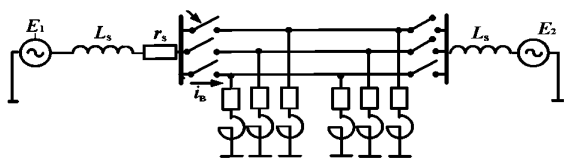
ток или энергию, выделенную в предвключаемом резисторе короткозамкнутой фазы, или резисторах неаварийных фаз при отсутствии КЗ.

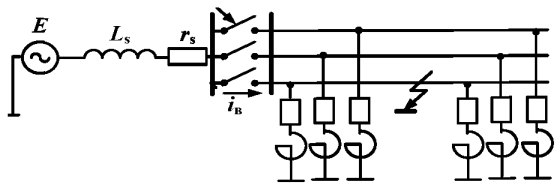
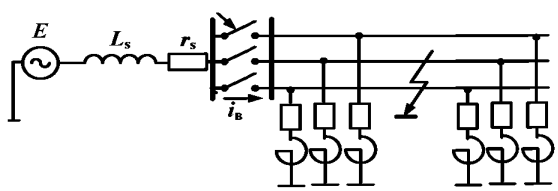
6.8 В таблице 6.3 приведены расчетные коммутации на КЛ, при которых могут возникать опасные значения апериодической составляющей тока в выключателе, коммутирующем КЛ. При использовании различных мер ограничения апериодической составляющей тока в выключателе алгоритмы коммутаций аналогичны случаям, приведенным в таблицах 6.1 и 6.2.

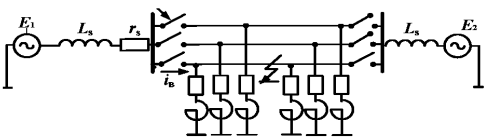
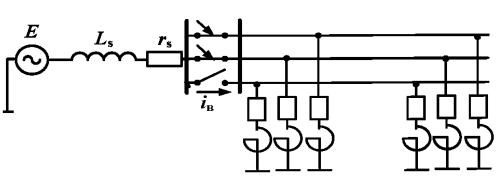
6.9 В качестве расчетных коммутаций, при которых могут возникать опасные значения апериодической составляющей тока в отключаемом выключателе, в КВЛ следует рассматривать коммутации, перечисленные в пп.6.3 – 6.5.

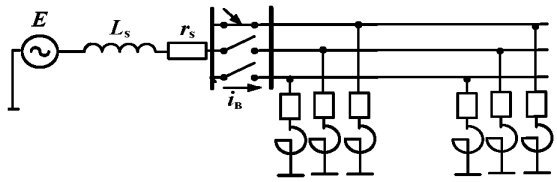
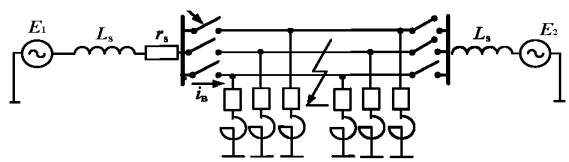
Т а б л и ц а 6.1 – Расчетные коммутации ЛЭП, при которых могут возникать опасные значения апериодической составляющей тока в выключателе при использовании в качестве меры ограничения апериодической составляющей программированного осуществления коммутации и отключения ШР (уменьшения $K_р$)

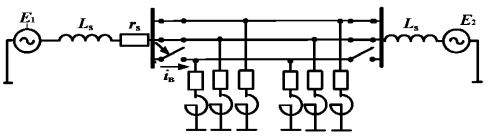
№	Расчетная схема, расчётный случай	Алгоритм коммутации, задаваемый в расчётах
1	**2**	**3**

1	Плановое включение незаряженной ЛЭП при отсутствии на ней КЗ в предположении возможного ложного срабатывания РЗ  1. Количество и место подключения ШР выбраны заранее 2. Сторона включения выбрана заранее	1.Включается незаряженная линия Рассчитывать процессы для двух моментов включения: - включение при нулевом напряжении на шинах - включение при максимальном напряжении на шинах
2	Повторное включение ЛЭП в цикле ТАПВ (здесь и далее: для ВЛ, на которых используется только ТАПВ) при устранившемся за время паузы ТАПВ КЗ в предположении возможного ложного срабатывания РЗ  1. Количество и место подключения ШР выбраны заранее 2. Сторона включения выбрана заранее	1. На линии - однофазное КЗ 2. Отключаются выключатели с обеих сторон ВЛ 3. КЗ отключается 4. Режим паузы ТАПВ (время “бестоковой” паузы задается) 5. Линия повторно включается с выбранной заранее стороны ВЛ Рассчитывать процессы для двух моментов повторного включения: - включение при нулевом напряжении на контактах выключателя - включение при максимальном напряжении на контактах выключателя

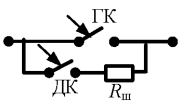
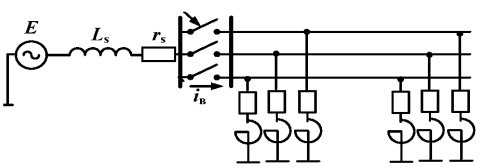
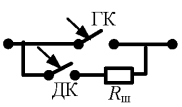
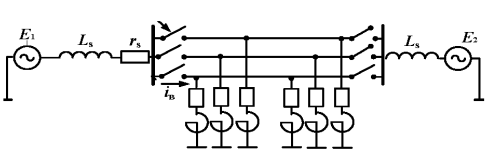
3	Плановое включение незаряженной ЛЭП при наличии на ней КЗ  1. Количество и место подключения ШР выбраны заранее 2. Сторона включения выбрана заранее 3. Место КЗ варьируется (начало, середина и конец ВЛ)	1. На одной из фаз ВЛ КЗ 2. Включается линия с одной стороны Рассчитывать процессы для двух моментов включения: - включение при нулевом напряжении на шинах - включение при максимальном напряжении на шинах
4	Плановое включение незаряженной ЛЭП при наличии на ней двухфазного КЗ на землю  1. Количество и место подключения ШР выбраны заранее 2. Сторона включения выбрана заранее 3. Место КЗ варьируется (начало, середина и конец ВЛ)	1. На ВЛ двухфазное КЗ на землю 2. Включается линия с одной стороны Рассчитывать процессы для двух моментов включения: - включение при нулевом напряжении на шинах - включение при максимальном напряжении на шинах

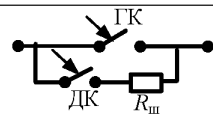
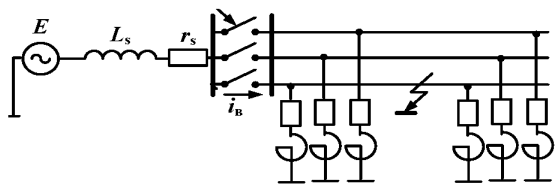
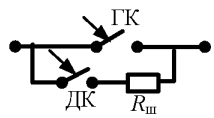
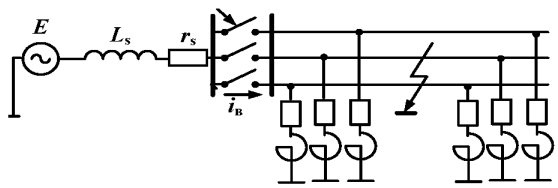
5	Повторное включение ЛЭП в цикле неуспешного ТАПВ при неустранившемся за время паузы ТАПВ КЗ (для ВЛ, на которых используется только ТАПВ)  1. Количество и место подключения ШР выбраны заранее 2. Сторона включения выбрана заранее 3. Место КЗ варьируется (начало, середина и конец ВЛ)	1. Рассчитывается установившийся режим с КЗ на одной из фаз 2. Отключаются выключатели с обеих сторон ВЛ 3. Режим паузы ТАПВ (время “бестоковой” паузы задается) КЗ не исчезает. 4. Линия повторно включается с выбранной заранее стороны электропередачи Рассчитывать процессы для двух моментов повторного включения: - включение при нулевом напряжении на контактах выключателя - включение при максимальном напряжении на контактах выключателя
6	Включение двух фаз коммутируемого выключателя при плановом включении ЛЭП  1. Количество и место подключения ШР выбраны заранее 2. Сторона включения выбрана заранее	1. Включаются две фазы выключателя Рассчитывать процессы для двух моментов включения: - включение при нулевом напряжении на шинах - включение при максимальном напряжении на шинах

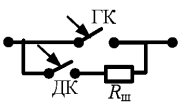
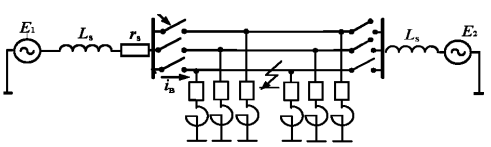
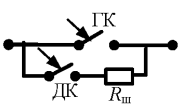
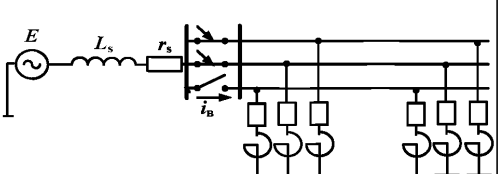
7	Включение одной фазы коммутируемого выключателя при плановом включении ЛЭП  1. Количество и место подключения ШР выбраны заранее 2. Сторона включения выбрана заранее	1. Включается одна фаза выключателя Рассчитывать процессы для двух моментов включения: - включение при нулевом напряжении на шинах - включение при максимальном напряжении на шинах
8	Повторное включение ЛЭП в цикле неуспешного ТАПВ при неустранившемся за время паузы ТАПВ двухфазном КЗ на землю  1. Количество и место подключения ШР выбраны заранее 2. Сторона включения выбрана заранее 3. Место КЗ варьируется (начало, середина и конец ВЛ)	1. Рассчитывается установившийся режим с двухфазным КЗ на землю 2. Отключаются выключатели с обеих сторон ВЛ 3. Режим паузы ТАПВ (время “бестоковой” паузы задается) 4. Линия повторно включается с выбранной заранее стороны ЛЭП Рассчитывать процессы для двух моментов повторного включения: - включение при нулевом напряжении на контактах выключателя - включение при максимальном напряжении на контактах выключателя

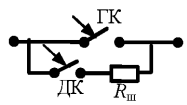
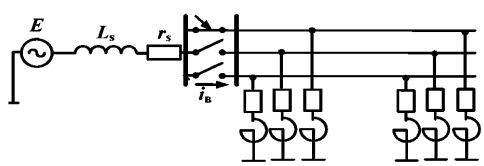
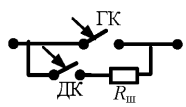
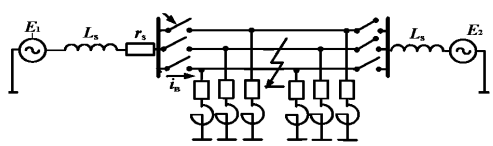
9	Повторное включение аварийной фазы ЛЭП в цикле успешного ОАПВ в предположении возможного ложного срабатывания РЗ  1. Количество и место подключения ШР выбраны заранее 2. Сторона включения выбрана заранее	1. Рассчитывается установившийся режим с однофазным фазным КЗ на землю на одной из фаз ВЛ 2. Отключаются выключатели аварийной фазы с обеих сторон ВЛ 3. Режим паузы ОАПВ (время “бестоковой” паузы задается) 4. Аварийная фаза повторно включается с выбранной заранее стороны Рассчитывать процессы для двух моментов повторного включения: – включение при нулевом напряжении на контактах выключателя аварийной фазы – включение при максимальном напряжении на контактах выключателя аварийной фазы

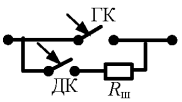
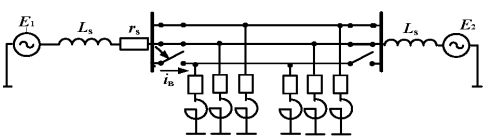
Т а б л и ц а 6.2 – Расчетные коммутации ЛЭП, при которых могут возникать опасные значения апериодической составляющей тока в выключателе при использовании в качестве меры ограничения апериодической составляющей в отключаемом токе выключателя с предвключаемым резистором

	Расчетная схема, расчётный случай	Алгоритм коммутации, задаваемый в расчётах
1	**2**	**3**
1	 Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором Плановое включение незаряженной ЛЭП при отсутствии на ней КЗ в предположении возможного ложного срабатывания РЗ 	1. Включаются ДК выключателя 2. Через время Δt включаются ГК выключателя 3. Через время $\Delta t_{откл.} = t_{РЗ} + t_{выкл}$ выключатель отключается (контакты размыкаются при переходе тока в выключателе через ноль) 1. Сопротивление резистора предварительно выбирается при заданном Δt (0,01 с) 2. Время включения ГК варьируется
2	 Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором Повторное включение ЛЭП в цикле ТАПВ при устранившемся за время паузы ТАПВ КЗ в предположении возможного ложного срабатывания РЗ (для ВЛ, на которых используется только ТАПВ) 	1. На линии, режим однофазного КЗ 2. Отключаются выключатели с обеих сторон ВЛ 3. КЗ отключается 4. Режим паузы ТАПВ (время “бестоковой” паузы задается) 5. Включаются ДК выключателя 6. Через время Δt включаются ГК выключателя 7. Через время $\Delta t_{откл.} = t_{РЗ} + t_{выкл}$ выключатель отключается (контакты размыкаются при переходе тока в выключателе через ноль) 1. Сопротивление резистора предварительно выбирается при заданном Δt (0,01 с) 2. Время включения ГК варьируется

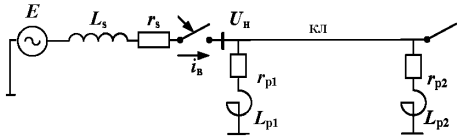
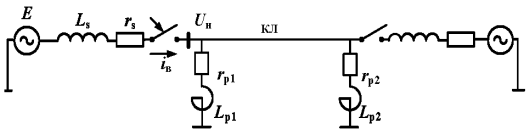
1	2	3
3	 Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором Плановое включение незаряженной ЛЭП при наличии на ней КЗ 	1. На одной из фаз ВЛ КЗ 2. Включаются ДК выключателя 3. Через время Δt включаются ГК выключателя 4. Через время $\Delta t_{откл.} = t_{РЗ}+t_{выкл}$ выключатель отключается (контакты размыкаются при переходе тока в выключателе через ноль) 1. Сопротивление резистора предварительно выбирается при заданном Δt (0,01 с) 2. Время включения ГК варьируется 3. Место КЗ варьируется (начало, середина и конец ВЛ)
4	 Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором Плановое включение незаряженной ЛЭП при наличии на ней двухфазного КЗ на землю 	1. На ВЛ двухфазное КЗ на землю 2. Включаются ДК выключателя 3. Через время Δt включаются ГК выключателя 4. Через время $\Delta t_{откл.} = t_{РЗ}+t_{выкл}$ выключатель отключается (контакты размыкаются при переходе тока в выключателе через ноль) 1. Сопротивление резистора предварительно выбирается при заданном Δt (0,01 с) 2. Время включения ГК варьируется 3. Место КЗ варьируется (начало, середина и конец ВЛ)

1	2	3
5	 Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором Повторное включение ЛЭП в цикле неуспешного ТАПВ при неустранившемся за время паузы ТАПВ КЗ (для ВЛ, на которых используется только ТАПВ) 	1. Рассчитывается установившийся режим с КЗ на одной из фаз 2. Отключаются выключатели с обеих сторон ВЛ 3. Режим паузы ТАПВ (время “бестоковой” паузы задается) КЗ не отключается. 4. Включаются ДК выключателя 5. Через время Δt включаются ГК выключателя 6. Через время $\Delta t_{откл.} = t_{РЗ} + t_{выкл}$ выключатель отключается (контакты размыкаются при переходе тока в выключателе через ноль) 1. Сопротивление резистора предварительно выбирается при заданном Δt (0,01 с) 2. Время включения ГК варьируется 3. Место КЗ варьируется (начало, середина и конец ВЛ)
6	 Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором Включение двух фаз коммутируемого выключателя при плановом включении ЛЭП 	1. Включаются ДК выключателей двух фаз 2. Через время Δt включаются ГК выключателей двух фаз 3. Через время $\Delta t_{откл.} = t_{РЗ} + t_{выкл}$ выключатель отключается (контакты размыкаются при переходе тока в выключателе через ноль) 1. Сопротивление резистора предварительно выбирается при заданном Δt (0,01 с) 2. Время включения ГК варьируется

1	2	3
7	 Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором Включение одной фазы коммутируемого выключателя при плановом включении ЛЭП 	1. Включаются ДК выключателя одной фазы 2. Через время Δt включается ГК выключателя одной фазы 3. Через время $\Delta t_{откл.} = t_{РЗ} + t_{выкл}$ выключатель отключается (контакты размыкаются при переходе тока в выключателе через ноль) 1. Сопротивление резистора предварительно выбирается при заданном Δt (0,01 с) 2. Время включения ГК варьируется
8	 Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором Повторное включение ЛЭП в цикле неуспешного ТАПВ при неустранившемся за время паузы ТАПВ двухфазном КЗ на землю 	1. Рассчитывается установившийся режим с двухфазным КЗ на землю 2. Отключаются выключатели с обеих сторон ВЛ 3. Режим паузы ТАПВ (время “бестоковой” паузы задается) 4. Включаются ДК выключателя 5. Через время Δt включаются ГК выключателя 6. Через время $\Delta t_{откл.} = t_{РЗ} + t_{выкл}$ выключатель отключается (контакты размыкаются при переходе тока в выключателе через ноль) 1. Сопротивление резистора предварительно выбирается при заданном Δt (0,01 с) 2. Время включения ГК варьируется 3. Место КЗ варьируется (начало, середина и конец ВЛ)

1	2	3
9	 Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором Повторное включение аварийной фазы ЛЭП в цикле успешного ОАПВ в предположении возможного ложного срабатывания РЗ 	1. Рассчитывается установившийся режим с однофазным КЗ на землю на одной из фаз ВЛ 2. Отключаются выключатели аварийной фазы с обеих сторон ВЛ 3. Режим паузы ОАПВ (время “бестоковой” паузы задается) 4. Включается ДК выключателя одной фазы 5. Через время Δt включаются ГК выключателя одной фазы 1. Сопротивление резистора предварительно выбирается при заданном Δt (0,01 с) 2. Время включения ГК варьируется

Т а б л и ц а 6.3 – Расчетные коммутации КЛ, при которых могут возникать опасные значения апериодической составляющей тока в выключателе, и основные характеристики процесса

№	Расчетная схема	Алгоритм коммутации, задаваемый в расчётах
1	 Плановое включение КЛ в предположении возможного ложного срабатывания РЗиА (включение незаряженной КЛ) Количество и место подключения ШР выбраны заранее. Сторона включения выбрана заранее, либо расчет производится для случаев включения со стороны разных ПС.	1.Включается незаряженная линия Рассчитывать процессы для двух моментов включения: - включение при нулевом напряжении на шинах - включение при максимальном напряжении на шинах
2	 Включение КЛ при наличии на ней остаточного заряда Количество и место подключения ШР выбраны заранее Сторона включения выбрана заранее, либо расчет производится для случаев включения со стороны разных ПС.	1. На КЛ - нормальный режим 2. Отключаются выключатели с обеих сторон КЛ 3. Линия повторно включается с выбранной заранее стороны КЛ Рассчитывать процессы для двух моментов повторного включения: – включение при нулевом напряжении на контактах выключателя – включение при максимальном напряжении на контактах выключателя

7. Эксплуатация выключателей в цепи шинных ШР

7.1 На ПС с реакторами, установленными на шинах и не используемыми для ограничения перенапряжений при включениях линий (непротяженные ВЛ, КЛ ВН, ПС напряжением 110 и 220 кВ) такие реакторы необходимо отключать перед пробным включением шин линейным выключателем в цикле АПВ шин ПС с целью исключения апериодической составляющей в токе коммутируемого выключателя.

Подключение реакторов необходимо производить только после восстановления нормального режима работы ПС.

8. Технико-экономическое сравнение вариантов

Технико-экономическое сравнение вариантов необходимо выполнять в соответствии с Методическими рекомендациями по проектированию развития энергосистем (СО 153-34.20.118-2003).

При сравнении необходимо исключить инвариантные затраты. В расчете учитываются затраты на оснащение выключателей предвключаемыми резисторами, УПНКП (при этом для схем в которых линия подключается в развилку из выключателей необходимо учитывать, что каждый из выключателей должен оснащаться УПНКП), замену/установку ОПН (при необходимости).

Ставку дисконтирования рекомендуется принимать на уровне средневзвешенной стоимости капитала для эксплуатирующей организации. Если эта величина не доступна, по согласованию с Заказчиком (собственником ПС) допускается принимать ставку дисконтирования в размере 8-10%. Затраты на амортизацию оборудования в расчет не включаются.

9. Выбор рекомендуемого способа обеспечения отключения выключателя

На основании проведенных расчетов следует выбрать индивидуальное техническое решение по обеспечению надежной эксплуатации элегазовых выключателей для применения на каждой конкретной ПС.

Рекомендуемое решение должно содержать:

- схему подключения СКРМ;
- последовательность коммутации выключателей в нормальных и аварийных режимах;
- необходимость использования предвключаемых резисторов в выключателях, требования к резисторам: диапазон допустимых сопротивлений, диапазон времен предвключения резисторов;
- необходимость использования резисторов, подключенных в нейтраль каждой фазы ШР, требования к резисторам: диапазон допустимых сопротивлений, диапазон времен включения резисторов в цепь;
- необходимость использования и требования к УПНКП: диапазон допустимых углов включения, места установки УПНКП для ПС.

Библиография

[1] Отчет по НИР «Методика расчетов переходных режимов для выявления опасных уровней апериодической составляющей токов в моменты коммутаций выключателями присоединений и определение дополнительных требований к выключателям, устанавливаемым на этих присоединениях», НГТУ, Новосибирск, 2012 г.

[2] РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений/Под научной ред. Н.Н.Тиходеева.-2-ое издание.- СПб:ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.-353с.

[3] СТО 56947007-29.240.10.028-2009. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС).

[4] Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений/Под ред. М.Л.Левинштейна.-М.:Энергоатомиздат,1991.-256с.

Приложение 2
к распоряжению ОАО «ФСК ЕЭС»
от 10.12.2012 № 838р

Возможность оснащения выключателей предвключаемыми резисторами и устройством преднамеренной неодновременной коммутации полюсов (УПНКП)

	Возможность оснащения колонковых и баковых выключателей		**Возможность оснащения выключателей КРУЭ**	
Номинальное напряжение сети, кВ	Предвключаемый резистор	УПНКП	Предвключаемый резистор	УПНКП
220	-	-	нет	до ±1,5
330	да	до ±2	да	до ±1
500	да	до ±2	да	до ±1
750	да	не рекомендуется	-	-
Совместное использование предвключаемого резистора и УПНКП	нет	нет	нет	нет
Получение сигналов напряжения от двух ТН (шинного и линейного)	не применимо	нет	не применимо	да
Увеличение цены, % /тыс. руб. (меньшее значение для выключателей более высокого класса напряжения)	35 / 2400	(30-7) / 600	6 / -	4 / 900

gost.e-ecolog.ru