

Количество элегазовых выключателей, установленных в отечественных сетях номинальным напряжением 110 кВ и выше, неуклонно растет. Такие выключатели применяют как на новых объектах, так и на действующих (при замене масляных выключателей 110–220 кВ и воздушных 110–750 кВ).

Повреждения элегазовых выключателей 500 кВ, которые в последние годы произошли на ряде подстанций России и Казахстана, со всей очевидностью продемонстрировали необходимость срочной разработки нормативных документов, регламентирующих вопросы их применения.

Поскольку НТД по элегазовым выключателям пока не существует, наши петербургские авторы обращают внимание на особенности таких выключателей, которые следует учитывать при их внедрении, а также высказывают свое мнение о предвключаемых резисторах и блоках управляемой коммутации.

Георгий Евдокунин,
д.т.н, профессор кафедры
«Электрические системы и сети»
СПбГПУ,

Михаил Дмитриев,
к.т.н, начальник отдела научно-
технических исследований
ЗАО «ЗЭУ»,

г. Санкт-Петербург

Николай Гринев,
главный инженер ООО «Элвест»,
г. Екатеринбург

ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ 110–750 кВ

Особенности работы при отключении ненагруженных ВЛ с шунтирующими реакторами

Ошибки при неверном выборе и настройке предвключаемых резисторов (ПР) и блоков управляемой коммутации (УК) вызваны тем, что традиционно с типом и конструкцией выключателя связывали уровень перенапряжений как создаваемых данным выключателем, так и нормируемых для данного выключателя. Однако в настоящее время для элегазовых выключателей стали актуальны не только вопросы перенапряжений, но и форма коммутируемого тока [1].

КОММУТИРУЕМЫЕ ТОКИ И АПЕРИОДИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ

В общем случае при включении под напряжение индуктивных элементов (например, реакторов, рис. 1) в токе выключателя появляются две составляющие: периодическая, равная току нормального установившегося режима, и аperiodическая, возникновение которой вызвано невозможностью мгновенного изменения тока реактора от нулевого к значению установившегося режима.

Аperiodическая составляющая характеризуется начальным значением и скоростью затухания. Начальное значение аperiodической составляющей тока зависит от момента замыкания контактов выключателя (например, если включение происходит в момент, когда мгновенное значение сетевого напряжения близко к нулю, то аperiodическая составляющая имеет наибольшее значение, равное амплитуде периодической составляющей тока). Постоянная времени затухания аperiodического тока определяется соотношением активного и индуктивного сопротивлений в цепи его протекания.

Фазные токи шунтирующего реактора 500 кВ мощностью 180 МВАр при его включении под напряжение показаны на рис. 2.

На рис. 2а в нормальном установившемся режиме работы периодическая составляющая фазного тока имеет амплитуду 280 А (уровень напряжения в сети 500 кВ отвечает наибольшему рабочему 525 кВ). На рис. 2б в переходном процессе включения реактора максимальное значение тока фазы А определяется суммой периодической (амплитуда 280 А) и аperiodической (с учетом затухания – чуть менее 280 А) составляющих и в первые моменты достигает 560 А (красная кривая).

Рассмотрим далее процесс включения реактора совместно с ВЛ, к которой он присоединен (рис. 3). Степень компенсации зарядной мощности ВЛ определяется выражением [1, 2]:

$$K = b_{PЭ} / b_1,$$

где $b_{PЭ} = N \cdot b_p$ – эквивалентная индуктивная проводимость N реакторов, присоединенных к ВЛ;

b_1 – емкостная проводимость ВЛ по прямой последовательности.

В схеме рис. 3 ток выключателя ВЛ имеет две составляющих (рис. 4, начальные колебания высокой частоты опускаем):

- периодическая составляющая тока линейного выключателя равна алгебраической сумме емкостного тока ВЛ и индуктивного тока реактора (эта сумма зависит от K);
- аperiodическая составляющая тока, величина которой не зависит от емкостной проводимости ВЛ (или от K), определяется индуктивной проводимостью реакторов линии (их числом и мощностью), а также моментом замыкания контактов линейного выключателя (вблизи от максимального или от нулевого значений).

Например, ВЛ 500 кВ длиной 175 км с одним присоединенным реактором мощностью 180 МВАр имеет полную компенсацию зарядной мощности $K \approx 1$, и периодическая составляющая тока выключателя в установившемся режиме работы отсутствует, а значит ток фазы А определяется только аperiodической составляющей и в первые моменты достигает 280 А.

Скорость затухания аperiodической составляющей зависит от соотношения активного сопротивления и индуктивности цепи. Такое соотношение выше у ВЛ, чем у типовой питающей сети. Поэтому при установке реактора в конце ВЛ затухание аperiodической составляющей тока происходит быстрее, чем при установке реактора в начале ВЛ, но все равно достаточно долго.

Для кривых, показанных на рис. 4, время затухания аperiodической составляющей достигает нескольких секунд, а ток выключателя линии определенное время не имеет нулевых значений, что может вызвать трудности в гашении дуги, если сразу за включением выключателя потребуется его быстрое отключение.

Примеры быстрых циклов включения-отключения, когда в отключаемом токе неповрежденных фаз может быть опасная аperiodическая составляющая, таковы:

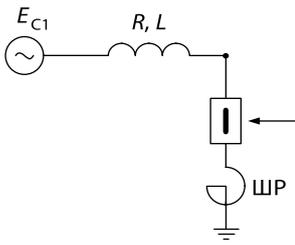
- первичное включение ВЛ и ее отключение из-за ложной работы защиты или из-за наличия на ВЛ короткого замыкания (однофазного, двухфазного на землю, двухфазного без земли);
- включение ВЛ в цикле трехфазного АПВ и ее отключение из-за короткого замыкания (однофазного, двухфазного на землю или двухфазного без земли), не устранившегося на время паузы АПВ.

КОЛОНКОВЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ

В настоящее время в сетях 110–750 кВ наиболее распространенным является элегазовый выключатель колонкового типа (с точки зрения конструктивного исполнения) с автокомпрессионным принципом гашением дуги. Полное время отключения составляет около 40 мс.

Включение реактора под напряжение

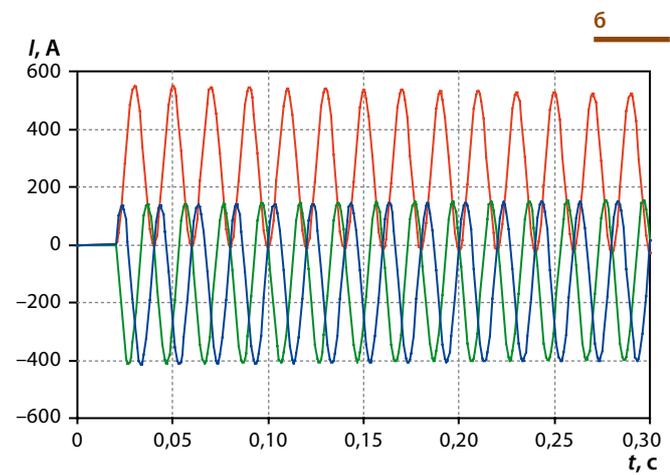
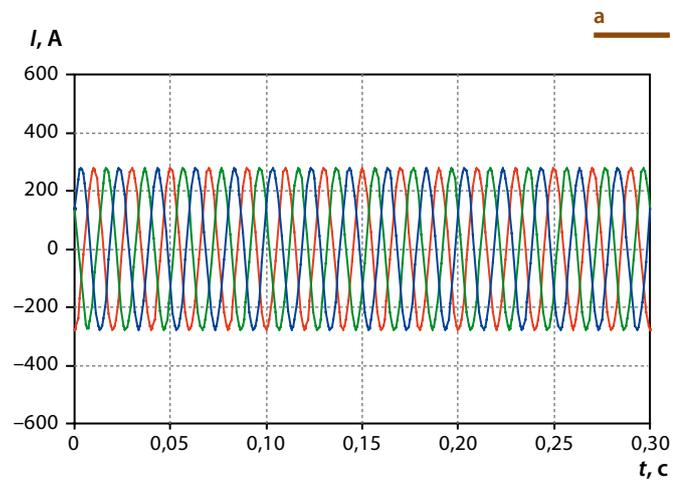
Рис. 1 •



Фазные токи ШР 500 кВ 180 МВАр в схеме рис. 1

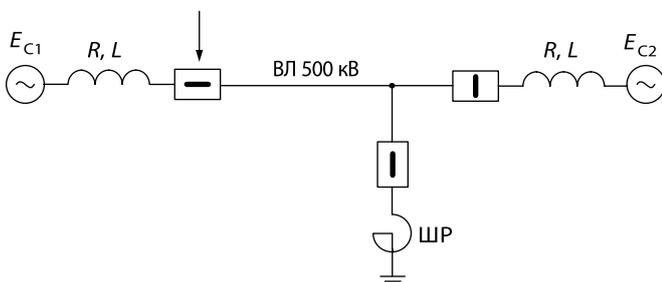
Рис. 2 •

- а) в установившемся режиме работы
 б) в переходном процессе включения реактора в момент времени, когда мгновенное значение напряжения фазы А сети имеет нулевое значение



Включение на холостой ход линии с реактором, установленным в конце ВЛ

Рис. 3 •



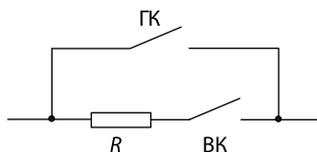
1/2

• **Рис. 4.** Ток фазы А ВЛ 500 кВ различной длины с одним шунтирующим реактором 180 МВАр (схема рис. 3) при включении линии в ноль напряжения фазы А

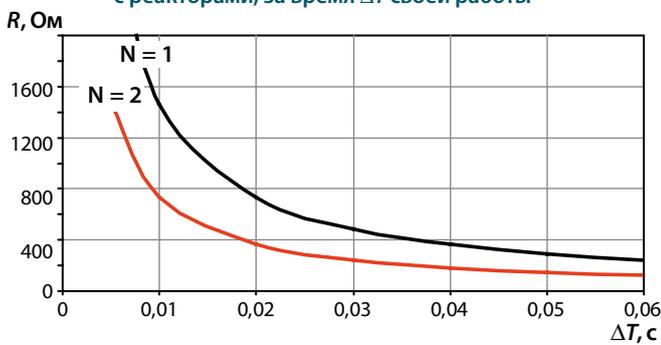


175 км – красная кривая ($K \approx 1$);
220 км – зеленая кривая ($K = 0,8$);
290 км – синяя кривая ($K = 0,6$).

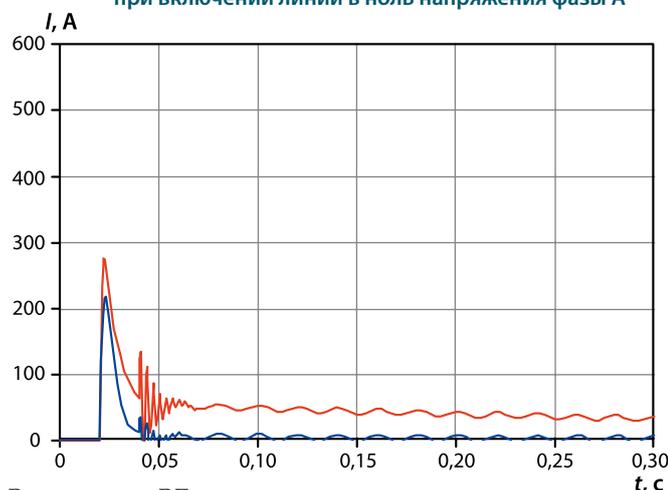
• **Рис. 5.** Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором



• **Рис. 6.** Требования к сопротивлению резистора, обеспечивающему полное затухание аperiodической составляющей тока ВЛ 500 кВ с реакторами, за время ΔT своей работы



• **Рис. 7.** Ток фазы А ВЛ 500 кВ длиной 175 км с одним шунтирующим реактором 180 МВАр (схема рис. 3), при включении линии в ноль напряжения фазы А



Выключатель ВЛ оснащен резистором (ВК замыкаются в 0,02 с, ГК замыкаются в 0,04 с, время работы резистора 0,02 с).
400 Ом – красная кривая; 800 Ом – синяя кривая.

В циклах «включение-отключение» опасность той или иной аperiodической составляющей тока нормального режима должна проверяться в процессе испытаний выключателей на заводах-изготовителях или в независимых лабораториях. В настоящее время таких испытаний, к сожалению, не проводится. Поэтому в качестве первого (грубого) приближения можно считать, что аperiodическая составляющая тока не опасна для выключателя лишь в том случае, когда ток выключателя получит нулевые значения не позднее, чем за интервал времени 80 мс после его включения. Это время получено путем сложения времени ложного или штатного срабатывания устройств РЗА (около 40 мс) и полного времени отключения выключателя (около 40 мс).

Например, пользуясь этим критерием для осциллограмм рис. 4 (они получены в случае, когда реактор присоединен в конце ВЛ), можно сделать вывод, что при $K \geq 0,6$ аperiodическая составляющая опасна для выключателя ВЛ. Если реактор присоединен в начале ВЛ, то аperiodическая составляющая тока затухает медленнее и будет опасна при значениях K меньше 0,6.

Аналогичная ситуация с коммутируемыми токами характерна не только для ВЛ 500 кВ, но и для всех ВЛ 330–750 кВ с присоединенными реакторами.

Для снижения опасности аperiodических токов можно использовать:

- включение ВЛ с предварительно выведенным из работы реактором, подключение которого производить с задержкой в несколько секунд;
- предвключаемые резисторы;
- блоки управляемой коммутации.

Следует отметить, что требования к величине сопротивления ПР и настройке УК заметно отличаются в зависимости от возлагаемой на них задачи – или это борьба с коммутационными перенапряжениями, или же с аperiodическими токами.

ПРЕДВКЛЮЧАЕМЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Предвключаемые резисторы исторически появились задолго до устройств управляемой коммутации и до массового внедрения в сетях ОПН. Основной задачей, которую решали ПР, была борьба с коммутационными перенапряжениями в сетях сверхвысокого напряжения, где запасы прочности изоляции оборудования невелики и оказываются сопоставимы с кратностями коммутационных перенапряжений. Появление в сетях современных ОПН (и управляемой коммутации) решило проблемы коммутационных перенапряжений и позволило уйти от резисторов.

В настоящее время некоторые специалисты вновь предлагают оснащать линейные выключатели ПР, но уже не с точки зрения борьбы с перенапряжениями, а для борьбы с аperiodической составляющей тока.

На рис. 5 показана принципиальная схема выключателя с резистором. Такой выключатель имеет главные контакты (ГК) и вспомогательные контакты (ВК). При включении выключателя вначале замыкаются ВК, вводя в действие резистор, который демпфирует переходные процессы (коммутационные перенапряжения или аperiodические токи), а затем замыкаются ГК, шунтируя резистор. При отключении выключателя резисторы, как правило, не задействуются.

При включении выключателя, оснащенного ПР, переходные процессы возникают дважды: первый раз при замыкании ВК и второй раз – при замыкании ГК. Большое сопротивление даст хорошее демпфирование на первом этапе включения, но зато интенсивными окажутся переходные процессы на втором этапе включения.

Очевидно, выбор сопротивления резистора требует обоснования. Оно проводится по следующим критериям:

- должно обеспечиваться хорошее демпфирование переходных процессов при включении ВК и ГК;
- должна быть допустимой выделяющаяся в резисторе энергия.

Если ПР необходим для борьбы с коммутационными перенапряжениями, то согласно исследованиям [2] его величина должна быть близка волновому сопротивлению линии, т.е. должна быть около 300–400 Ом.

Если ПР используется для борьбы с аperiodической составляющей тока, то его величина должна быть такой, чтобы

за время работы резистора (с момента замыкания ВК до момента замыкания ГК) аperiodическая составляющая затухла.

Аperiodическая составляющая вызвана наличием на линии реакторов. Постоянная времени затухания тока реакторов может быть найдена как:

$$\tau = \frac{L_{PЭ}}{R},$$

где $L_{PЭ} = x_{PЭ} / \omega$, $x_{PЭ} = x_P / N$, $x_P = U_P^2 / Q_P$, U_P – напряжение реакторов, Q_P – мощность реакторов.

Полное затухание аperiodической составляющей произойдет за время 3τ . Рассчитаем величину сопротивления R , которая обеспечит за время своей работы ΔT полное затухание аperiodической составляющей тока реакторов $3\tau \leq \Delta T$:

$$R \geq \frac{3}{\omega \Delta T} \cdot \frac{U_P^2}{NQ_P}.$$

На рис. 6 даны результаты расчетов минимальной величины сопротивления резистора, которая обеспечит затухание аperiodической составляющей тока за время быстрее ΔT . Например, при $\Delta T = 0,02$ с (интервал времени между работой ВК и ГК составляет 20 мс) для ВЛ с одним реактором необходимо сопротивление не менее 700 Ом, а для ВЛ с двумя реакторами – не менее 350–400 Ом.

Для подтверждения на рис. 7 приведены осциллограммы тока ВЛ 500 кВ, полученные в условиях рис. 3 (175 км, один ШР в конце ВЛ). При времени работы $\Delta T = 20$ мс резистор $R = 400$ Ом не дает полного затухания аperiodического тока, тогда как $R = 800$ Ом его обеспечивает.

Если на ВЛ есть два реактора, то выбор резистора должен проводиться с помощью рис. 6 на то число реакторов, при котором аperiodический ток наиболее опасен. Если выключатель имеет несколько последовательных разрывов, каждый из которых оснащен резистором, то требованиям рис. 6 должно отвечать суммарное сопротивление всех последовательно включенных резисторов.

Определенный по рис. 6 резистор должен быть проверен на допустимость нагрузок при коммутациях. Наибольшая энергия выделяется в резисторе при включении выключателя на КЗ, когда все фазное напряжение сети оказывается приложенным к резистору:

$$W = P \cdot \Delta T = \frac{U_P^2}{3R} \cdot \Delta T.$$

На рис. 8 даны расчеты требуемой от резистора способности рассеивать энергию включения на КЗ. Если выключатель имеет несколько последовательных разрывов, каждый из которых оснащен резистором, то требованиям рис. 8 должно отвечать суммарное сопротивление всех резисторов.

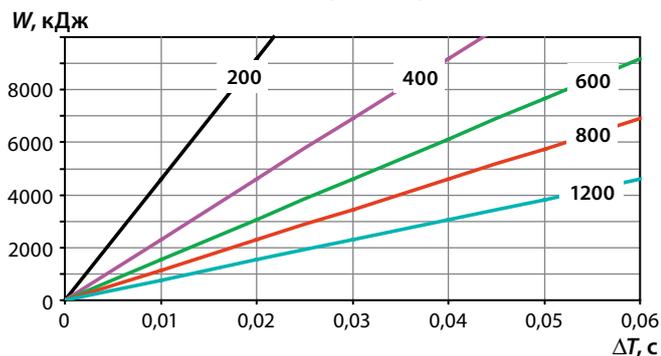
Следует учитывать, что включение выключателя на КЗ может быть многократным за время, которое не достаточно для остывания резистора. Поэтому реальные требования должны быть в 2–3 раза больше тех значений W , которые показаны на рис. 8.

Заводы-изготовители элегазовых выключателей 500 кВ, аттестованных для применения на объектах ОАО «ФСК ЕЭС», подтверждают возможность изготовления выключателей 500 кВ с резисторами сопротивлением $R = 1000 \div 1600$ Ом. Время включения резисторов $\Delta T = 10$ мс. При таком времени, согласно рис. 6, для ВЛ 500 кВ с одним реактором потребуется резистор сопротивлением не менее 1400 Ом, для ВЛ с двумя реакторами – резистор не менее 700 Ом.

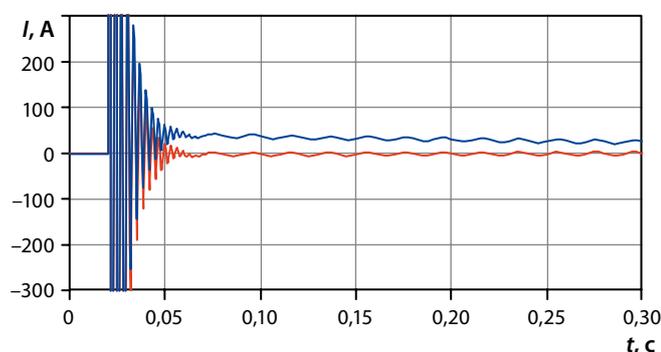
В связи с тем что шунтирование резистора, величина которого в 2–3 раза превосходит волновое сопротивление линии, может вызвать переходный процесс, сопровождаемый появлением новой аperiodической составляющей тока линии, становится необходимым выполнение соответствующих компьютерных расчетов тока. Они показали, что для ВЛ 500 кВ с реакторами мощностью 180 МВА оптимальными будут резисторы: 1200 Ом – для линий с одним реактором; 600 Ом – для линий с двумя реакторами. Видно, что номиналы резисторов в несколько раз превосходят значения, рекомендованные по условиям борьбы с коммутационными перенапряжениями.

Аналогично в результате расчетов можно обосновать оптимальные номиналы резисторов для ВЛ 330 кВ, 750 кВ и других напряжений.

• **Рис. 8.** Требования к способности резистора рассеивать энергию в зависимости от его величины (200, 400, 600, 800, 1200 Ом) и времени работы



• **Рис. 9.** Ток фазы А ВЛ 500 кВ длиной 175 км с одним ШР 180 МВАр при ее включении



Красная кривая – точно в максимум напряжения фазы А; синяя кривая – в 0,5 мс от максимума напряжения фазы А.

УПРАВЛЯЕМАЯ КОММУТАЦИЯ

Переходные процессы при работе выключателей возникают как при их включении, так и при их отключении.

При включении выключателей. Коммутационные перенапряжения могут быть ограничены с использованием блока управляемой коммутации, настроенного на замыкание контактов вблизи от нулевого значения сетевого напряжения («управляемое включение»);

Апериодическая составляющая может быть минимизирована с использованием блока управляемой коммутации, настроенного на замыкание контактов вблизи от максимального значения сетевого напряжения.

При отключении выключателей. Если есть риск повторных пробоев между контактами, коммутационные перенапряжения также могут быть ограничены блоком управляемой коммутации («управляемое отключение»). Блок должен быть настроен таким образом, чтобы момент размыкания контактов был смещен достаточно далеко от нулевого значения тока так, что к моменту перехода тока через ноль и гашению дуги расстояние между контактами было значительным и соответствовало большой прочности промежутка между контактами.

С появлением в сетях современных ОПН основным назначением управляемой коммутации могла бы стать не борьба с коммутационными перенапряжениями, а борьба с апериодическими токами. При этом необходимая точность настройки УК оказывается сильно связана со степенью компенсации зарядной мощности ВЛ:

- если коэффициент компенсации близок к единице, то в токе выключателя почти нет периодической составляющей тока, а значит, при возникновении апериодической составляющей тока суммарный ток долго не будет иметь нулей; в таких случаях точность коммутации должна быть весьма высока;
- чем больше коэффициент компенсации отличается от единицы, тем больше в токе выключателя присутствует периодическая составляющая, соответственно меньшую

опасность представляет возможность появления апериодической, а значит, снижаются требования к точности коммутации.

На рис. 9 проанализирована необходимая точность настройки устройства управляемой коммутации на примере ВЛ 500 кВ длиной 175 км с одним реактором (коэффициент компенсации 1). Видно, что при отклонении момента коммутации всего на 0,5 мс от максимума напряжения ток выключателя имеет апериодическую составляющую около 50 А, что при отсутствии периодической составляющей приведет к негашению дуги (ток не имеет нулевых значений более 80 мс).

В настоящее время точность управляемой коммутации составляет не лучше ± 2 мс, т.е. недостаточно высока. Поэтому технология УК не может использоваться в роли основного мероприятия по снижению апериодической составляющей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сетевым компаниям, использующих элегазовые выключатели в качестве линейных, следует направить производителям выключателей настоятельное предложение произвести конструктивные доработки выключателей, которые позволят коммутировать ненагруженные линии с высокой степенью компенсации емкости этих линий шунтирующими реакторами (возможно с доработкой дугогасительной системы).
2. В технической документации на выключатели должны указываться требования к содержанию апериодической составляющей в суммарном отключаемом токе (здесь речь идет о токе нормального режима): допустимый уровень, допустимая постоянная времени затухания или интервал времени, в течение которого мгновенное значение суммарного тока должно принимать нулевые значения.
3. При установке типовых элегазовых выключателей (без указанной в п. 1 доработки) в проектах следует учитывать особые условия работы этих выключателей на ВЛ с реакторами, связанные с гашением апериодических токов. Особое внимание следует уделять линиям со степенью компенсации зарядной мощности $K > 0,5 \div 0,6$.
4. Для борьбы с апериодической составляющей тока ВЛ с подключенными ШР, если ее опасность подтверждена расчетами, наиболее простым является отказ от коммутации ВЛ совместно с нежелательным числом реакторов [1], если такая возможность также подтверждена соответствующими расчетами.
5. Для борьбы с апериодическими токами возможно оснащение типовых элегазовых выключателей предвключаемыми резисторами, которые должны иметь сопротивление в 2–3 раза больше, чем резисторы для ограничения коммутационных перенапряжений.
6. Для борьбы с апериодическими токами возможно оснащение элегазовых выключателей блоками управляемой коммутации, если в результате расчетов будет доказано, что точность их работы достаточна для конкретной ВЛ. Например, для ВЛ, имеющих практически полную компенсацию зарядной мощности $K \approx 1$, точности существующих на рынке устройств явно недостаточно. Для борьбы с токами блоки должны быть настроены на включение ВЛ вблизи от максимального значения сетевого напряжения, тогда как при необходимости ограничения коммутационных перенапряжений блоки следовало бы настраивать на включение ВЛ вблизи от нулевого значения сетевого напряжения.
7. Для борьбы с коммутационными перенапряжениями оснащение элегазовых выключателей резисторами или блоками управляемой коммутации не требуется, поскольку эту роль выполнят ОПН, хотя определенная необходимость в блоках управляемой коммутации сохраняется при непосредственных коммутациях выключателями ШР 500–750 кВ, вне зависимости от наличия у реакторов ОПН [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. и др. Коммутации высоковольтных ВЛ и воздействия на выключатели // Новости ЭлектроТехники. 2008. № 3(51).
2. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. – СПб: Издательство Сизова М.П., 2004.
3. IEEE Standard C37.015 – 1993 Application Guide for Shunt Reactor Switching.