

В предыдущем номере журнала (см. «Новости ЭлектроТехники» № 4(76) 2012) была опубликована статья об особенностях работы элегазовых выключателей при отключении токов ненагруженных линий 330–750 кВ с присоединенными шунтирующими реакторами, в которой пояснен механизм возникновения апериодической составляющей тока линейных выключателей и даны основные способы ее ограничения. В частности, внимание было обращено на то, что устройства управляемой коммутации в силу неточности своей работы далеко не всегда позволяют защитить элегазовые выключатели.

Новая публикация Михаила Викторовича Дмитриева дает возможность читателям самостоятельно оценить опасность апериодических токов для каждой линии с реакторами, а также проверить эффективность управляемой коммутации в зависимости от точности ее работы. Автор считает, что при имеющейся точности область применения устройств управляемой коммутации недостаточна для повсеместного их использования и на ряде линий придется применять другие способы защиты выключателей.



**Михаил Дмитриев,**  
к.т.н.,  
ЗАО «Завод энергозащитных устройств»,  
г. Санкт-Петербург

## ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ 110–750 кВ

### Методика выбора мероприятий по борьбе с апериодическими токами

В последние годы на ряде подстанций произошла серия повреждений [1] так называемых линейных элегазовых выключателей 500 кВ, то есть тех выключателей, которыми осуществляется коммутация воздушных линий (ВЛ) с присоединенными шунтирующими реакторами (схема рис. 1).

Для снижения опасности апериодических токов можно предложить [2]:

- включение ВЛ с предварительно выведенным из работы реактором, подключение которого производить с задержкой в несколько секунд;
- оснастить выключатели ВЛ предвключаемыми резисторами (ПР);
- оснастить выключатели ВЛ блоками управляемой коммутации (УК).

#### СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКА ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Согласно [1, 2] в схеме рис. 1 в токе выключателя ВЛ присутствуют следующие составляющие (они показаны на рис. 2):

- периодическая составляющая тока реакторов, имеющая амплитуду  $I_{РП}$ ;
- апериодическая составляющая тока реакторов, имеющая начальное максимальное значение  $I_{РА}$  и постоянную времени затухания  $\tau$ ;
- периодическая составляющая тока холостой ВЛ (емкостного тока), которая имеет амплитуду  $I_{ВЛ}$ .

Соотношение  $I_{РП}$  и  $I_{ВЛ}$  соответствует  $K$  – степени компенсации емкостной проводимости ВЛ индуктивной проводимостью реакторов:

$$K = \frac{I_{РП}}{I_{ВЛ}}.$$

Для типовой ВЛ 500 кВ зависимость  $K$  от длины ВЛ и числа реакторов типовой мощности показана на рис. 3.

Пусть в схеме рис. 1 синусоида сетевого напряжения описывается выражением:

$$e(t) = E_m \cdot \cos(\omega t + \psi),$$

где  $E_m$  – амплитуда фазного значения наибольшего рабочего напряжения сети,  $\psi$  – начальная фаза ЭДС (в момент времени  $t = 0$ ),  $\omega = 2\pi f = 314$  рад/с.

В установившемся режиме работы ток реакторов и ток односторонне питаемой ВЛ носят реактивный характер по отношению к сетевому напряжению:

$$i_{РП}(t) = -I_{РП} \cdot \sin(\omega t + \psi),$$

$$i_{ВЛ}(t) = I_{ВЛ} \cdot \sin(\omega t + \psi).$$

#### РАСЧЕТ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА

В переходном процессе включения ВЛ с присоединенными реакторами под сетевое напряжение в токе реакторов (и токе выключателя ВЛ) в общем случае может появляться апериодическая составляющая тока, начальное значение которой будет  $I_{РА} = I_{РП} \cdot \sin\psi$ , а ее изменение во времени с учетом затухания будет описываться выражением:

$$i_{РА}(t) = I_{РА} \cdot \exp(-t/\tau) = (I_{РП} \cdot \sin\psi) \cdot \exp(-t/\tau)$$

В момент включения линии  $t=0$  напряжение сети будет  $e(0) = E_m \cdot \cos\psi$ , где  $\psi$  – угол (рад), при котором происходит включение.

При  $\psi = \pi/2$  имеем  $e(0)=0$ , т.е. включение ВЛ пришлось на нулевое значение сетевого напряжения и, следовательно, начальное значение апериодического тока реакторов будет наибольшим, равным амплитуде периодической составляющей тока реакторов:  $I_{РА} = I_{РП} \cdot \sin\psi = I_{РП}$ .

При  $\psi=0$  имеем  $e(0)=E_m$ , т.е. включение ВЛ пришлось на максимум напряжения сети и, следовательно, апериодический ток отсутствует:  $I_{РА} = I_{РП} \cdot \sin\psi = 0$ .

Для борьбы с апериодическими токами блоки УК настраиваются на включение ВЛ вблизи от максимального значения сетевого напряжения  $\psi = 0$ . С учетом возможной неточности работы УК реально включение ВЛ происходит не при  $\psi = 0$ , а с некоторой ошибкой  $\psi = \pm\Delta\psi$ . При этом мгновенное значение сетевого напряжения будет:

$$e(0) = E_m \cdot \cos\psi = E_m \cdot \cos(\pm\Delta\psi).$$

Начальное значение апериодического тока, следовательно:

$$I_{РА} = I_{РП} \cdot \sin(\pm\Delta\psi) = \pm I_{РП} \cdot \sin\Delta\psi,$$

изменение апериодического тока во времени:

$$i_{РА}(t) = \pm (I_{РП} \cdot \sin\Delta\psi) \cdot \exp(-t/\tau).$$

#### Без учета затухания

Затухание дуги тока наиболее вероятно в моменты минимальных значений суммарного тока выключателя ВЛ, которых согласно рис. 2 может быть два:

$$I_{\min 1} = I_{РА} + I_{РП} - I_{ВЛ},$$

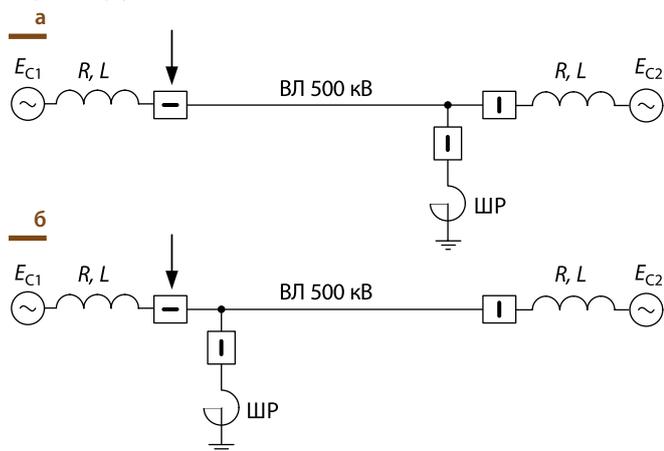
$$I_{\min 2} = I_{РА} - I_{РП} + I_{ВЛ}.$$

В эти моменты желательно, чтобы суммарный ток выключателя ВЛ менял знак. Так как на рис. 2 апериодическая составляющая принята положительной полярности, то условием успешной работы выключателя можно считать  $I_{\min 1} \leq 0$  или  $I_{\min 2} \leq 0$ , откуда:

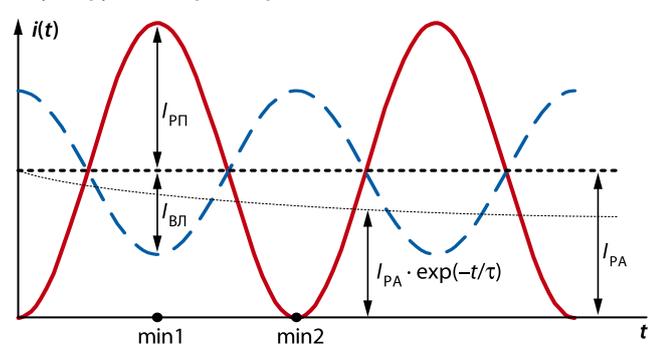
$$I_{РА} + I_{РП} - I_{ВЛ} \leq 0,$$

$$I_{РА} - I_{РП} + I_{ВЛ} \leq 0.$$

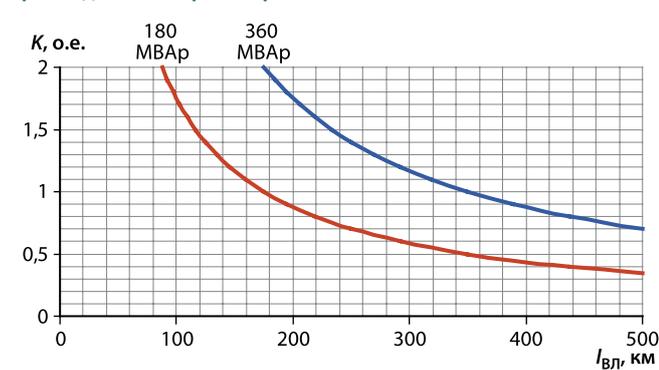
**Включение на холостой ход линии с реактором:**  
 а) реактор установлен в конце ВЛ;  
 б) реактор установлен в начале ВЛ



**Составляющие тока выключателя ВЛ с шунтирующими реакторами**



**Коэффициент компенсации в зависимости от длины ВЛ 500 кВ типовой конструкции и мощности присоединенных реакторов**



Рассмотрим, например, первое условие:

$$I_{PP} \cdot \sin\Delta\psi + I_{PP} - \frac{I_{PP}}{K} \leq 0,$$

$$K \leq \frac{1}{1 + \sin\Delta\psi}.$$

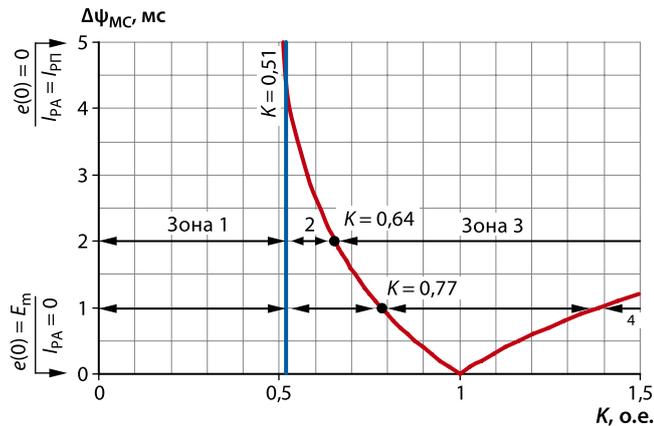
Аналогично из второго условия найдем:

$$K \geq \frac{1}{1 - \sin\Delta\psi}.$$

Поскольку  $0 \leq K < \infty$ , то окончательно имеем следующие условия:

$$\begin{cases} 0 \leq K \leq \frac{1}{1 + \sin\Delta\psi} \\ \frac{1}{1 - \sin\Delta\psi} \leq K < \infty \end{cases}$$

• **Рис. 4.** Область применения различных мероприятий по борьбе с аperiodическими токами в случае, когда реактор установлен в начале ВЛ



#### ► С учетом затухания

Если после включения ВЛ с реакторами под сетевое напряжение возникнет необходимость ее отключения и интервал времени между включением ВЛ и попыткой гашения дуги составит  $T_B$ , то при выводе условий гашения дуги необходимо использовать не начальное значение аperiodической составляющей  $I_{PA}$ , а значение с учетом затухания:  $I_{PA} \cdot \exp(-T_B/\tau)$ . Тогда найденные ранее условия могут быть приведены к виду:

$$\begin{cases} 0 \leq K \leq \frac{1}{1 + \exp(-T_B/\tau) \cdot \sin \Delta\psi} \\ \frac{1}{1 - \exp(-T_B/\tau) \cdot \sin \Delta\psi} \leq K < \infty \end{cases}$$

Активное сопротивление сетевой обмотки реактора 500 кВ, управляемого или неуправляемого, составляет  $R_p = 3$  Ом, а индуктивное сопротивление под номинальной нагрузкой составляет  $X_p = 1531$  Ом. Постоянная времени реактора может быть оценена как  $\tau_p = L_p/R_p = X_p/(\omega R_p) \approx 1,6$  с. Контур, в котором проходит аperiodический ток реактора, включает в себя не только реактор, но и воздушную линию (если реактор установлен в ее конце), а также эквивалент питающей сети. В результате их учета постоянная времени  $\tau$  затухания аperiodического тока будет меньше таковой для реактора:  $\tau < \tau_p$ . Для определенности возьмем  $\tau = \tau_p = 1,6$  с.

Минимальный интервал времени между включением ВЛ и ее отключением (окончанием воздействия на дугу, то есть последней возможностью ее успешного гашения) составляет около  $T_B = 0,08$  с, как это показано в [2].

Учитывая изложенное, затухание аperiodического тока за 80 мс можно оценить как  $\exp(-T_B/\tau) = \exp(-0,08/1,6) \approx 0,95$ , и, следовательно, найденные ранее условия будут:

$$\begin{cases} 0 \leq K \leq \frac{1}{1 + 0,95 \cdot \sin \Delta\psi} \\ \frac{1}{1 - 0,95 \cdot \sin \Delta\psi} \leq K < \infty \end{cases}$$

При установке реактора в конце ВЛ затухание аperiodических токов будет сильнее, а значит, область опасных значений коэффициентов  $K$  будет меньше.

#### ТОЧНОСТЬ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ

Указанные условия могут быть использованы для построения зависимости  $\Delta\psi = f(K)$  (рис. 4) требуемой точности управляемой коммутации в функции от коэффициента компенсации зарядной мощности ВЛ.

Такая зависимость позволит определить область применения устройств управляемой коммутации ВЛ с учетом имеющейся в настоящее время точности их работы: при каких  $K$  управляемая коммутация решит проблему аperiodических токов, а при каких  $K$  ее действия будет для этого недостаточно.

Точность работы управляемой коммутации, как правило, указывается не в радианах, а в миллисекундах. Тогда перед

использованием условий следует провести пересчет из миллисекунд в радианы по следующей формуле:

$$\Delta\psi = \Delta\psi_{МС} \cdot \frac{\pi}{10 \text{ МС}}$$

В настоящее время производители устройств управляемой коммутации заявляют точность  $\Delta\psi_{МС} = 2$  мс, существенно реже  $\Delta\psi_{МС} = 1$  мс. Поэтому в случае применения УК будем ориентироваться на точность  $\Delta\psi_{МС} = 2$  мс. Случаю же отсутствия управляемой коммутации соответствует «точность»  $\Delta\psi_{МС} = 5$  мс.

На рис. 4 можно выделить четыре характерные зоны.

**Зона 1.** При  $0 \leq K < 0,51$  аperiodические токи не представляют опасности при любом  $\Delta\psi_{МС}$ , то есть вне зависимости от момента включения ВЛ под сетевое напряжение. Мероприятия по борьбе с аperiodическими токами не требуются.

**Зона 2.** При  $K \geq 0,51$  найденные ранее условия не выполняются, то есть существует опасность отказа от гашения дуги и необходимы мероприятия по борьбе. Если в качестве таких мероприятий рассматривать управляемую коммутацию, то эффект от ее использования существенно зависит от точности  $\Delta\psi_{МС}$  ее работы:

- при  $\Delta\psi_{МС} = 2$  мс управляемую коммутацию целесообразно применять в очень узком диапазоне:  $0,51 \leq K \leq 0,64$ ; при  $K > 0,64$  точности уже не хватает;
- при  $\Delta\psi_{МС} = 1$  мс диапазон несколько шире:  $0,51 \leq K \leq 0,77$ .

**Зона 3.** При любом значении  $\Delta\psi_{МС}$  (кроме недостижимого на практике  $\Delta\psi_{МС} = 0$ ) точности управляемой коммутации заведомо не хватает, и поэтому ее использование бесполезно. Требуется применение предвключаемых резисторов или же коммутация ВЛ без опасного числа реакторов.

**Зона 4.** На подавляющем числе ВЛ имеет место  $K \leq 0,8$ , значения  $K \leq 1,5$  уже крайне редки. Именно  $K = 1,5$  было выбрано в качестве наибольшего для рис. 4. Видно, что для  $1 \leq K \leq 1,5$  управляемая коммутация при  $\Delta\psi_{МС} = 2$  мс (и даже при  $\Delta\psi_{МС} = 1$  мс) не может решить проблему аperiodических токов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье дана упрощенная методика выбора оптимальных средств защиты линейного выключателя от аperiodических токов. Указанная методика дополняет общие выводы по проблеме аperiodических токов, сделанные в [2].

На примере типовой ВЛ 500 кВ с обычными неуправляемыми реакторами в статье получены следующие предварительные рекомендации по выбору способов борьбы с аperiodическими токами:

- при  $0 \leq K < 0,51$  мероприятия по борьбе не требуются;
- при  $0,51 \leq K \leq 0,64$  требуются мероприятия, в качестве которых рекомендуется управляемая коммутация с точностью не хуже  $\Delta\psi_{МС} = 2$  мс (если точность не хуже  $\Delta\psi_{МС} = 1$  мс, то  $0,51 \leq K \leq 0,77$ );
- при  $K > 0,64$  ( $K > 0,77$ ) в качестве мероприятий требуются или предвключаемые резисторы с параметрами [2], или коммутация ВЛ без опасного числа реакторов.

Выводы получены для случая установки реактора в начале коммутируемой ВЛ без учета сопротивления сети. При установке реактора (реакторов) в конце ВЛ и при учете сопротивления сети область эффективной работы управляемой коммутации будет несколько шире.

Возможности компьютерного моделирования позволяют проводить расчеты переходных процессов включения каждой конкретной ВЛ с учетом ее особенностей, числа и мест установки реакторов, параметров примыкающих к линии систем. Такие подробные расчеты совместно с применением представленной в статье упрощенной методики позволят иметь больше уверенности в оптимальности применяемых на ВЛ технических решений по защите выключателей.

#### 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., Дмитриев М.В., Гринев Н.В. Аperiodические токи ВЛ 500–750 кВ с шунтирующими реакторами // *Новости ЭлектроТехники*. 2012. № 2(76). ■