

В предыдущем номере журнала (см. «Новости ЭлектроТехники» № 4(76) 2012) была опубликована статья про особенности 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 τ ;
- 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, ψ – 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 ψ – 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

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

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

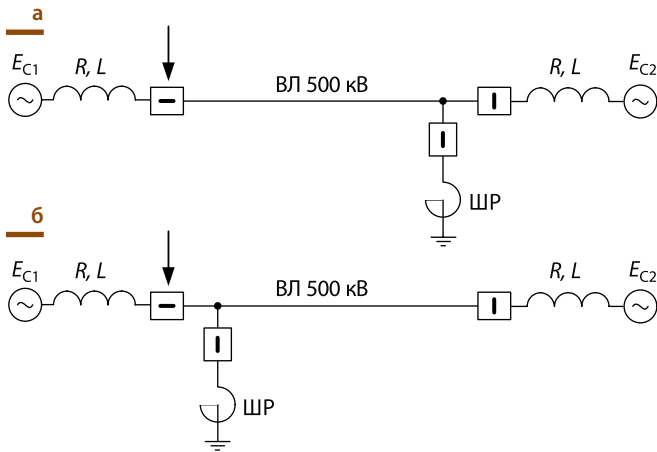
$$I_{\min 2} = I_{РА} - I_{РП} + I_{ВЛ}.$$

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:

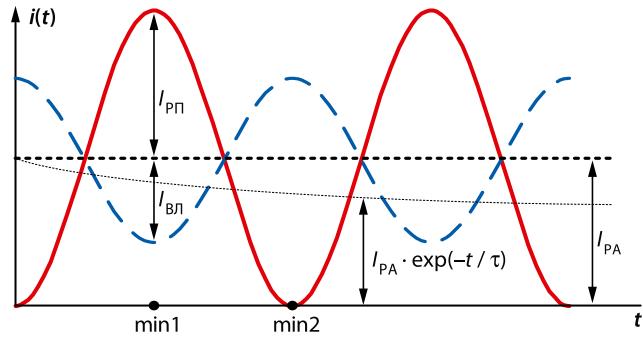
$$I_{РА} + I_{РП} - I_{ВЛ} \leq 0,$$

$$I_{РА} - I_{РП} + I_{ВЛ} \leq 0.$$

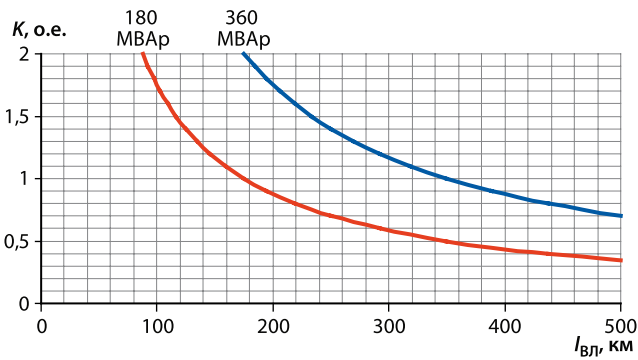
Включение на холостой ход линии с реактором:
 а) реактор установлен в конце ВЛ;
 б) реактор установлен в начале ВЛ. **Рис. 1**



Составляющие тока выключателя ВЛ с шунтирующими реакторами **Рис. 2**



Коэффициент компенсации в зависимости от длины ВЛ 500 кВ типовой конструкции и мощности присоединенных реакторов **Рис. 3**



Рассмотрим, например, первое условие:

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

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

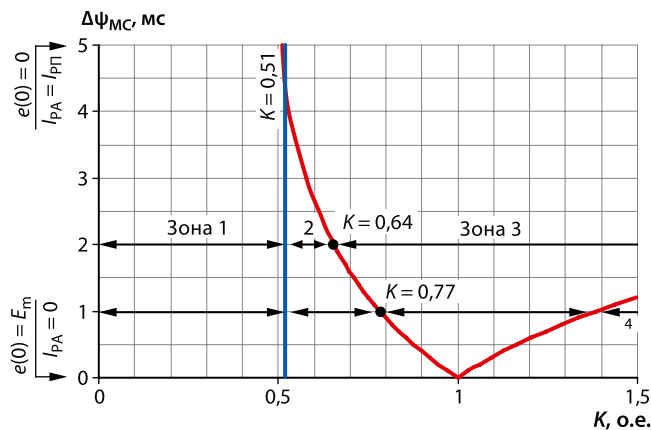
Аналогично из второго условия найдем:

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

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 борьбы с апериодическими 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 апериодической составляющей $I_{РА}$, а значение с учетом затухания $I_{РА} \cdot \exp(-T_B / \tau)$. Тогда найденные ранее условия могут быть скорректированы 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 апериодический 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 τ затухания апериодического 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 апериодического 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 апериодических 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 апериодических 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 характерных зоны.

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

Зона 2. При $K \geq 0,51$ найденные ранее условия не выполняются, то есть существует опасность отказа 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 заводом 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 апериодических токов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье дана упрощенная методика выбора оптимальных средств защиты линейного выключателя от апериодических токов. Указанная методика дополняет общие выводы по проблеме апериодических 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 апериодическими токами:

- при $0 \leq K < 0,51$ мероприятия борьбы 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. Апериодические токи ВЛ 500–750 кВ с шунтирующими реакторами // Новости ЭлектроТехники. 2012. № 2(76).