

Аварийные отказы элегазовых выключателей при коммутациях компенсированных ВЛ 500–1150 кВ

НАУМКИН И.Е.

Представлены теоретические и экспериментальные результаты исследования причин аварий линейных элегазовых выключателей при коммутациях компенсированных ВЛ 500–1150 кВ. Сформулированы рекомендации по предотвращению аварий из-за длительного неотключения полюсом элегазового выключателя не переходящего через нуль тока вследствие наличия в нем большой аperiodической составляющей.

Ключевые слова: компенсированные ВЛ, элегазовый выключатель, составляющие тока, дуга отключения

В настоящее время воздушные и масляные выключатели в сетях 500–750 кВ заменяются на новые элегазовые выключатели. Преимуществом элегазовых выключателей является значительное сокращение эксплуатационных затрат, повышенный ресурс работы, долгий срок службы. Однако вместе с положительными качествами новых выключателей энергосистемы приобрели и новые заботы.

В 2007–2011 гг. в энергосистемах России и Казахстана произошел ряд аварий с разрушением элегазовых линейных выключателей 500–750 кВ:

- в 2006 г. и 2007 г. – ПС 1150 кВ Кокшетауская;
- в 2007 г. – ПС 1150 кВ Алтай;
- в 2009 г. – ПС 500 кВ Агадырь;
- в 2011 г. – ПС 750 кВ Новобрянская.

The theoretical and experimental results obtained from investigations of factors caused failures of line SF6 circuit breakers occurred in switching compensated 500–1150 kV overhead power lines are presented. Recommendations are suggested for preventing failures caused by the inability of the SF6 circuit breaker pole to interrupt current that does not cross zero for a long period of time due to the presence of large aperiodic component in it.

Key words: compensated overhead power lines, SF6 circuit breaker, current components, interruption arc

Аналогичные аварии наблюдались в энергосистеме Кыргызстана.

Выполненный службами РЗиА энергосистем анализ аварийных осциллограмм (см. рис. 1 – пример осциллограммы, записанной на ПС 1150 кВ Алтай при ТАПВ ВЛ 1150 кВ «Итатская–Алтай») показал, что причиной аварий являлось длительное неотключение полюсом элегазового выключателя не переходящего через нуль тока из-за наличия в нем большой аperiodической составляющей.

Длительное горение дуги в межконтактном промежутке элегазового выключателя приводит к прогоранию контактов, перегреву дугогасящего газа и экстремальному повышению давления в камере. При отсутствии клапана сброса давления происходит взрывное разрушение полюса выключателя с

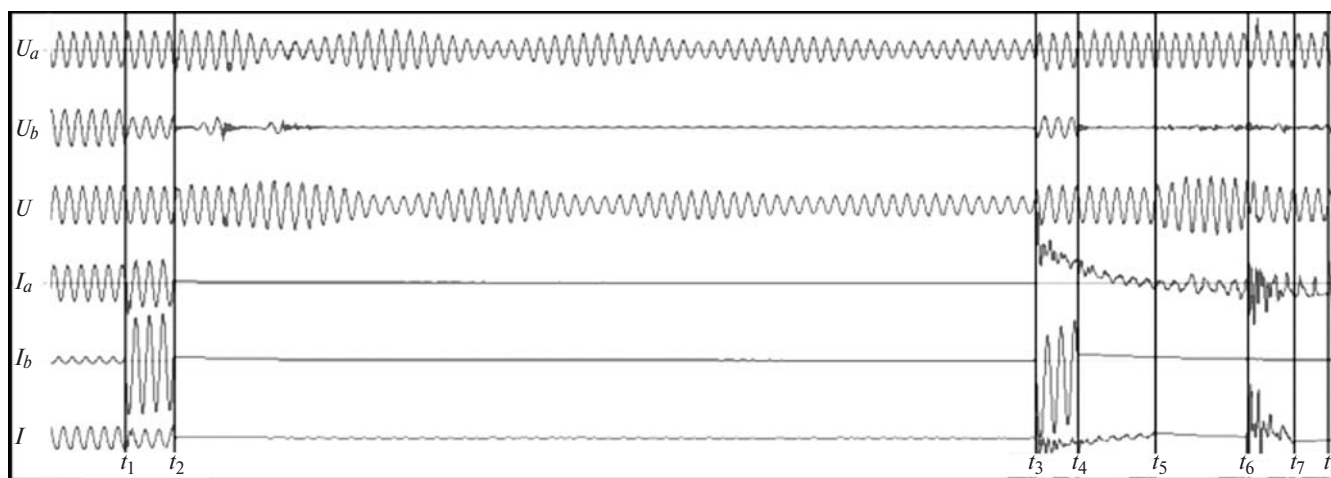


Рис. 1. Осциллограммы фазных напряжений и токов при аварии на ПС 1150 кВ Алтай во время цикла ТАПВ: t_1 – КЗ в фазе B; t_2 – трехфазное отключение ВЛ; t_3 – опробование напряжением (включение трех фаз); t_4 – повторное отключение из-за неустранимого КЗ в фазе B; t_5 – отключение затянувшегося процесса дугогашения в фазе C; t_6 и t_7 – повторное зажигание и гашение дуги в фазе C; t_3 – t_8 и далее – горение дуги в фазе A

повреждением окружающего электротехнического оборудования.

Численный и аналитический анализ казахстанских аварий был проведен в ABB Power Technologies и в Санкт-Петербурге [1], российских аварий – в Филиале ОАО «НТЦ электроэнергетики» – СибНИИЭ автором статьи.

Причины, по которым отключение именно элегазовых выключателей приводит к авариям, а отключение воздушных выключателей в тех же условиях происходит безаварийно, могут быть сформулированы в виде следующих двух гипотез. Первая – сам элегазовый выключатель создает аварийную ситуацию в сети из-за особенностей процесса включения; вторая – элегазовый выключатель не справляется с аварийной ситуацией в сети из-за особенностей процесса отключения.

Только теоретическими исследованиями гипотезы эти не проверить, поэтому были проведены натурные эксперименты, результаты которых приведены в статье.

Появление аperiodических составляющих в токах отключения. Рассмотрим ВЛ 500–1150 кВ с установленными на линии шунтирующими реакторами (ШР). Степень компенсации емкостной проводимости ВЛ с помощью шунтирующих реакторов определяется выражением [2]:

$$K_p = b_{LШРΣ} / b_{СВЛ}, \tag{1}$$

где $b_{LШРΣ} = N_p b_{LШР}$ – суммарная фазная проводимость N_p реакторов, присоединенных к ВЛ; $b_{СВЛ}$ – суммарная емкостная проводимость фазы ВЛ, определяемая с достаточной точностью емкостной проводимостью ВЛ прямой последовательности $b_{СВЛ} = b_1^0 l_{ВЛ}$; b_1^0 – емкостная проводимость ВЛ (на единицу длины) по прямой последовательности; $l_{ВЛ}$ – длина ВЛ (при степени компенсации, близкой к единице, ВЛ находится в резонансном режиме).

На рис. 2,а представлена однолинейная электрическая схема электропередачи, отключенная от источника питания с одного конца, а на рис. 2,б – ее однофазная схема замещения с использованием элементов с сосредоточенными параметрами. В схеме замещения не учитывается индуктивность линии, а активные сопротивления в ветвях ШР и ВЛ учитываются прибавлением их к сопротивлению R . Такая идеализация схемы позволяет качественно представить картину на основе простого аналитического решения.

Установившийся ток при включении LRC-контура на синусоидальное напряжение $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$ можно представить выражением:

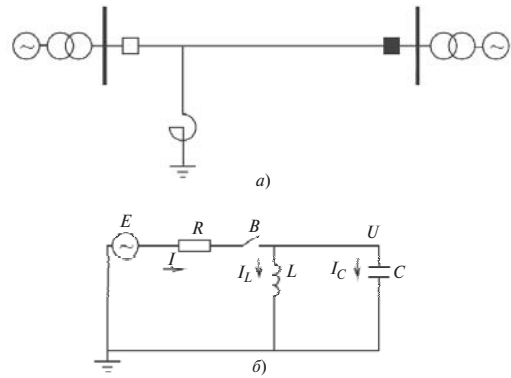


Рис. 2. Электрическая схема ВЛ с линейным ШР: а – однолинейная схема; б – однофазная схема замещения

$$i_{уст} = \left(\frac{X_L}{X_C} - 1 \right) \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \psi + \varphi), \tag{2}$$

где $\varphi = \arctg \frac{X_L}{R(X_L / X_C - 1)}$; $Z = \sqrt{R^2 \left(\frac{X_L}{X_C - 1} \right)^2 + X_L^2}$;

$$X_L = \omega L; \quad X_C = 1 / \omega C.$$

Свободная составляющая тока через выключатель при выполнении начальных условий $i_L|_{t=0} = 0$; $i_C|_{t=0} = 0$ определяется выражением:

$$i_{св} = -\frac{E_m}{Z} \sin(\psi + \varphi) \frac{1}{p_1^2 - p_2^2} \left[(1 + \tau_L \tau_C p_1^2)(p_2^2 + \omega^2) \times \right. \\ \left. \times e^{p_1 t} - (1 + \tau_L \tau_C p_2^2)(p_1^2 + \omega^2) e^{p_2 t} \right], \tag{3}$$

где $p_1 = -\frac{1}{2\tau_C} \left(1 - \sqrt{1 - 4\frac{\tau_C}{\tau_L}} \right)$; $p_2 = -\frac{1}{2\tau_C} \left(1 + \sqrt{1 - 4\frac{\tau_C}{\tau_L}} \right)$;

$$\tau_L = L / R; \quad \tau_C = RC.$$

Значения p_1 и p_2 – действительные при $\tau_C / \tau_L < 1/4$. Для реального сочетания параметров ВЛ 500–1150 кВ с реакторами выполняется более сильное условие $\tau_C / \tau_L \ll 1$. При этом условии $p_1 \approx -1/\tau_L$, $p_2 \approx -1/\tau_C$.

Выражение (3) в этом случае существенно упрощается:

$$i_{св} = -\frac{E_m}{Z} \sin(\psi + \varphi) \left[\frac{X_L}{X_C} e^{-\frac{t}{\tau_C}} - \left(1 + \frac{X_L \tau_C}{X_C \tau_L} \right) e^{-\frac{t}{\tau_L}} \right]. \tag{3а}$$

Рассмотрим два случая включения выключателя: первый – при $\psi = 0$, второй – при $\psi = \pi/2$.

При $\psi = 0$ ток через выключатель

$$i = \left(\frac{X_L}{X_C} - 1 \right) \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \varphi) - \frac{E_m \sin \varphi}{Z} \times \\ \times \left[\frac{X_L}{X_C} e^{-\frac{t}{\tau_C}} - \left(1 + \frac{X_L \tau_C}{X_C \tau_L} \right) e^{-\frac{t}{\tau_L}} \right]. \tag{4}$$

При $t > 3\tau_C$ ток через выключатель будет определяться установившимся током

$$i_{уст} = \left(\frac{X_L}{X_C} - 1 \right) \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2a)$$

и свободной составляющей, определяемой только постоянной времени τ_L :

$$i_{св} = \frac{E_m}{Z} \sin \varphi \left(1 + \frac{X_L \tau_C}{X_C \tau_L} \right) e^{-\frac{t}{\tau_L}} \approx \frac{E_m X_L}{Z^2} e^{-\frac{t}{\tau_L}}. \quad (3b)$$

Значение X_L / Z в условиях, близких к резонансу, может значительно превышать значение $X_L / X_C - 1$, поскольку $X_L / Z \sim 1$, а при $X_L \rightarrow X_C$ значение $(X_L / X_C - 1)$ стремится к нулю. Следовательно, апериодическая составляющая в токе через выключатель может значительно превосходить амплитуду установившегося тока и ток длительное время не будет переходить через нуль. Из (2a), (3b) можно определить, что время, при котором свободная составляющая тока становится равной амплитуде установившегося тока, равно

$$t_1 \approx \tau_L \ln \frac{X_L / Z}{X_L / X_C - 1} \quad (5)$$

и значение t_1 может быть достаточно большим. Таким образом, видно, что при включении в фазу напряжения $\psi = 0$ в переходном токе через выключатель появляется апериодическая составляющая, которая может превышать амплитуду установившегося тока и тем самым затягивать время перехода тока через нуль.

При $\psi = \pi/2$ ток через выключатель

$$i = \left(\frac{X_L}{X_C} - 1 \right) \frac{E_m}{Z} \cos(\omega t + \varphi) - \frac{E_m}{Z} \cos \varphi \times \left[\frac{X_L}{X_C} e^{-\frac{t}{\tau_C}} - \left(1 + \frac{X_L \tau_C}{X_C \tau_L} \right) e^{-\frac{t}{\tau_L}} \right]. \quad (4a)$$

Соответственно, при $t > 3\tau_C$ ток через выключатель будет определяться установившимся током

$$i_{уст} = \left(\frac{X_L}{X_C} - 1 \right) \frac{E_m}{Z} \cos(\omega t + \varphi) \quad (2b)$$

и свободной составляющей, определяемой только постоянной времени τ_L :

$$i_{св} = \frac{E_m}{Z} \cos \varphi \left(1 + \frac{X_L \tau_C}{X_C \tau_L} \right) e^{-\frac{t}{\tau_L}} \approx \left(\frac{X_L}{X_C} - 1 \right) \frac{E_m R}{Z^2} e^{-\frac{t}{\tau_L}}. \quad (3в)$$

Поскольку $R \ll Z$, то из (2b) и (3в) видно, что апериодическая составляющая в любом случае мала по сравнению с амплитудой установившегося тока и проблемы с затягиванием времени перехода тока через ноль в рассмотренном случае не возникает.

Графики рис. 3 иллюстрируют приведенное с использованием параметров, типичных для электропередачи 500 кВ.

Параметры схемы: $E_m = 428,7$ кВ; $R = 25$ Ом; $X_L = 765$ Ом; $X_C = 663$ Ом (ВЛ 500 кВ длиной 400 км с подключенными 2 ШР); $\tau_L = 97,5$ мс, $\tau_C = 0,12$ мс. Расчет по формуле (5) дает $t_1 \approx 0,185$ с, что со-

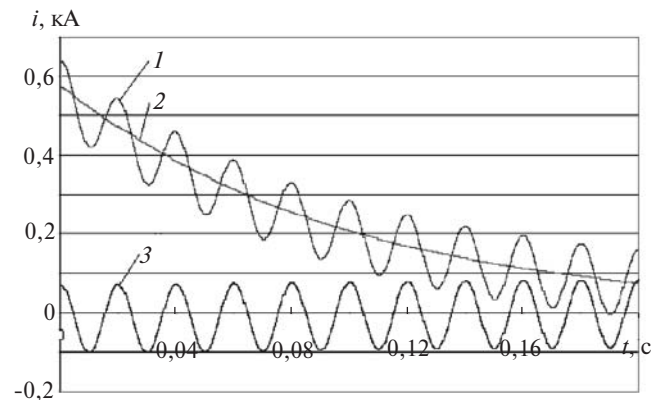


Рис. 3. Ток через выключатель при включении: 1 – при $\psi = 0$; 2 – апериодическая составляющая при $\psi = 0$; 3 – при $\psi = \pi/2$

ответствует графику, представленному на рис. 3.

Таким образом, если за коммутацией включения при $\psi = 0$ последует команда на отключение, то выключатель будет отключать переходной ток с большой апериодической составляющей.

Отличие элегазовых выключателей от воздушных. В создании аварийной ситуации важными являются следующие моменты.

1. Вынужденный ток должен быть малым в сравнении с апериодической составляющей, тогда суммарный ток длительное время не переходит через нуль. Вынужденный ток через выключатель будет малым при включении холостой ВЛ, особенно в условиях, когда степень компенсации емкостной проводимости ВЛ будет близка к единице. Такое неравенство составляющих токов будет наблюдаться только в «здоровых» фазах. В фазе с КЗ вынужденный ток сравним с апериодической составляющей, следовательно ток в аварийной фазе будет переходить через нуль без задержки.

2. Отключение выключателя должно следовать сразу за коммутацией включения холостой линии. Такая ситуация в реальных условиях возникает при постановке ВЛ под напряжение, когда на линии имеется одно- или двухфазное КЗ. При неуспеш-

ном ТАПВ в случае одно- или двухфазных КЗ следом за опробованием ВЛ напряжением также следует команда на трехфазное отключение. Если в рассматриваемых случаях включение здоровой фазы произошло вблизи нуля напряжения источника питания, то возникает аварийная ситуация.

Итак, для процесса аварийного отключения элегазовым выключателем необходимо:

отключение трех фаз ВЛ с реакторами с односторонним питанием, когда степень компенсации емкостной проводимости ВЛ близка к единице;

наличие среди отключаемых фаз ВЛ хотя бы одной здоровой фазы (без КЗ);

отключение сразу после включения холостой ВЛ с реакторами;

включение здоровых(ой) фаз(ы) вблизи нуля напряжения источника питания.

Эти условия возникают в процессе эксплуатации и проявляются в авариях с элегазовыми выключателями. Почему воздушные выключатели справлялись с такими ситуациями? Разницу в работе выключателей можно объяснить отличием в физических процессах включения и отключения.

Что касается процесса включения, то для воздушных выключателей принимается следующее допущение: вероятность их включения около максимума напряжения (т.е. при $\psi = \pi/2$) близка к единице. Физически это объяснимо – при движении контактов навстречу друг другу замыкание контактов осуществляется вследствие пробоя воздушного межконтактного промежутка. Такой пробой наиболее вероятен вблизи максимума напряжения. Поскольку в этих условиях апериодическая составляющая тока через выключатель незначительна, то и проблем при последующем отключении у воздушного выключателя не возникает.

Сформулируем следующее предположение: элегазовые выключатели могут сами способствовать возникновению аварийной ситуации из-за того, что в отличие от воздушных выключателей межконтактный промежуток в них может замыкаться и вблизи нуля напряжения (то есть при $\psi = 0$). Тому причиной являются лучшие по сравнению с воздухом электроизоляционные свойства элегаза. При движении контактов элегаз не пробивается до сближения их на незначительные расстояния, которые могут преодолеваются за время, меньшее четверти периода промышленной частоты, т.е. за время, когда напряжение не успевает достичь своего амплитудного значения. Замыкание контактов происходит равновероятно при любых значениях напряжения, в том числе и при значениях, близких к нулю. В этих условиях, как было показано, и появ-

ляется большая апериодическая составляющая в отключаемом токе, приводящая к аварии.

Другой причиной, объясняющей отличие в поведении воздушного и элегазового выключателя, может быть разница в физическом процессе отключения. Современные элегазовые выключатели имеют замкнутый объем дугогасительной камеры, в которой интенсивность гашения дуги во многом зависит от энергии дуги, определяемой током отключения. При рассматриваемом повторном отключении токов в здоровых фазах их значение невелико, особенно вблизи резонансных режимов. Элегазовый выключатель не может отключить такие токи, пока они не перейдут через нуль. Такое действие выключателя оценивается как положительное при отключении малых индуктивных токов, поскольку при этом перенапряжения получаются минимальными. Однако в данном конкретном случае эти положительные свойства представляются негативными, так как могут приводить к аварийным ситуациям. Воздушный выключатель, обладая запасом воздуха под постоянным давлением, гасит дугу отключения с интенсивностью, не зависящей от силы тока, в том числе и со срезом тока, т.е. не дожидаясь, когда ток перейдет через нуль. Более быстрому гашению дуги в воздушном выключателе может также способствовать более быстрое затухание апериодической составляющей тока, поскольку к активному сопротивлению цепи добавляется значительное сопротивление дуги гашения, резко возрастающее при интенсификации гашения.

В совокупности это приводит к тому, что для воздушных выключателей не существует проблемы отключения токов в здоровых фазах при неуспешных включениях холостых ВЛ под напряжение и осуществлении циклов ТАПВ.

Результаты натурных экспериментов. В сентябре 2011 г. силами ООО «Болид» (Новосибирск) в энергосистеме Казахстана (АО «KEGOC») были проведены натурные эксперименты с осциллографированием переходных электромагнитных процессов при коммутациях ВЛ и ШР. На ПС 1150 кВ Кокшетауская и ПС 500 кВ Агадырь проведены коммутации линейных воздушных и элегазовых выключателей, а также элегазовых выключателей в цепи шунтирующих реакторов. Проводились включения и отключения холостых ВЛ: Л-1102 «Кокшетауская–Костанайская» и Л-5170 «Агадырь–Экибастузская». Также эти линии коммутировались в условиях успешного ТАПВ. На ПС 1150 кВ Кокшетауская и ПС 500 кВ Агадырь проводились опыты при включении и отключении элегазовыми выключателями (HPL 550B2 – на ПС 1150 кВ Кокшетауская, GL-317 – на ПС 500 кВ Агадырь) шунтирую-

ших реакторов при наличии и отсутствии на выключателях устройств управляемой коммутации.

На рис. 4 представлены результаты обработки осциллограмм 69 коммутаций включения полюсов воздушных и элегазовых выключателей $U_{\text{НОМ}} = 500$ кВ (полученные результаты не претендуют на отражение полной статистической картины включения выключателей, но они хорошо представляют основные закономерности этой статистики). В каждой из коммутаций определялась фаза напряжения источника питания, при которой замыкались контакты выключателя, причем коммутация каждой фазы рассматривалась как независимая коммутация. Весь диапазон синусоидального изменения напряжения от нуля до амплитудного значения разбивался на четыре диапазона: $0-14,5^\circ-30^\circ-48,6^\circ-90^\circ$.

Диаграммы вероятности замыкания контактов выключателей относительно фазы напряжения источника питания показывают, что гипотеза о равной вероятности включения элегазовых выключателей

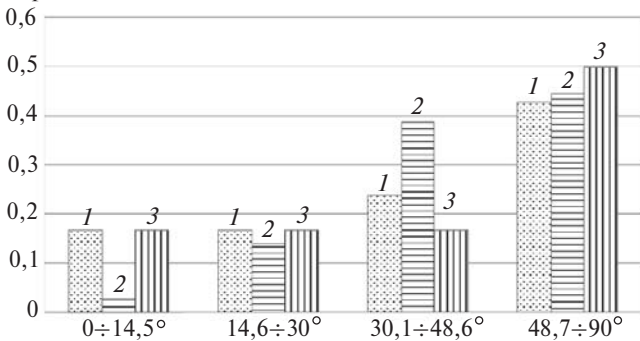


Рис. 4. Диаграммы вероятности замыкания контактов выключателей относительно фазы напряжения источника питания: 1 — ВВБК-500; 2 — GL-317; 3 — НРЛ-550В2

телей в любую фазу напряжения не подтверждается. Точно так же не подтверждается устоявшееся мнение, что воздушные выключатели в преобладающих случаях включаются вблизи максимума напряжения. Контакты полюсов как элегазовых, так и воздушных выключателей приблизительно в половине случаев замыкаются в фазу напряжения источника питания в диапазоне от $48,7$ до 90° (т.е. при $0,75-1,0U_m$), что указывает на замыкание с предварительным пробоем газового промежутка. Вероятность замыкания контактов элегазовых выключателей НРЛ-550В2 и воздушных выключателей ВВБК-500 вблизи нуля напряжения примерно одинакова ($\sim 0,2$).

В то же время, если определять вероятность коммутации одного полюса выключателя в заданную фазу при трехфазном замыкании, то получается, что с вероятностью $0,6-0,75$ хотя бы один по-

люс выключателя замыкается при фазе напряжения $\leq 30^\circ$ (табл. 1). Таким образом, при коммутации включения вероятность появления достаточно большой аperiodической составляющей в переходном токе очень большая.

Таблица 1

Диапазон углов	Вероятность коммутации для разных типов выключателей		
	ВВБК-500	НРЛ-550В2	GL-317
$\leq 14,5^\circ$	0,43	0,50	0,08
$\leq 30,0^\circ$	0,71	0,75	0,58
$\leq 48,6^\circ$	1,00	1,00	1,00
$\leq 90,0^\circ$	1,00	1,00	1,00

Объяснить это можно, если рассмотреть осциллограмму фазных напряжений источника питания (рис. 5).

При замыкании контактов в фазе А в максимум напряжения ($u_{a,\text{max}}$) и при разбросе моментов включений $\pm 3,333$ мс в фазах В и С обязательно произойдет включение полюса выключателя в мо-

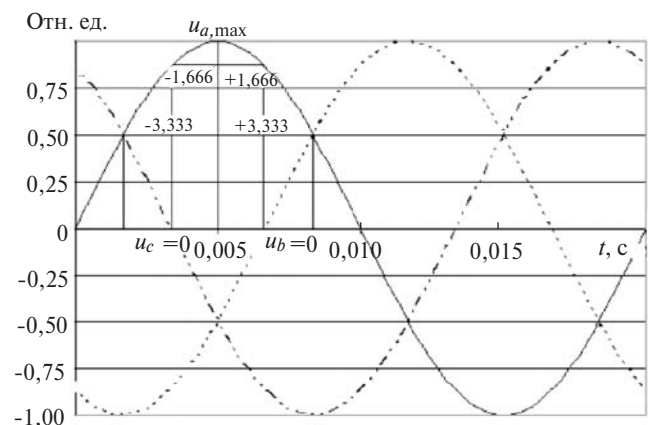


Рис. 5. Фазные напряжения источника питания

мент времени, когда аperiodическая составляющая тока хотя бы в одной фазе будет большой. Опытные данные (табл. 2) показывают, что с вероятностью $0,92$ у выключателя GL-317 и вероятностью $0,71$ у воздушного выключателя разброс времени замыкания контактов не превышает 3 мс. Для попадания в моменты времени близ нуля напряжения другой фазы разброс моментов включений должен быть порядка $\pm 1,666$ мс, что выполняется для выключателя НРЛ-550В2 с вероятностью $0,75$. Поэтому в экспериментах получилась большая вероятность появления аperiodической составляющей хотя бы в одной фазе при коммутации трехфазного включения любым воздушным или элегазовым выключателем.

Таблица 2

Задержка в коммутациях включения полюсов, мс	Вероятность появления аperiodической составляющей для разных типов выключателей		
	GL-317	HPL-550B2	ВВБК-500
<1,0	0,42	0,63	0,29
<1,7	0,50	0,75	0,43
<3,3	0,92	1,00	0,71
<4,0	1,00	1,00	0,79
<5,0	1,00	1,00	0,86
<6,0	1,00	1,00	1,00

Таким образом, предположение, что сами элегазовые выключатели из-за их равновероятной способности замыкать контакты в любую фазу напряжения приводят к появлению аperiodических составляющих в токе через выключатель, не подтверждается натурными экспериментами. В то же время эксперименты показывают (табл. 1), что в 60–75% коммутаций хотя бы один полюс выключателя замыкается при значении фазы напряжения < 30°. Замыкание в такие фазы напряжения как раз и является причиной появления больших аperiodических составляющих в токе через выключатель.

Причина неработоспособности элегазовых выключателей в отличие от воздушных выключателей остается следующая: вследствие особенностей конструкции элегазовых выключателей, обеспечивающих интенсивность дугогашения в зависимости от значения отключаемого тока, элегазовый выключатель не может отключать токи в здоровых фазах компенсированных ВЛ вследствие длительного неперевода тока через нуль при коммутации включения—отключение. Воздушные выключатели гасят дугу с интенсивностью, зависящей лишь от давления воздуха в резервуаре, поэтому обрыв тока происходит при его уменьшении до определенного значения (не обязательно до нуля тока).

Для проверки последней гипотезы были проведены расчеты процессов дугогашения в приведенных сценариях развития аварий. С этой целью разработана модель дуги отключения, адекватно отображающая процесс горения дуги во всем диапазоне изменения тока от амплитудных значений до перехода через нуль.

Численное моделирование процесса дугогашения.

Исходя из интегрального описания электрической дуги как объемного нелинейного резистора ($u = Ri$) с изменяющимся длиной l и площадью поперечного сечения S , можно при предположении постоянства давления записать следующие соотношения:

$$R = \rho(h) \frac{l}{S}; \quad H = h l S; \quad P = p(h) l S,$$

где R – сопротивление дуги; ρ – удельное сопротивление; h – объемная энтальпия; H – общая энтальпия; p – мощность теплопотерь на единицу объема столба дуги; P – общая мощность теплопотерь.

Закон сохранения энергии при интегральном описании электрической дуги представляется в виде

$$\frac{dH}{dt} = iu - P. \tag{6}$$

В области амплитудных значений тока справедливы допущения [3]: $S = \text{var}$; $h = h_K = \text{const}$; $p = p_K = \text{const}$, вследствие чего $R = \rho_K l / S$, откуда

$$S = \rho_K l / R; \tag{7}$$

$$H(R, l) = h_K \frac{\rho_K l^2}{R}; \tag{8}$$

$$P(R, l) = \frac{p_K \rho_K l^2}{R}. \tag{9}$$

Вблизи перехода тока через нуль справедливы допущения Майра [4]:

$$S = S_M = \text{const}; \quad h = \text{var}; \quad \rho = \rho_M e^{-h/h_M};$$

$$p(h) = p_M = \text{const}. \tag{10}$$

Вследствие чего $R = \rho_M e^{-h/h_M} l / S_M$, откуда

$$h = h_M \ln \left(\frac{\rho_M l}{R S_M} \right); \tag{11}$$

$$H(R, l) = h_M \ln \left(\frac{\rho_M l}{R S_M} \right) l S_M = h_M S_M \left(\ln \frac{\rho_M}{S_M} + \ln l - \ln R \right); \tag{12}$$

$$P(l) = p_M S_M l. \tag{13}$$

В соответствии с допущениями [3 и 4] из (6)

$$\frac{dH(R, l)}{dt} = iu - P; \quad \frac{\partial H}{\partial R} \frac{dR}{dt} = Ri^2 - P - \frac{\partial H}{\partial l} \frac{dl}{dt}.$$

Введем обозначения: $H_M = h_M S_M l$; $R_{KM} = \frac{\rho_K l}{S_M}$;

$$R_M = \frac{\rho_M l}{S_M}; \quad P_M = p_M S_M l; \quad R_1 = \frac{h_K}{h_M} R_{KM};$$

$$R_2 = \frac{p_K}{p_M} R_{KM} \quad \text{и} \quad R_3 = \frac{\rho_M}{\rho_K} R_{KM}.$$

С учетом (7)–(13) и принятых обозначений можно записать:

Параметр	Модель Касси	Модель Майра
$\partial H / \partial R$	$-H_M \left(\frac{R_1}{R} \right) \frac{1}{R}$	$-H_M(1) \frac{1}{R}$
$\partial H / \partial t$	$H_M \frac{1}{l} \left(\frac{R_1}{R} + \frac{R_1}{R} \right)$	$H_M \frac{1}{l} \left(\ln \frac{R_3}{R} + 1 \right)$
P	$P_M \left(\frac{R_2}{R} \right)$	$P_M(1)$

$$u_1 - u_2 = 0 \text{ при } t < t_H;$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{u_1 - u_2}{k_{д.р}} - R_H i = 0 \text{ при } t < t_H \\ & -\tau_M \left[\left(\frac{R_1}{R} \right)^{\alpha_1(i)} \right] \frac{d \ln R}{dt} = \frac{Ri^2}{P_M} - \left[\left(\frac{R_2}{R} \right)^{\alpha_2(i)} \right]; \\ & \frac{u_1 - u_2}{k_{д.р}} - Ri = 0; \\ & i = 0 \text{ при } R = R_m, \end{aligned} \right\} \text{ при } t > t_H \quad (16)$$

Объединить обе модели в одну обобщенную модель можно посредством введения функций:

$$\alpha_m(i) = \begin{cases} \alpha_{m0} + (1 - \alpha_{m0}) \left(2 - \frac{i^2}{I_K^2} \right) \frac{i^2}{I_K^2} & \text{при } |i| < I_K; \\ 1 & \text{при } |i| \geq I_K, \end{cases} \quad (14)$$

где $m = 1, 2, 3$; I_K – ток перехода из области малых токов в область больших токов (из области модели Майра в область модели Касси).

Выражение (14) получится, если

$$\alpha_m(i) = \begin{cases} \sum_{n=0}^N \alpha_{mn} i^{2n}; \\ 1 & \text{при } |i| \geq I_K \end{cases}$$

при условии непрерывности значений функций и их производных в точке I_K .

Обобщенная модель дуги для всего диапазона изменения тока от амплитудных значений до перепада через нуль получается в следующем виде:

$$-H(i, R) \frac{d \ln R}{dt} = Ri^2 - P(i, R) - H_l(i, R) \frac{d \ln l}{dt}, \quad (15)$$

где

$$H(i, R) = H_M \left(\frac{R_1}{R} \right)^{\alpha_1(i)}; \quad P(i, R) = P_M \left(\frac{R_2}{R} \right)^{\alpha_2(i)};$$

$$H_l(i, R) = H_M \left\{ \alpha_3(i) \frac{R_1}{R} + [1 - \alpha_3(i)] \ln \frac{R_3}{R} + \left(\frac{R_1}{R} \right)^{\alpha_1(i)} \right\}.$$

При $\alpha_{m0} = 0$ ($m = 1, 2, 3$) уравнение (15) при $i = 0$ превращается в уравнение Майра; при $i \geq I_K$ – в уравнение Касси. В общем случае может быть принято условие $\alpha_{m0} \neq 0$, тогда при $\alpha_m(i) = \alpha_{m0} = \text{const}$ получается модель Шварца [5, 6].

При моделировании процесса дугогашения в газовых выключателях принимается условие $l = \text{const}$. При использовании уравнения (15) модель дуги в выключателе описывается системой уравнений:

где $k_{д.р}$ – число дуговых разрывов в выключателе; R_H – начальное сопротивление горения дуги, Ом; $\tau_M = h_M / p_M = H_M / P_M$ – постоянная времени Майра; R_m – сопротивление гашения дуги, Ом.

Для определения параметров уравнений (16) используются экспериментальные результаты. Введем в рассмотрение величину постоянной времени Касси: $\tau_K = h_K / p_K$. С учетом (14), (15) и введенных обозначений получаем ряд соотношений:

$$R_1 = \frac{\tau_K}{\tau_M} R_2; \quad (17)$$

в области больших токов напряжение дуги постоянно ($u_d = u_K = u_0 \approx \text{const}$) и тогда

$$R_2 = u_0^2 / P_M; \quad (18)$$

при $R = R_{\text{max}}$ (в случае неуспешного гашения дуги при тепловом пробое)

$$\left(\frac{u_{R_{\text{max}}}}{u_0} \right)^2 = \left(\frac{R_2}{R_{\text{max}}} \right)^{\alpha_{20}}; \quad (19)$$

при $i = 0$

$$\tau_M \left(\frac{R_1}{R_{i=0}} \right)^{\alpha_{10}} \frac{d \ln R}{dt} \Big|_{i=0} = \left(\frac{R_2}{R_{i=0}} \right)^{\alpha_{20}}. \quad (20)$$

Если значение постоянной времени дуги вблизи нуля тока τ_M (постоянная времени Майра) и значение постоянной времени дуги в области больших токов τ_K (постоянная времени Касси) определены из экспериментов, то, имея для дуги отключения опытные осциллограммы $u_3(t)$, $i_3(t)$, можно последовательно определить все остальные параметры модели. Для этого необходимо найти минимум функции невязки

$$F(\alpha_{20}) = \int_{t_0}^{t_k} [R(t) - R_3(t)]^2 \mu(t) dt, \quad (21)$$

где $\mu(t)$ – весовая функция.

Последовательность вычислений следующая:
 задается значение α_{20} ;
 из (17)–(20) и опытных осциллограмм определяются P_M , R_1 , R_2 , α_{10} ;
 решается (16);
 находится функция невязки (21);

корректируются параметры;

при минимальном значении функции невязки параметры считаются определенными.

Таким образом, параметры модели дуги отключения (16)–(18) следующие: τ_M , τ_K , P_M , u_0 , I_K , α_{10} , α_{20} , при этом параметры τ_M , τ_K , P_M , u_0 , I_K имеют четкий физический смысл.

Параметры модели дуги отключения были определены для воздушного одnorазрывного выключателя ($U_{\text{ном}} = 220$ кВ) на основе опытных осциллограмм. Для такого же элегазового выключателя параметры определялись на основе анализа литературных данных, в частности [7, 8]. Следует отметить, что верификация модели дуги отключения только на основе единичной опытной осциллограммы является недостаточной. Необходимо использовать для этой цели некоторую интегральную характеристику выключателя, в качестве которой может выступить так называемая предельная кривая отключающей способности выключателя. Аналитическая формула для такой кривой представляется степенной зависимостью [9, 10]:

$$\frac{du}{dt} \left(\frac{di}{dt} \right)^\sigma = \text{const.}$$

На рис. 6 приведены предельные кривые отключающей способности выключателей, полученные расчетным путем при соответствующих параметрах дуги отключения:

Параметр	Тип выключателя	
	воздушный	элегазовый
τ_M , мкс	3,35	1,5
τ_K , мкс	11,0	4,5
P_M , МВт	19,9	8,0
R_1 , Ом	9,85	2,8
α_{10}	0,73	0,8
α_{20}	0,54	0,63
I_K , кА	4,0	4,0
R_H , Ом	0,10	0,01

Для схемы по рис. 3,а проведены расчеты процесса дугогашения при отключении воздушным и элегазовым выключателем ($U_{\text{ном}} = 500$ кВ; моделировались два разрыва, с приведенными параметрами дуги, $I_K = 0,5$ кА). Рассматривался процесс отключения тока в здоровой фазе выключателя при наличии большой апериодической составляющей.

На рис. 7,а представлены расчетные осциллограммы процесса отключения воздушным выключателем тока, не переходящего через нуль. Видно, что сопротивление дуги заставляет опускаться ток

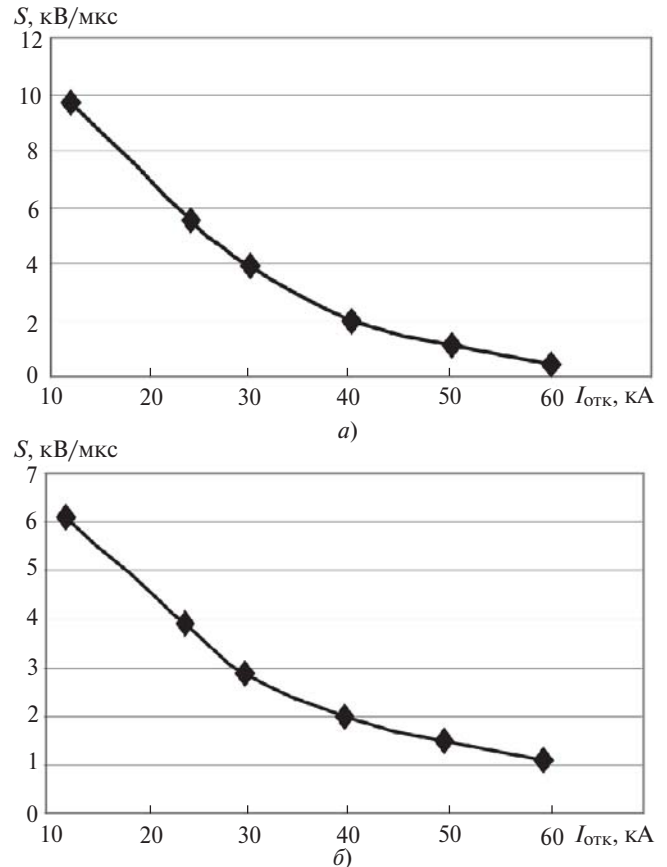


Рис. 6. Предельные кривые отключающей способности одnorазрывных воздушного (а) и элегазового (б) выключателей ($U_{\text{ном}} = 220$ кВ, $I_{\text{о.ном}} = 40$ кА)

ниже, при приближении тока к нулевой линии напряжение дуги возрастает и, наконец, происходит срез тока с пиком гашения напряжения дуги. Продолжительность горения дуги 16,46 мс. На рис. 7,б — то же для элегазового выключателя. Ток не отключается в течение 30 мс и более. Следует отметить, что продолжение расчета дугогашения с временем горения дуги более двух периодов промышленной частоты теряет смысл, так как условия в дугогасительной камере существенно изменяются и параметры модели дуги не остаются прежними. Условия гашения дуги ухудшаются, и дуга продолжает гореть в непроектных условиях.

Представленные осциллограммы хорошо иллюстрируют разницу между воздушным и элегазовым выключателем. Главные различия:

горение дуги в воздушном выключателе протекает при больших, чем в элегазовом выключателе, значениях напряжения и, соответственно, сопротивления дуги, за счет чего переходной ток быстрее приближается к нулю;

более интенсивное гашение дуги позволяет воздушному выключателю не дожидаться естественного перехода тока через нуль, а отключать со срезом тока.

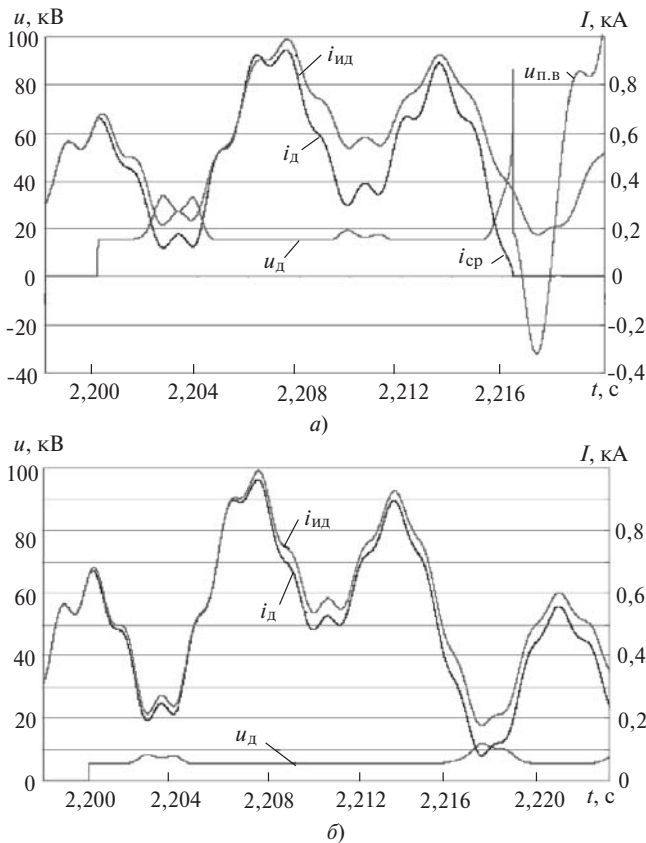


Рис. 7. Процесс дугогашения при отключении воздушного выключателя (а) и элегазового (б): u_d — напряжение дуги; i_d — ток дуги; $i_{ид}$ — ток без дуги (идеального выключателя); $i_{ср}$ — ток среза; $u_{п.в}$ — переходное восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя

Таким образом, разница в работе воздушных и элегазовых выключателей определяется различием процессов дугогашения. Воздушный выключатель справляется с отключением тока, не переходящего через нуль, в то время как элегазовый выключатель в этих условиях отказывает.

Резонансные перенапряжения. Резонансные перенапряжения в ВЛ с реакторами возможны в несимметричных режимах с наличием хотя бы одной фазы ВЛ, отключенной с двух сторон, и хотя бы одной фазы линии, подключенной к источнику питания хотя бы с одной стороны.

Реально такие случаи возможны:

при питании ВЛ от двух фаз (две фазы включены, одна — отключена) в случае отказа одного полюса выключателя при включении холостой линии и в случае успешного ОАПВ, когда КЗ ликвидируется в начале бестоковой паузы;

питании ВЛ от одной фазы (одна фаза включена, две — отключены) в случае отказа одного полюса выключателя при отключении холостой линии и в случае отказа одного полюса выключателя при повторном отключении в цикле двухстороннего ТАПВ.

Результаты исследований резонансных перенапряжений приведены в литературе (см., например, [11]). Здесь отметим лишь случай, который непосредственно связан с исследуемой проблемой. При продолжительном горении дуги на контактах выключателя возникает несимметричный режим питания ВЛ от одной фазы, который может привести к резонансным перенапряжениям на отключенной фазе.

На рис. 8 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы напряжений в фазах A, B, C в цикле неуспешного ТАПВ ВЛ 500 кВ. Последовательность коммутаций: КЗ в фазе A ; трехфазное отключение линии с двух сторон; опробование напряжением; повторное отключение выключателем с отказом одного полюса выключателя (в фазе C).

Таким образом, один аварийный процесс (неотключение фазы из-за длительного горения дуги) усугубляется другим аварийным процессом (резонансным повышением напряжения на отключенной фазе), который может привести к пробоям изоляции и выводу из строя ОПН.

Меры по предотвращению появления аperiodических составляющих в токах отключения. Рассмотрим способы устранения проблемы отключения переходных токов при наличии больших аperiodических составляющих.

Первым способом может быть способ введе-

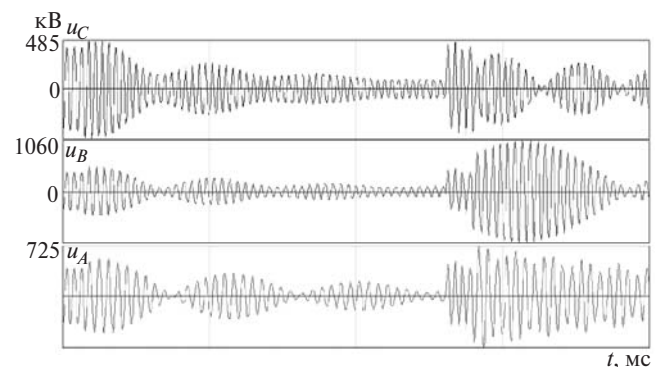


Рис. 8. Расчетные осциллограммы напряжений в фазах A, B, C в цикле неуспешного ТАПВ

ния задержки в коммутации включение—отключение (ВО) в здоровых фазах. Измененный цикл ТАПВ при этом должен иметь вид: $O-t_{зт}-B-t_{ап}-O$, где $t_{ап}$ — время затухания аperiodической составляющей в токе через выключатель. Однако при таком способе возникает несимметричный режим питания ВЛ, при котором может возникнуть резонансное повышение напряжения [11], что опять же может привести к аварии.

Второй способ связан с уменьшением числа присоединенных к ВЛ шунтирующих реакторов при выполнении коммутаций ВО. В этом случае

увеличивается число коммутаций (снижение надежности) и возникают проблемы обеспечения работоспособности ОПН.

Третий способ связан с возможностью управлять фазой включения. Если проводить включение при $\psi = \pi/2$, т.е. вблизи максимума напряжения со стороны источника питания, то апериодическая составляющая в токе незначительная и последующее отключение не будет представлять трудности. В настоящее время производителями элегазовых выключателей выпускаются устройства управляемой коммутации, например, SwitchSync (АББ) или КСДВ ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) — Уралэлектротражмаш». Данные устройства позволяют проводить их настройку на выдачу команд на срабатывание выключателей в заданные моменты включения и отключения, в том числе и по условию максимума первой гармоники напряжения со стороны источника питания. Необходимо отметить, что при описанном способе будут наблюдаться максимальные значения перенапряжений, поэтому необходимо проводить анализ работоспособности устанавливаемых ОПН.

Четвертый способ заключается в возможности временного включения в схему большого активного сопротивления, которое позволяло бы уменьшить постоянную времени τ_L до значения порядка 15–20 мс. В настоящее время используются выключатели с предвключаемыми на время 8–12 мс резисторами сопротивлением порядка волнового сопротивления ВЛ 250–400 Ом. На рис. 9 представлены расчетные осциллограммы ТАПВ в трехфазной схеме рис. 3,а с использованием выключателя с предвключаемым резистором.

Как видно из этих осциллограмм включение резистора 300 Ом ($t_{пр} = 12$ мс) решило проблему с апериодической составляющей в здоровых фазах. Однако в фазе В с КЗ кратковременное включение резистора не приводит к существенным изменениям. Меняется только фаза КЗ, апериодическая составляющая практически не изменяется. Но отключение токов КЗ для выключателей не представляет проблемы, связанной с наличием апериодической составляющей в токе отключения, так как переход тока через нуль обеспечивается. Проблема состоит только в том, чтобы резистор выдерживал включение на токи КЗ в связи с электродинамическими и термическими воздействиями.

Оценку сверху энергоемкости резисторов можно провести по выражению

$$W = \frac{U_{\text{ф.н.р}}^2}{R_{\text{пред}}} t_{\text{пр}}, \quad (22)$$

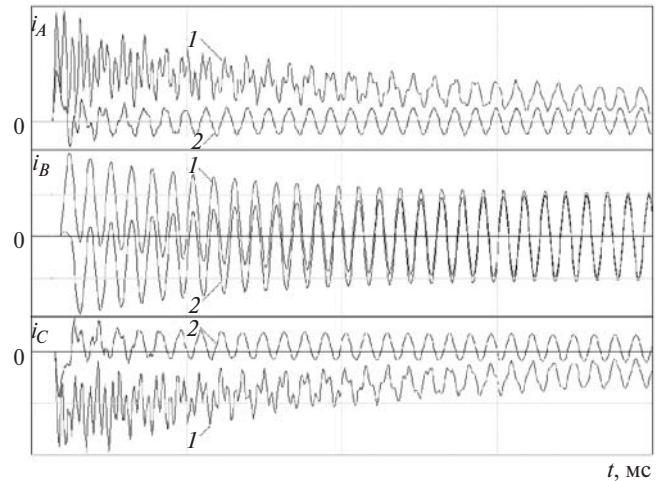


Рис. 9. Токи в выключателе при отсутствии (1) и наличии (2) предвключаемых резисторов после включения в цикле ТАПВ (КЗ в фазе В, $t_{пр} = 12$ мс)

где $t_{пр}$ — время, на которое включается предвключаемый резистор; $U_{\text{ф.н.р}}$ — фазное наибольшее рабочее напряжение.

При сопротивлении резистора $R_{пр} = 300$ Ом для $t_{пр} = 10$ мс и $U_{\text{ф.н.р}} = 303,11$ кВ из (22) получается $W = 3,1$ МДж; при сопротивлении резистора $R_{пр} = 250$ Ом для $t_{пр} = 12$ мс имеем $W = 4,4$ МДж. Значения энергоемкостей предвключаемых резисторов сравнимы по своим значениям с энергоемкостями ОПН.

Выводы. 1. При замене на ПС 500–1150 кВ воздушных выключателей на новые элегазовые выключатели возникают непредусмотренные аварийные ситуации неотключения переходных токов с большими апериодическими составляющими. В результате проведенных натурных экспериментов выяснилось, что контакты полюсов как элегазовых, так и воздушных выключателей приблизительно в половине случаев замыкаются в фазу напряжения источника питания в диапазоне от $48,7^\circ$ до 90° (т.е. при $0,75–1,0U_m$), что указывает на замыкание с предварительным пробоем межконтактного промежутка. Замыкание контактов любых выключателей вблизи нуля напряжения при трехфазной коммутации включения с вероятностью 0,6–0,75 происходит хотя бы в одном полюсе выключателя. Таким образом, при коммутации включения любым выключателем вероятность появления достаточно значительной апериодической составляющей в переходном токе очень большая.

2. Проведенные расчеты отключения элегазовым и воздушным выключателем с моделированием процесса дугогашения выявили разницу в отключении переходных токов, длительное время не переходящих через нуль. При отключении воздуш-

ным выключателем переходной ток быстрее приближается к нулю и отключается со срезом тока. Элегазовый выключатель не отключает ток в течение 40 мс и более, в результате чего условия дугогашения изменяются в худшую сторону и процесс горения дуги затягивается на непрогнозируемое время вследствие работы выключателя в нештатных условиях.

3. При продолжительном горении дуги на контактах выключателя возникает несимметричный режим питания ВЛ от одной фазы, который может привести к резонансным перенапряжениям на отключенной фазе. Таким образом, один аварийный процесс (неотключение фазы из-за длительного горения дуги) усугубляется другим аварийным процессом (резонансным повышением напряжения на отключенной фазе), приводящим к пробоям изоляции и выводу из строя ОПН.

4. Из рассмотренных четырех способов устранения проблемы неотключения переходных токов при наличии длительной апериодической составляющей в здоровых фазах наиболее предпочтительным является способ с использованием выключателей с предвключаемыми резисторами.

В настоящее время на основании приложения к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» от 11.04.2007 № 87 при выполнении проектных работ выполняются расчеты электромагнитных переходных процессов с целью выявления случаев появления больших апериодических составляющих в токах отключения, представляющих аварийную опасность для элегазовых выключателей 500–750 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокунин Г., Дмитриев М., Гольдштейн С., Иваницкий Ю. Высоковольтные ВЛ. Коммутации и воздействия на выключатели. – Новости электротехники, 2008, № 3 (51).

2. Беляков Н.Н., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л. и др. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений/Под ред. М.Л. Левинштейна. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

3. Cassie A.M. A new Theory of Arc Repture and Circuit Severity. – CIGRE, 1939, Paper № 102.

4. Mayr O. Beitrag zur Theorie des Statishen und Dinamischen Lichtbogen. – Archiv für Elektrotechnik, 1943, 37, № 12.

5. Schwarz J. Dynamisches Verhalten eines gasbeblasenen, turbulenzbestimmten Schaltlichtbogens. – Elektrotechn. Z., 1971, 92, № 6.

6. Schwarz J. Berechnung von Schaltvorgaengen mit einer zweifach modifizierten Mayr-Gleichung. – ETZ-A, 1972, 93, № 7.

7. Hutter S., Uglesic I. Universal Arc Resistance Model «Zagreb» for EMTP. – 19th Intern. Conf. on Electricity Distribution (CIRED), Vienna, 21–24 May 2007.

8. Koshizuka T., Shinkai T., Udagawa K., Kawano H. Circuit Breaker Model using Serially Connected 3 Arc Models for EMTP Simulation. – Intern. Conf. on Power Systems Transients (IPST2009), Kyoto (Japan), 3–6 June, 2009.

9. Отключение токов в сетях высокого напряжения/Под ред. К. Рагаллера. Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1981.

10. Щеглов Л.В. Испытания дугогасительного устройства воздушных выключателей серии ВНВ в предельных режимах отключения токов короткого замыкания. – Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1978, вып.7 (87).

11. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. 2-е изд./Под ред. Н.Н. Тиходеева. – СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.

[01.03.12]

А в т о р : Наумкин Иван Егорович закончил физико-технический факультет Томского государственного университета в 1971 г. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию «Определение отключающей способности высоковольтных воздушных выключателей в электрических сетях на основе математического моделирования процесса дугогашения» в Сибирском НИИ энергетики. Заместитель директора по науке ООО «Болд».

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4–5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.