

Результаты экспериментальных исследований переходных процессов при коммутациях многоразрывных вакуумных выключателей 110 кВ

БАЗАВЛУК А. А., САРИН Л. И., ООО «Болид»
630015, г. Новосибирск, Электrozаводской пр., д. 1; pnp_bolid@ngs.ru
ЧАЙКА В. Д., НПП «Контакт», г. Екатеринбург



А. А. Базавлук



Л. И. Сарин



В. Д. Чайка

Представлены результаты экспериментальных исследований переходных процессов при коммутациях различных вакуумных выключателей (ВВ) 110 кВ. Установлено существенное влияние разновременности размыкания контактов в полюсе многоразрывного ВВ на переходные процессы. Показана необходимость учёта разновременности при выборе защитных РС-цепочек.

Ключевые слова: вакуумные выключатели, переходные процессы, разновременность размыкания, РС-цепочка.

При коммутациях ВВ могут происходить переходные процессы, приводящие к повреждению электрооборудования. В сетях средних классов напряжения проведено множество исследований по данной теме, разработаны методики выбора ВВ с учётом возможных перенапряжений и предложены различные принципы защиты, в том числе установка защитных аппаратов (ограничителей перенапряжения, РС-цепочек) [1 – 4].

Вакуумные выключатели в классе напряжения 110 кВ — новый вид оборудования. Количество вводимой в эксплуатацию вакуумной коммутационной техники в классе 110 кВ растёт вследствие целого ряда её преимуществ по сравнению с масляными и воздушными выключателями. Основные достоинства — большой коммутационный ресурс, позволяющий использовать ВВ 110 кВ для управления технологическими режимами металлургических предприятий, широкий диапазон рабочих температур и большие межремонтные периоды.

На российском рынке представлены несколько типов ВВ различной конструкции. Применяются выключатели следующих производителей: НПП «Контакт» (г. Саратов, Россия), Высоковольтный союз (г. Екатеринбург, Россия), компания «Элвест» (г. Екатеринбург, Россия), Joslin (США). Эти ВВ 110 кВ отличаются друг от друга в первую очередь конструкцией и областью применения.

Выключатели производства НПП «Контакт» и Высоковольтный союз имеют один разрыв на фазу, т. е. в составе

одного полюса есть только один модуль с вакуумной дугогасительной камерой (ВДК). НПП «Контакт» производит ВВ 110 кВ также с двумя последовательно соединёнными модулями в полюсе. Коммутационный ресурс выключателей указанных производителей при отключении номинальных токов составляет 10 000 циклов включения-отключения, область применения — коммутация объектов сетевой инфраструктуры (трансформаторов, воздушных и кабельных линий).

Компании «Элвест» и Joslin выпускают ВВ 110 кВ для внутренней установки с четырьмя и пятью разрывами на фазу соответственно. Каждая фаза состоит из нескольких последовательно соединённых ВДК на более низкие классы напряжения. Эти выключатели имеют большой коммутационный ресурс — до 40 000 циклов включения-отключения, что и определило область их применения — металлургические предприятия.

У многоразрывных выключателей есть очевидное преимущество перед одноразрывными: скорость изменения пробивного напряжения (СИПН) таких выключателей выше за счёт того, что привод многоразрывного выключателя

отключает несколько последовательно соединённых модулей. В этом случае СИПН возрастает кратно числу ВДК в одном полюсе. Однако это справедливо для выключателей, у которых подвижные контакты разных ВДК в одном полюсе отключаются с малым значением разновременности. Большая величина последней приводит к тому, что снижается СИПН и увеличивается вероятность возникновения эскалации перенапряжений.

Эти особенности многоразрывных выключателей не учитываются при выборе средств защиты от перенапряжений, моделирование таких выключателей при выполнении расчётов имеет довольно упрощённый и далёкий от реальности вид. При эксплуатации на характеристики разновременности не обращают внимания, что приводит к непредвиденным технологическим нарушениям. В связи с этим весьма актуальными становятся экспериментальные исследования переходных процессов при коммутациях ВВ 110 кВ, которые могут быть основой для решения перечисленных проблем.

Результаты экспериментальных исследований коммутаций многоразрывных ВВ 110 кВ

Специалистами ООО «Болид» проведены натурные эксперименты для исследования переходных процессов при коммутациях различными типами ВВ 110 кВ. В экспериментах выполнялись измерения скоростей подвижных контактов и разновременности модулей в полюсе многоразрывных выключателей. Задача исследований — получение материала для качественной оценки влияния разновременности размыкания контактов модулей на особенности протекания переходных процессов и эффективности защитных РС-цепочек в схемах с многоразрывными ВВ 110 кВ.

В экспериментах проводилось сравнение переходных процессов, возникающих при коммутациях воздушной линии с ненагруженным трансформатором вакуумными выключателями ВВО-110-31,5/2000 и ВВП-110-31,5/2000 (одноразрывный и двухразрывный выключатели соответственно производства НПП «Контакт»). Скорости подвижных контактов для выключателей указанных типов, измеренные в момент размыкания контактов приведены в таблице.

Характеристика выключателя	Тип выключателя			
	ВВО-110-31,5/2000	ВВП-110-31,5/2000	ВВЭЛ-110-5/1000	VBU-600
Число разрывов на фазу	1	2	4	5
Разновременность при размыкании контактов модулей в полюсе, мс	—	0,24 0,57	0,17 – 1,26	0,05 – 0,14
Скорость подвижных контактов при размыкании, м/с	3,12	2,05	1,07	0,41

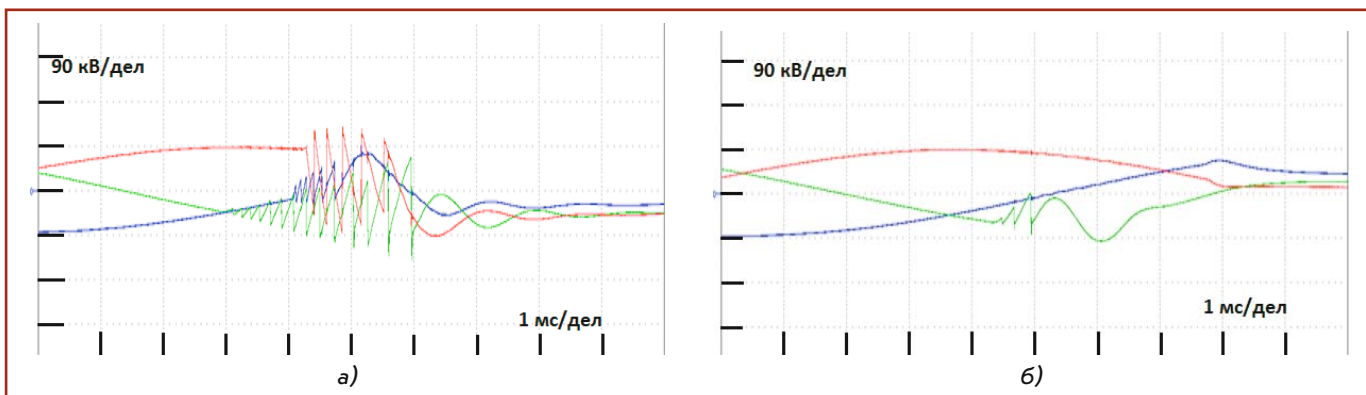


Рис. 1. Осциллограммы фазных напряжений при отключении печного трансформатора выключателями ВВЭЛ-110-5/1000 (а) и VBU-600 (б)

Для выключателя ВВЭЛ-110-5/1000 разновременность в одном полюсе при отключении составила 0,24 – 0,57 мс. При отсутствии разновременности движения контактов в полюсе данного выключателя его СИПН превышает СИПН выключателя ВВЭЛ-110-5/1000.

В исследовании, проведённом ООО «Болит» на металлургическом комбинате, один и тот же печной трансформатор коммутировался выключателями ВВЭЛ-110-5/1000 (четыре разрыва на фазу) производства компании «Элвест» и VBU-600 (пять разрывов на фазу) производства компании Joslin (США). Характерные осциллограммы с возникновением повторных зажигания (ПЗ) при отключении выключателей приведены на рис. 1. Осциллограммы переходных процессов зарегистрированы цифровым осциллографом с частотой дискретизации до 100 МГц, который подключался к первичным токоведущим частям через экранированные измерительные кабели и делители напряжения с пропускной способностью до 2 МГц.

При отключении выключателем ВВЭЛ-110-5/1000 повторные зажигания наблюдались в 117 из 175 коммутаций (66,9 %), а выключателем VBU-600 производства компании Joslin — гораздо реже в 15 из 558 коммутаций (2,7 %). При отключении ВВЭЛ-110-5/1000 максимальное число ПЗ

достигало 21. Повторные зажигания начинались с малых значений, т. е. сразу после размыкания контактов. Максимальное число ПЗ при отключении выключателя VBU-600 равнялось трём, и возникали они, как правило, когда контакты уже разошлись на значительное расстояние друг от друга.

Причина существенного отличия числа ПЗ и вероятности их возникновения кроется в различии скоростей подвижных контактов в полюсах и их разновременности при размыкании контактов в полюсах выключателей. Для выключателя VBU-600 скорость подвижных контактов больше, чем для ВВЭЛ-110-5/1000. Выключатель VBU-600 по разновременности размыкания контактов в одном полюсе также оказался лучше ВВЭЛ-110-5/1000 (см. таблицу).

Большая разновременность отключения между подвижными контактами модулей в полюсе увеличивает вероятность возникновения ПЗ по нескольким причинам. Во-первых, в этом случае СИПН возрастает медленнее. Во-вторых, вероятность возникновения ПЗ зависит от времени между моментом расхождения контактов и переходом тока через нулевое значение, а для выключателей с большой разновременностью моментов расхождения контактов несколько (для каждого модуля свой).

Напряжение между разомкнутыми контактами распределяется относительно равномерно (при наличии выравнивающих конденсаторов), независимо от расстояния между ними. После пробоя в любом модуле многоразрывного выключателя происходит перераспределение напряжений, во время которого напряжение, приложенное к контактам каждого непробившегося модуля, возрастает.

Кроме того, перераспределение напряжения происходит через переходной процесс на контактах каждого модуля. При этом возможно возникновение ПЗ в остальных модулях и соответственно во всей фазе. Таким образом, пробой одного модуля фазы может вызвать пробой всего полюса. Если в полюсе выключателя большая разновременность при отключении и ПЗ могут возникнуть в нескольких уже разомкнутых модулях при том, что другие ещё остаются замкнутыми, то на каждый разомкнутый модуль напряжение будет больше, чем в ситуации, когда разомкнуты все модули.

Для исключения повторных пробоев при отключении выключателя следует стремиться к снижению разновременности при срабатывании модулей в полюсе, чтобы эквивалентная СИПН была равна сумме СИПН камер каждого модуля. При отсутствии разновременности

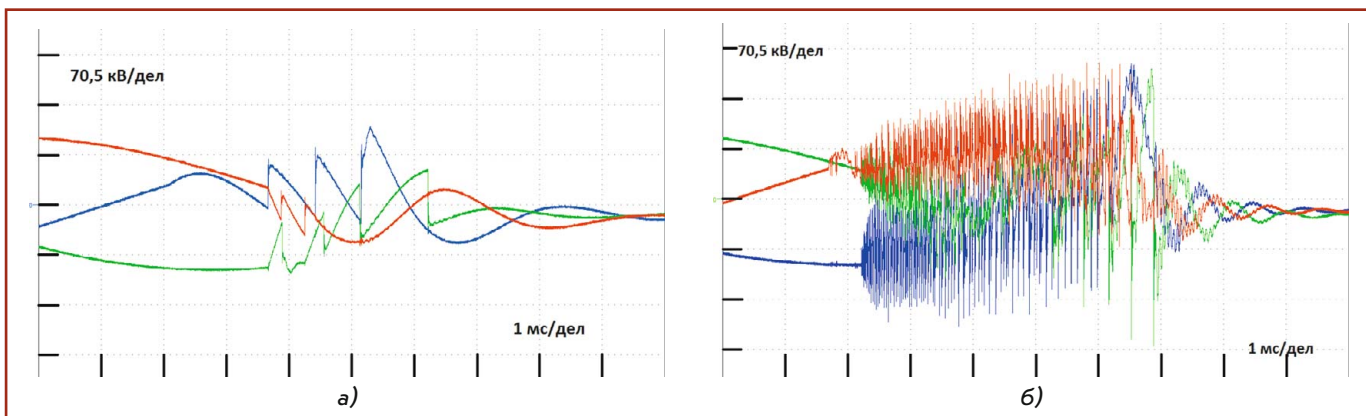


Рис. 2. Характерные осциллограммы фазных напряжений при отключении печного трансформатора вакуумным выключателем ВВЭЛ-110Б-31,5/1000 при подключённой RC-цепочке (а) и без неё (б)

сти в размыкании контактов модулей в фазе СИПН увеличивается (по сравнению с одноразрывными ВВ) во столько раз, сколько модулей установлено в полюсе, тем самым значительно уменьшая вероятность ПЗ.

Особенности выбора защитных RC-цепочек в схемах с многоразрывными ВВ

В ходе экспериментальных исследований в сети 110 кВ ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат» проведено сравнение переходных процессов с подключённой и отключённой RC-цепочкой. На рис. 2 представлены осциллограммы фазных напряжений, зарегистрированные в ходе экспериментальных исследований переходных процессов при отключении печного трансформатора вакуумным выключателем ВВЭЛ-110Б-31,5/1000 (четыре разрыва на фазу).

В данном случае наличие RC-цепочки привело к уменьшению числа ПЗ, но не исключило их полностью. Максимальное число ПЗ в схеме с отключённой RC-цепочкой превышало 150, при её наличии — 9. Установленное в схеме защитное оборудование выбрано исходя из СИПН, рассчитанной для случая, при котором отсутствует одновременность в полюсе выключателя. Однако абсолютно синхронной работы контактов в условиях эксплуатации достичь нельзя, поэтому для эффективной защиты от перенапряжений с помощью RC-цепочки следует учитывать наличие разновременности в полюсе выключателя.

Выводы

1. В результате экспериментальных исследований установлено, что разновременность размыкания контактов в полюсе многоразрывного выключателя существенно влияет на скорость изменения пробивного напряжения при отключении. Эксплуатирующим организациям необходимо контролировать синхронную работу контактов в полюсе многоразрывного выключателя для снижения вероятности повторных зажиганий и как следствия — эскалации перенапряжений. Производители вакуумных выключателей должны стремиться к созданию конструкций, обеспечивающих меньшую разновременность размыкания контактов в полюсе многоразрывного выключателя.

2. В методике выбора защитной RC-цепочки в схемах с многоразрывными вакуумными выключателями должна учитываться разновременность размыкания контактов в полюсе. В расчёты следует вводить коэффициент запаса, снижая тем самым эквивалентную скорость изменения пробивного напряжения многоразрывного вакуумного выключателя при отключении.

3. Проведённые эксперименты позволяют создать адекватную математическую модель для оценки перенапряжений, возникающих при коммутациях вакуумных выключателей, в которой учтены особенности, вызванные разновременностью размыкания и замыкания контактов в полюсе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Лаптев О. И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. — 343 с.

2. Защита сетей 6 – 35 кВ от перенапряжений / Ф. Х. Халилов, Г. А. Евдокунин, В. С. Поляков, и др. — СПб: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2002. — 272 с.

3. Дегтярёв И. Л. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих коммутации вакуумными выключателями: Дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 2006.

4. Качесов В. Е. Однофазные повреждения в сетях среднего и высокого напряжения (теория, меры исследования и меры предотвращения повреждений): Дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 2008.



Особенности развития дуговых замыканий на землю в кабельной изоляции сети с резистором в нейтрали

ШИРКОВЕЦ А. И., канд. техн. наук, ООО «Болид»
630015, г. Новосибирск, Электrozаводская ул., д. 2, корп. 6
nio_bolid@ngs.ru

Представлены качественная и количественная оценки влияния активного тока в цепи замыкания на землю на параметры электромагнитных процессов при однофазных повреждениях изоляции силовых кабелей. Рассчитаны вероятности аварийного отката из-за перехода однофазного замыкания в короткое замыкание. Для характерной схемы замещения сети на основе преобразований дифференциального уравнения получены выражения и выполнены расчёты по влиянию отношения активного и ёмкостного токов на коэффициент демпфирования и частоту свободных колебаний в переходном процессе. Изучены условия перевода перемежающейся однофазной дуги в устойчивую фазу её горения при наличии в нейтрали сети резистора.

Ключевые слова: заземляющая дуга, активный ток, однофазное повреждение изоляции, силовая кабель, частота свободных колебаний, скорость демпфирования, устойчивость горения.

Активная составляющая тока I_R в токе однофазного замыкания влияет на скорости восстановления напряжения на повреждённой фазе и роста электрической прочности в бес-токовые паузы. Ожидается, что при соотношениях активного и ёмкостного (при наличии компенсации — остаточного) токов $I_R/I_C < (1,0 \div 1,2)$ возможно кратковременное усиление деионизации дугового промежутка в бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) силового кабеля, в том числе и за счёт стекания избыточного заряда с нейтрали. В изоляции из сшитого полиэтилена (СПЭ) незначительная деионизация может иметь место только в газовом канале пробоя, однако восстановление электрической прочности полимерной изоляции, очевидно, уже невозможно.

При включении резистора сопротивлением R_N в нейтраль сети характер горения дуги при замыканиях на землю

должен изменяться (по сравнению с режимом изолированной нейтрали или заземления через дугогасящий реактор) по крайней мере за счёт изменения после погасания дуги скорости снижения напряжения на нейтрали, определяемой по формуле

$$u_N(t) = u_{N_{\max}} \exp\left(-\frac{t}{3R_N C_{\phi}}\right), \quad (1)$$

где $u_{N_{\max}} = (0,5 \div 1,2)u_{\phi \max}$ — диапазон изменения напряжения на нейтрали относительно амплитуды фазного напряжения $u_{\phi \max}$; C_{ϕ} — ёмкость фазы сети на землю.

При значениях тока $I_R = (0,7 \div 1,2)I_C$ наибольшие перенапряжения на неповреждённых фазах практически не превышают таковых при первом зажигании дуги. Формула для выбора сопротивления, призванного ограничить перенапряжения, предложена в 1918 г. В. Пе-