

УДК 621.311

М.Ш. МИСРИХАНОВ, Т.Е. ПУТОВА, П.Г. МАЛЮЩИЦКИЙ, В.П. ГРЕЧИН

ЗАЩИТА КОММУТИРУЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ РАБОТЕ ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

МЭС Центра ОАО «ФСК ЕЭС»
ООО «Нижегородский инженерный центр»

Показано, что наиболее эффективным средством защиты от перенапряжений при использовании вакуумных выключателей является оптимально выбранная *R-C* цепочка. Установлено, что процессы развития перенапряжений зависят от параметров коммутируемых присоединений.

В последнее время широкое распространение получили успешно работающие вакуумные выключатели (ВВ). Для выключателя вакуум – это состояние газа, находящегося в герметичном корпусе при давлении, меньше атмосферного, являющегося идеальной изоляционной средой.

Целесообразность использования ВВ определяется следующими преимуществами [1]: высокое быстродействие за счет быстрого восстановления электрической прочности межконтактного промежутка (МКП); высокая износостойкость электрических контактов (длительность нормальной эксплуатации до 25 лет); достаточно широкий диапазон рабочих температур ОС ($-70 \div +200$ °С); небольшие габариты (компактная конструкция и малая масса); любая ориентация в пространстве; полная взрыво- и пожаробезопасность; экологическая чистота эксплуатации (отсутствие возможности загрязнения ОС и бесшумность работы); удобство обслуживания и приемлемая стоимость.

Известно, что при достаточно большой напряженности электрического поля в техническом вакууме появляется электрический ток, который быстро возрастает при дальнейшем увеличении напряженности поля вплоть до пробоя МКП.

При весьма малых расстояниях МКП (доли мм) разряд в вакууме происходит в результате автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) металлов с поверхности катода [2, 3]. При этом разогревание поверхности электродов при прохождении тока АЭЭ, вызывает их испарение, в результате чего происходит пробой изоляционного МКП в парах металла. С увеличением МКП разрядная напряженность быстро уменьшается.

Основным недостатком ВВ (как и других типов выключателей) является их способность генерировать перенапряжения на коммутируемом оборудовании (КО), содержащем индуктивно-емкостные элементы (трансформаторы, двигатели). Это связано со срезом отключаемых токов и многократными повторными зажиганиями (МПЗ) дуги в МКП при расхождении контактов.

Для ВВ характерно чрезвычайно быстрое восстановление электрической прочности МКП, что ведёт к их высокой отключающей способности и возможности прерывать высокочастотные токи (до сотен кГц). Из-за повышенных перенапряжений отключение малого индуктивного тока (у оборудования, имеющего большое индуктивное сопротивление: трансформатор в режиме холостого хода или нагруженного индуктивностью, реактор, электродвигатель) является наиболее опасной коммутационной операцией, при использовании ВВ.

Дуга в ВВ поддерживается не за счёт ионизированных газов дугогасящей среды, как в выключателях других типов, а за счёт ионизированных паров металла контактов. Следствием этих процессов является неустойчивость дуги малого тока и повышенная способность резко обрывать ток до его естественного перехода через нулевое значение. Индуктивность нагрузки и напряжение источника питания практически не влияют на значение тока среза. Значи-

тельную роль в процессах, возникающих при работе ВВ, играет материал контактов и конструкция выключателя [2, 3].

Основными причинами, вызывающие перенапряжения, являются:

- срез тока до его нулевого значения и освобождение энергии, запасённой в индуктивных элементах сети;
- недостаточная диэлектрическая прочность МКП в начальный интервал времени после прерывания тока дуги (рис. 1), которая может не выдержать переходного восстанавливающегося напряжения, что и приводит к МПЗ;
- виртуальный срез тока, достигающий до сотен ампер, в соседних фазах, вызванный МПЗ дуги в первой отключаемой фазе. (Виртуальный срез тока – при МПЗ отключение первой фазы и возникновении высокочастотных токов, в других фазах возможно, что это переходный высокочастотный ток.

Физическая сущность появления перенапряжений сводится к переходу электромагнитной энергии, накопленной в индуктивности, в электростатическую, определяющую напряжением на емкости отключаемой части сети [3]. Поэтому при отключении ненагруженных трансформаторов, особенно, при малых ёмкостях коротких кабелей или шин, перенапряжения при срезах отключенного тока могут быть достаточно велики.

Значительно более тяжелые воздействия на изоляцию, чем срезы тока, могут вызывать МПЗ дуги в ВВ. Образование МПЗ начинается с единичного повторного зажигания, при этом ток в ВВ может переходить через нулевое значение. После чего происходит восстановление напряжения и повторный пробой. В процессе отключения (при МПЗ) диэлектрическая прочность МКП выключателя возрастает, следовательно, растут и МПЗ, амплитуда токов высокочастотных колебаний, а результате и перенапряжения на отключаемой индуктивности.

Многочисленные повторные зажимания создают серию импульсов перенапряжений с крутыми фронтами на выводах нагрузки, которые воздействуют на витковую изоляцию двигателей и трансформаторов. Перенапряжения при срезах тока имеют более пологий фронт и воздействуют на главную изоляцию.

Высокое быстродействие и достаточно быстрое восстановление последуговой прочности при отключении тока индуктивной нагрузки приводит к появлению существенного недостатка ВВ – **генерации повышенного уровня перенапряжения, опасного для изоляции КО**, величиной до $9 \times U_{\phi}$ [3]. Поэтому КО нуждается в дополнительной защите [4]. В настоящее время нет универсальной и абсолютной защиты. Мероприятия по защите КО от коммутационных перенапряжений включают в себя применение ограничителей перенапряжений (ОПН) или использование резисторно-ёмкостных (R-C) цепочек, которые имеют как положительные, так и отрицательные свойства.

Положительные свойства R-C цепочек:

- уменьшают амплитуду перенапряжений при срезе тока, так как увеличивают ёмкость отключаемой нагрузки. При этом снижается амплитуда восстанавливающегося после среза тока напряжения;
- демпфируют высокочастотные колебания при МПЗ дуги;
- снижают частоту колебаний восстанавливающегося напряжения после среза тока, чем уменьшается возможность МПЗ;
- сдвигают нулевое значение тока высокочастотных колебаний относительно максимума напряжения, поэтому в момент гашения напряжение на ёмкости ниже максимального. Это снижает величину восстанавливающегося напряжения и уменьшает вероятность повторных зажиганий;
- снижают крутизну фронта перенапряжения при МПЗ из-за снижения частоты колебаний и увеличения ёмкости, что в свою очередь уменьшает негативное воздействие на продольную изоляцию.

Указанные проявления R - C цепочек снижают уровень перенапряжения при МПЗ и препятствуют эскалации напряжений.

Недостатки R - C цепочек:

- емкость R - C цепочки увеличивает общий ёмкостный ток замыкания на землю в сети, поэтому ёмкость цепочки должна в несколько раз превышать ёмкость на землю защищаемого присоединения. Но при большом числе таких присоединений возможно резкое увеличение ёмкостного тока замыкания на землю. В связи с этим возникает необходимость (в ряде случаев) установки дугогасящих устройств, усложняющих режимы и эксплуатацию сети;
- отсутствие проектных решений по установке;
- более низкий уровень изоляции по сравнению коммутируемым оборудованием и пониженная устойчивость к перенапряжениям;
- трудность размещения защитной R - C цепочки вблизи выводов двигателя, особенно на действующих объектах;
- сложность подбора сопротивления R - C цепочки, так как обусловленное R - C цепочкой затухание колебаний имеет максимум при определённом значении сопротивления, величина которого выбирается в зависимости от параметров защищаемого присоединения;
- отсутствие типовых инструкций по эксплуатации;
- сложность замены R - C цепочек при изменении параметров сети, так как характеристики R - C цепочки определяются для конкретного присоединения.

Защита КО с использованием ОПН

Для защиты КО могут быть использованы ОПН, устанавливаемые вблизи двигателей или трансформаторов. При этом их защитные характеристики должны соответствовать уровню изоляции защищаемого объекта, а допустимые напряжения с частотой 50 Гц и пропускная способность – условиям работы в сети [4, 5].

Разработанные и выпускаемые в настоящее время ОПН не обладают абсолютной устойчивостью по пропускной способности при работе в условиях режима однофазного короткого замыкания с перемежающейся дугой, поэтому их установка для защиты КО требует рассмотрения проблемы надёжной работы в сети с изолированной нейтралью, так как ОПН должны защищать (кроме коммутационных) от других воздействий (дуговых, феррорезонансных).

Выводы

1. Несмотря на достоинства, ВВ (при отсутствия защиты) способствуют появлению опасных для КО перенапряжений. Наиболее эффективным средством защиты от перенапряжений при использовании ВВ является оптимально выбранная R - C цепочка. Однако сложности, связанные с ее выбором, изготовлением, установкой и необходимой надёжностью работы ограничивают её широкое применение.
2. Условия и процессы, способствующие развитию перенапряжений при работе ВВ, зависят от параметров коммутируемых присоединений, поэтому необходимо определять расчетный уровень перенапряжения и выбор расстановки средств защиты КО.

Библиографический список

1. Электрические аппараты высокого напряжения: учеб. пособие для вузов / Г.Н. Александров [и др.]; под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 344 с.
2. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений /Ф.Х. Халилов [и др.]; под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.
3. Раховский, В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме / В.И. Раховский. – М., Наука, 1970. – 536 с.
4. Беляков, Н.Н. Защита от перенапряжений установок с вакуумными выключателями // Электрические станции. 1994. № 9. – С. 65-71.