

А.В. Верхола

(Украина, Алчевск, Донбасский государственный технический университет)

ПРОБЛЕМЫ КОММУТАЦИИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ВАКУУМНЫМИ КОНТАКТОРАМИ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

В настоящее время украинский рынок низковольтной аппаратуры находится в кризисном состоянии, которое обусловлено, в частности, слабым присутствием на нем отечественного производителя. Электротехнические фирмы Австрии, Великобритании, Германии, Италии, России, США и Японии достигли высоких результатов в этой области и предлагают широкий спектр контакторов. В ассортименте предлагаемой ими продукции все большую долю составляют низковольтные вакуумные контакторы. Это объясняется значительными преимуществами вакуумных контакторов перед контакторами с традиционными системами дугогашения: высокой коммутационной износостойкостью, малым объемом, низкими эксплуатационными затратами, отсутствием выброса продуктов горения дуги. Вместе с тем вакуумным контакторам присущи такие недостатки: относительно высокая стоимость и способность генерировать в некоторых режимах работы опасные коммутационные перенапряжения. Для выяснения причин указанных недостатков и поиска возможных путей их устранения целесообразно провести анализ сложившейся ситуации.

Формулирование цели статьи

Целью статьи является анализ технических проблем, препятствующих более широкому внедрению низковольтных вакуумных контакторов в производство и поиск путей решения этих проблем.

Анализ исследований и публикаций

Относительно высокая стоимость вакуумных контакторов объясняется тем, что в их состав входят вакуумные дугогасительные камеры (ВДК). В сравнении с традиционными контактными системами, ВДК являются более сложным устройством. Для их производства требуется специфическое оборудование и высококвалифицированный персонал. Доля стоимости ВДК в низковольтном контакторе составляет 60 – 80%, и поэтому можно считать, что стоимость низковольтного вакуумного контактора определяется стоимостью ВДК. Анализируя научно-техническую литературу, можно выделить следующие основные причины выхода из строя ВДК:

- натекание газов внутрь камеры извне, что приводит к недопустимому ухудшению вакуума (менее 10^{-4} мм рт. ст.);
- ухудшение вакуума из-за газовой выделений из контактов и экранов;
- механический износ сильфона;
- механический износ спаев металлических деталей ВДК с ее керамическим корпусом;
- механический износ спаев токоподводов с контактами;
- механический износ направляющей втулки подвижного контакта;
- коммутационный износ контактов ВДК.

Исследования [1] показали, что ухудшение вакуума по причине натекания газов внутрь камеры обусловлено, в основном, проникновением в нее атмосферного гелия. Для камер со стеклянным корпусом срок службы, определяемый данным фактором, составляет 20 лет, а для камер с керамическим корпусом – практически не ограничен. При количественной оценке повреждаемости камер за счет натекания газов разные авторы приводят несколько различные цифры, однако они укладываются в достаточно узкий диапазон: от 0 до 0,1 % всего выпуска ВДК [2, 3]. В целом в рассмотренных работах можно выделить единое мнение о том, что указанные цифры невелики и при достигнутом уровне технологии производства и контроля выход ВДК из строя по этой причине можно не принимать во внимание.

Снижение ресурса ВДК вследствие ухудшения вакуума из-за газовой выделений из контактов и экранов может быть уменьшено путем специальной обработки материалов [4, 5]. Кроме того, отмечено, что в процессе работы ВДК выделяющийся газ частично поглощается парами материала контактов [1]. Таким образом, при надлежащем контроле качества материалов контактов и экранов рассматриваемый фактор можно не учитывать, как существенный при анализе причин выхода из строя ВДК.

Механический износ сильфона в значительной степени зависит от возникающих в нем механических напряжений, которые пропорциональны ходу подвижного контакта [1, 6]. Вакуумные дугогасительные камеры низковольтных контакторов имеют ход контакта наименьший среди всего разнообразия применяемых ВДК, поэтому механический износ сильфона не является определяющим для их ресурса. В целом механический ресурс ВДК низкого напряжения более чем в 2 раза превышает коммутационный [1].

Механический износ спаев металлических деталей ВДК с ее керамическим корпусом определяется растягивающими напряжениями в этих спаях. Поэтому в конструкции вакуумных контакторов предусматриваются меры по разгрузке оболочки ВДК от растягивающих напряжений или оболочка ВДК предварительно сжимается с помощью стяжек так, чтобы в процессе эксплуатации в ней не возникали растягивающие напряжения [1, 7].

Механический износ спаев токоподводов с контактами зависит в основном от скорости соударения контактов при включении, поэтому скорость смыкания контактов ограничивается и составляет, как правило, 0,5 – 1 м/с [1]. Ограничение скорости соударения контактов позволяет не рассматривать износ спаев токоподводов с контактами как фактор, влияющий на ресурс ВДК.

В работе [8] как одна из причин выхода из строя ВДК отмечается повышенный износ стержня подвижного контакта в местах его трения с направляющей втулкой. Повышенный износ стержня может возникать из-за нецентрального или несоосного контактирования контактных накладок. Для исключения этих явлений предложен ряд мероприятий, заключающихся в основном в уменьшении трения путем применения специальных материалов [6, 9], устранении бокового смещения якоря путем применения шарнирных соединений [6, 10], устранении силы смещения путем применения контактных накладок разных диаметров [6, 11] или отказа от применения направляющей втулки при одновременном введении специального сочленения якоря и подвижного контакта [6, 12–14].

Способность вакуумных контакторов генерировать в некоторых режимах работы опасные коммутационные перенапряжения связана с тем, что вакуумная дуга гаснет не при нулевом, а при некотором конечном значении тока (при подходе синусоиды к нулю тока). Явление резкого обрыва тока до его естественного нуля названо срезом тока. К моменту среза тока в магнитном поле индуктивности отключаемой цепи концентрируется энергия, под воздействием которой возникают колебания напряжения (перенапряжения). Максимальная величина перенапряжений может достичь значения, критического для изоляции отключаемого оборудования. Даже, если возникающие перенапряжения не приводят к полному пробое изоляции, они ухудшают ее вследствие возникновения частичных пробоев, расщепления слюды и т. п. Так, в результате исследований [15] установлено, что многократные воздействия импульсов напряжения снижают электрическую прочность изоляции. По этой причине в дальнейшем пробой может наступить при перенапряжениях, амплитуда которых ниже минимальной прочности изоляции. В целом результаты лабораторных исследований [15] и обобщение опыта эксплуатации электрических машин позволяют сделать вывод о том, что срок службы изоляции и ее эксплуатационная надежность определяются частотой и величиной воздействий перенапряжений, а также совершенством средств защиты от перенапряжений. При этом коммутационные перенапряжения могут вызвать старение изоляции, а также ее пробой как непосредственно, так и вследствие кумулятивного эффекта.

Изложение материала и его результаты

По результатам анализа научно-технической и патентной литературы можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим ресурс ВДК контакторов низкого напряжения, является коммутационный износ контактов [1, 16–18]. Как отмечено в работах [19, 20], коммутационный износ зависит от геометрии контактов и энергии, выделяющейся в дуге. При фиксированных размерах контактов с увеличением подводимой к дуге энергии коммутационный износ возрастает. Поэтому для повышения ресурса ВДК представляется целесообразным ограничить поступление энергии в дугу отключения, возникающую в ней.

Схемы ограничения энерговыделения в дуге отключения можно разделить на две группы:

- схемы, реализующие передачу функции коммутации полупроводниковым приборам, включенным параллельно или последовательно главным контактам;

- схемы, реализующие размыкание контактов перед нулем отключаемого тока.

Схемы первой группы [20, 21] имеют существенные достоинства при применении в коммутационных аппаратах с гашением дуги в воздухе. Однако их применение в коммутационных аппаратах с вакуумными дугогасительными камерами проблематично. Это объясняется тем, что при гашении дуги в вакууме возникают коммутационные перенапряжения, опасные для полупроводниковых приборов.

Схемы второй группы реализуются в синхронных коммутационных аппаратах. Принцип действия синхронного коммутационного аппарата предусматривает, что при отключении цепи контакты размыкаются в фиксированный момент времени перед естественным нулем отключаемого тока, когда запасенная в отключаемом контуре энергия минимальна. Такие аппараты не столь критичны к величине коммутационных перенапряжений и поэтому могут быть использованы для ограничения энерговыделения в ВДК.

Наиболее распространенным в настоящее время является способ ограничения перенапряжений, возникающих при коммутации цепи низковольтными вакуумными контакторами – использование в ВДК композиционных контактов, в состав которых, как правило, входит легкоплавкий компонент [22]. Недостаток этого способа – усложнение технологии изготовления ВДК и следовательно их удорожание. Кроме того, в качестве легкоплавкого компонента используются олово и сурьма, которые, являясь тяжелыми металлами, могут оказывать отрицательное воздействие на организм человека на стадии производства ВДК либо при неправильной утилизации отработавших камер.

К числу схемных мероприятий по ограничению коммутационных перенапряжений относится нормирование длины кабеля [23] и использование РС – цепочек [23-25]. Недостатком нормирования длины кабеля является возможное изменение его длины или параметров при эксплуатации. Так, например, в шахтных электрических сетях это может быть вызвано продвижением рабочего забоя или повреждением кабеля [23]. Кроме того, при изменении длины кабеля нагрузки изменение величины перенапряжений при включении и отключении имеет разный знак, что сильно ограничивает возможность применения этого способа [23]. Применение РС – цепочек считается достаточно эффективным средством ограничения перенапряжений. Однако, как отмечается в работе [23], эффективное ограничение перенапряжений достигается лишь в точке установки РС – цепочки. Перенапряжения же на высоковольтной стороне линии остаются практически без изменений.

Вентильные разрядники, традиционно применяющиеся для защиты сетей общего назначения от грозových перенапряжений, в последние годы нашли применение и как средства защиты от коммутационных перенапряжений сетей

высокого напряжения. В работе [23] делается вывод о том, что для защиты распределительных сетей, в частности шахтных кабельных, вентильные разрядники малоэффективны и, кроме того, существенно увеличивают длительность переходного процесса при коммутации.

Наиболее совершенным в настоящее время следует признать применение с целью ограничения коммутационных перенапряжений в сетях напряжением 1140 и 660 В нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) на основе высоконелинейных резисторов или варисторов [23, 26]. Эти устройства обеспечивают необходимый уровень ограничения коммутационных перенапряжений, допустимые токи утечки и хорошую устойчивость основных рабочих характеристик при переменных климатических воздействиях. К недостаткам нелинейных ограничителей перенапряжений можно отнести возможность их повреждения при возникновении в цепи коротких замыканий, так как в этом случае через ОПН протекает большой ток.

За исключением первого из рассмотренных способов, все остальные направлены на борьбу с уже возникшими коммутационными перенапряжениями. В то же время имеется возможность, чтобы значительно ограничить величину коммутационных перенапряжений путём более полного использования возможностей самого коммутационного аппарата. При прочих равных условиях величина тока среза и перенапряжений зависит от момента размыкания контактов относительно фазы отключаемого тока [4] и имеет ярко выраженный минимум в точках перехода тока через нулевое значение. Очевидно, что если обеспечить размыкание контактов в моменты, непосредственно предшествующие переходу тока через нулевое значение, то будет достигнуто ограничение возникающих перенапряжений. В этом смысле синхронное отключение также может рассматриваться как способ защиты от коммутационных перенапряжений [27]. При этом, если синхронное отключение обеспечивается в каждой фазе отключаемой цепи, то автоматически будет реализован еще один способ ограничения перенапряжений – пофазная коммутация [23].

Выводы

1. На основе анализа научно-технической и патентной литературы определены следующие технические проблемы, сдерживающие внедрение низковольтных вакуумных контакторов в производство: неполное использование ресурса ВДК и генерирование коммутационных перенапряжений, приводящих к повышенному износу изоляции электрооборудования.

2. Основным фактором, влияющим на ресурс вакуумных контакторов низкого напряжения, является коммутационный износ контактов ВДК, который в свою очередь определяется количеством энергии, выделившейся в дуге отключения. Обоснована целесообразность использования синхронного отключения для уменьшения энергии, выделившейся в дуге.

3. Основным фактором, влияющим на срок службы изоляции электрооборудования в коммутируемой вакуумным контактором цепи, является частота и величина воздействия коммутационных перенапряжений. Обоснована целесо-

образность использования синхронного отключения для уменьшения коммутационных перенапряжений.

Список литературы

1. Arthur M. E. Useful life of vacuum interrupters / M. E. Arthur, M. J. Zunick // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1978. – Vol. 97, № 1. – P. 1-7.
2. Reliability and service with vacuum switching equipments / M. Okawa, S. Matsuda, T. Tsutsumi, S. Nishiwaki // International Conference on Electricity Distribution, Brighton, 1-5 June, 1981 : Pt I. – London, New York, 1981. – P. 46-50.
3. Vacuum switchgear : Proceedings of 11 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 24-28 Sept. 1984, Berlin. Vol. 2 / Edited by E. Hantzsche. – Berlin : Central Institute of Electron Physics, 1984. – P. 241-248.
4. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями / [В. А. Воздвиженский, А. Ф. Гончаров, В. Б. Козлов и др.] ; под общ. ред. В. Б. Козлова. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
5. Заявка 19942971 Германия, МПК⁷ Н 01 Н 33/66, G 01 R 31/333. Vorrichtung zur Innendruckmessung, Spannungskonditionierung und Stromkonditionierung von Vakuumschaltröhren und Verfahren hierfür / Meissner Johannes, Heidelberger Klaus, Lipperts Jerrie et. al.; Moeller GmbH. – № 19942971.5 ; заявл. 09.09.1999 ; опубли. 15.03.2001.
6. Рыбакова Н.А. Исследование надёжности сильфонных упругих элементов коммутационной техники / Н. А. Рыбакова // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). – 2003. – № 10. – С. 172-175.
7. Пат. 235954 ГДР, МКИ Н 01 Н 33/66. Vakuumdichte Verbindung für Vakuumschaltkammern mit scheibenförmigem isolierkörper / Moser Dietrich. ; Kombinat VEB Elektro-Apparate-Werke Berlin-Treptow, Zentrum für Forschung und Technologie. – № WPH01H/2747966 ; заявл. 03.04.85 ; опубли. 21.05.86.
8. Шевченко С. М. Движение и удары в электрических аппаратах автоматического управления / Шевченко С. М. – М. : Энергия, 1979. – 144 с.
9. Пат. 4492837 США, МКИ Н 01 Н 33/66. Guide means for the movable contact rod of a vacuum interrupter / Donald W. Crouch, Joseph C. Sofianek. ; General Electric Co. – № 477554 ; заявл. 21.03.83 ; опубли. 08.01.85.
10. Пат. 129686 ПНР, МКИ Н 01 Н 33/66. Łącznik próżniowy, zwłaszcza stycznik próżniowy / Płatak Wojciech, Wierchniewski Zbigniew. ; Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Aparatury Manewrowej "ORAM". – № PL19821104 ; заявл. 11.04.82 ; опубли. 31.10.85.
11. А. с. 943898 СССР, МКИ Н 01 Н 33/66. Контактная система вакуумной дугогасительной камеры / К. К. Намитоков, Д. П. Солопихин, И. Я. Суровцев. (СССР). – № 3228115/24-07 ; заявл. 30.12.80 ; опубли. 15.07.82, Бюл. № 26.
12. Пат. 58-46810 Япония, МКИ Н 01 Н 33/66. Вакуумный контактор / Огава Сэйдзи. ; Токе Сибаура дэнки к. к. – № 54-95950 ; заявл. 27.07.79 ; опубли. 19.10.83.
13. Заявка 3328183 ФРГ, МКИ Н 01 Н 33/66. Antrieb für einen Vakuumschalter / Volkmar Ralf Reiner. ; Siemens AG. – № P3328183.1 ; заявл. 01.08.83 ; опубли. 21.02.85. – 10 с.
14. Пат. 2168788 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 Н 33/66. Вакуумный выключатель / Чистяков С.П.; заявитель и патентообладатель ООО "Науч.-произв. предприятие "ЭЛВЕСТ". – № 99126724/09 ; заявл. 16.12.99 ; опубли. 10.06.01, Бюл. № 16 (II ч.).
15. Козырев Н.А. Влияние внутренних перенапряжений на сроки службы изоляции электрических машин / Н. А. Козырев, О. К. Хомутецкий. – Москва. : Отделение научно-технической информации, стандартизации и нормализации в электротехнике, 1965. (Изоляция электрических машин).
16. Электрические контакты: Пути повышения качества и надёжности : [Сб. науч. тр. / отв. ред. Тучинский Л.И.]. – Киев: Ин-т пробл. материаловед. АН УССР, 1987. – 206 с.

17. Markiewicz H. Kontaktprellen und Spannungsverlauf beim Einschaltvorgang des Vakuumschalters / H. Markiewicz // Wissenschaftliche Berlin Technische Hochschule. – 1985. – № 11. – P. 50 – 61.
18. Изменение характеристик низковольтных вакуумных контакторов при большом числе коммутаций / Г. С. Белкин, В. С. Генин, А. Н. Леонтьев [и др.] // Электротехника. – 2006. – № 2. – С. 20-23.
19. Вакуумные дуги / [Дж. Кобайн, Г. Эккер, Дж. Фаррел и др.] ; под ред. Дж. Лафферти. – М. : Мир, 1982. – 432 с.
20. Могилевский Г. В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения / Могилевский Г. В. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
21. Сосков А. Г. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита: учебник / А. Г. Сосков, И. А. Соскова. – К. : Каравелла, 2005. – 344 с.
22. Намитоков К. К. Вакуумные контакторы / К. К. Намитоков, С. М. Шевченко. – М. : Отделение научно-технической информации, стандартизации и нормализации в электротехнике, 1973. – 49 с.
23. Мнухин А. Г. Защита электрических сетей шахт от коммутационных перенапряжений / А. Г. Мнухин, Б. И. Коневский. – М. : Недра, 1987. – 143 с.
24. Morley L.A. Evaluation of coal-mine electrical system safety / L. A. Morley, F. C. Trutt, I. L. Kohler. ; Final Report. – Philadelphia ; Pennsylvania State University, 1981. – 199 p.
25. Применение RC-блока высокого напряжения при коммутации цепи вакуумным выключателем / Zhao Ling-ling, Yang Kui-he, Li Bin [et. al.] // College of Information Science and Engineering, Mechano-electron Integration Center, Hebei University of Science and Technology. – 2001. – № 1. – P. 56-58.
26. Защита электрооборудования от перенапряжений / В. А. Алмазов, В. Е. Зеленев, В. П. Мирошниченко [и др.] // Прикладная физика. – 2001. – № 5. – С. 54-57.
27. Верхола А. В. Об использовании синхронного отключения для защиты изоляции электродвигателя от коммутационных перенапряжений / А. П. Овчар, А. В. Верхола // Вісник Східноукраїнського державного університету. – 1999. – № 4(20). – С. 193–196.