УДК 621.314

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОДЕЛИ РАЗМЫКАТЕЛЯ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Пустынников С.В. [1]

[1]*ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, г. Томск, ГСП пр. Ленина, 30), e-mail: pustynnikov@list.ru*

Разработан бесконтактный размыкатель цепей постоянного тока, позволяющий коммутировать силовые цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой. Устройство содержит источник постоянного тока, к которому параллельно подключены две цепи, имеющие индуктивную связь с помощью трансформатора тока. Размыкание второй цепи с нагрузкой осуществляется путем размыкания первой цепи, величина тока в которой в несколько раз меньше тока нагрузки. В момент коммутации нагрузка шунтируется диодом и не оказывает влияние на переходный процесс. Во второй цепи формируется отрицательный импульс тока, который переходит через нулевое значение. Получены дифференциальные уравнения переходного процесса для токов обеих цепей, которые решены относительно тока нагрузки численным методом переменных состояния при размыкании цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой. Проведены экспериментальные исследования лабораторной модели устройства, которые показали хорошую сходимость с результатами расчета.

Ключевые слова: коммутация цепей постоянного тока, индуктивная нагрузка, переходный процесс, трансформатор тока, встречное включение обмоток, метод переменных состояния.

STUDY OF DC CIRCUIT BREAKER MODEL

Pustynnikov S.V. [1]

[1]*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Prospect, 30), e-_mail: pustynnikov@list.ru*

The transient process caused by disconnecting the DC circuit with inductive load by the non-contact circuit breaker is calculated. The device contains a DC source which is connected in parallel to the two circuits coupled inductively through the current transformer. Opening the second circuit to the load is done by opening the first circuit, which current is several times less current than the in second circuit. At the moment of switching the load is shunted by the diode and so has no impact on the transient process. The second circuit is formed by a negative current pulse which passes through zero. Differential equations for the currents of both circuits of the transient process are derived which solved for the load current by the numerical method of the state variables when the DC circuit is disconnected with inductive loads. Experimental research of laboratory device model were done which showed a good compliance with the results of the calculation.

Keywords: switching current, inductive load, transition, current transformer, counter the inclusion of windings, the method of state variables.

Электрические цепи, содержащие индуктивную нагрузку или имеющие внутреннюю индуктивность, способны запасать электрическую энергию в магнитном поле. Подключение таких цепей к источникам электроэнергии не представляет сложной технической проблемы, большой проблемой является отключение индуктивности от источника, поскольку в момент размыкания коммутатора на размыкающих контактах возникает перенапряжение, в несколько раз превышающее напряжение источника электроэнергии. Особенно тяжелые условия возникают при размыкании цепей постоянного тока, поскольку ток в индуктивной нагрузке при подключенном источнике никогда не переходит через нулевое значение. Примерами таких цепей являются линии электропередач постоянного тока, линии связи, электрические двигатели и генераторы постоянного тока.

Способы размыкания цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой можно условно разделить на два направления – способы с дуговой коммутацией, когда на размыкающих контактах возникает электрическая дуга, и способы бездуговой коммутации, когда электрическая дуга не возникает [4].

К первому способу относится, например размыкание цепей постоянного тока при помощи электромеханических устройств - пускателей, контакторов и т.д. Известен также метод реостатной коммутации, основанный на перетекании тока из одной параллельной ветви в другую при изменении сопротивления одной из ветвей. Наиболее распространенные устройства, реализующие реостатную коммутацию, это взрывающиеся проводники. В этом случае изменение сопротивления происходит с разрушением проводников и возникновением дугового разряда. Недостатком таких устройств является их одноразовость, после каждого размыкания цепи взрывной коммутатор необходимо заменять.

К способам бездуговой коммутации относится, например, увеличение индуктивности насыщенного дросселя в схеме вывода энергии из индуктивного накопителя в нагрузку. В этой схеме дроссель включен последовательно с коммутатором и находится в стадии насыщения. В момент отключения цепи предварительно заряженная емкость создает в цепи размыкателя ток, направленный противоположно току индуктивного накопителя. При достижении разностным током значения, соответствующего излому кривой намагничивания, дроссель переходит в ненасыщенное состояние, и его индуктивность возрастает. В цепи «дроссель – размыкатель» создается пауза тока, во время которой происходит размыкание цепи и восстановление электрической прочности контактного промежутка. Ток в цепи размыкателя уменьшается в 1000 раз, осуществляется бездуговая коммутация, и потерь на контактах размыкателя не возникает.

Похожий способ реализован в схеме переключения тока накачки индуктивного накопителя энергии на нагрузку [3]. Для передачи накопленной энергии в нагрузку в коммутируемый участок цепи включена первичная обмотка двухобмоточного трансформатора с сердечником, выполненным из материала с узкой прямоугольной петлей намагничивания. Перед пропусканием через первичную обмотку трансформатора тока накачки индуктивного накопителя энергии осуществляют насыщение сердечника трансформатора путем пропускания по его вторичной обмотке, включенной встречно первичной, постоянного тока от дополнительного источника. Величину тока во вторичной обмотке, имеющей меньшее число витков, устанавливают такой, чтобы после пропускания по первичной обмотке трансформатора тока накачки индуктивного накопителя энергии сохранилось состояние насыщения сердечника. Изменение величины индуктивного

сопротивления коммутируемого участка цепи осуществляют отключением дополнительного источника.

Автором была разработана и исследована работа бесконтактного размыкателя цепей постоянного тока [5], позволяющая осуществлять многократное замыкание и размыкание цепей с внутренней индуктивностью, или с индуктивной нагрузкой. Схема устройства показана на рис. 1.

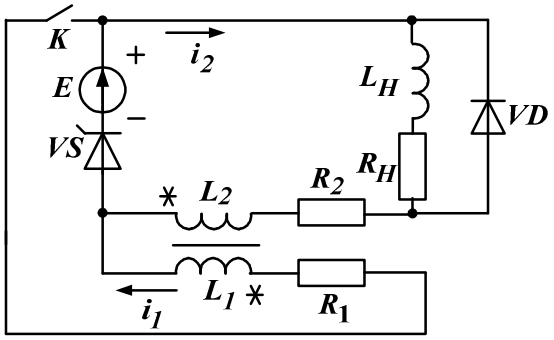

Рис. 1. Электрическая схема бесконтактного размыкателя цепей постоянного тока.

Бесконтактный размыкатель цепей постоянного тока содержит источник ЭДС ***E***, к которой параллельно подключены две цепи, имеющие индуктивную связь с помощью трансформатора тока.

Первая цепь с током i_1 содержит последовательно включенные первичную обмотку трансформатора тока R_1, L_1 и коммутатор ***K***.

Вторая цепь с током i_2 состоит из последовательно включенных активно-индуктивной нагрузки R_H, L_H, вторичной обмотки трансформатора тока R_2, L_2 и тиристора ***VS***. Параллельно нагрузке подключен вентиль ***VD***, шунтирующий нагрузку при отключении тиристора ***VS***.

Трансформатор тока является понижающим с коэффициентом трансформации ***n***, причем обмотки трансформатора тока имеют встречное включение. Благодаря тому что активное сопротивление первой цепи R_1 больше активного сопротивления второй цепи R_2, ток i_1 в несколько раз меньше тока i_2, протекающего через нагрузку. Предложенная схема бесконтактного размыкателя цепей постоянного тока позволяет осуществлять бесконтактное отключение нагрузки от источника ЭДС ***E*** во второй цепи с током i_2 путем размыкания первой цепи с током i_1.

При подаче управляющего импульса на тиристор ***VS*** постоянный источник ЭДС ***E*** подключается к нагрузке, и по цепи «источник ЭДС ***E*** - тиристор ***VS*** – нагрузка R_H, L_H – вторичная обмотка трансформатора тока R_2, L_2» протекает постоянный ток i_2.

Одновременно замыкается коммутатор ***K***, который подключает постоянный источник ЭДС ***E*** к первичной обмотке трансформатора тока R_1, L_1, и по первичной обмотке протекает постоянный ток i_1, имеющий направление встречного включения относительно постоянного тока i_2 вторичной обмотки трансформатора тока, при этом величина тока i_1, ограниченная резистором R_1, в несколько раз меньше величины тока вторичной обмотки i_2.

При отключении нагрузки R_H, L_H от ЭДС ***E*** размыкается коммутатор ***K***, и ток i_1 в первичной обмотке трансформатора тока уменьшается до нуля. За счет индуктивной связи ***M*** при встречном включении обмоток трансформатора тока, во вторичной обмотке трансформатора тока R_2, L_2 формируется отрицательный импульс тока, благодаря которому ток i_2 переходит через нулевое значение, что приводит к запиранию тиристора ***VS*** и отключению нагрузки от постоянного источника ЭДС ***E***. Энергия, запасенная в индуктивности L_H, шунтируется вентилем ***VD***.

Были проведены расчетные и экспериментальные исследования модели размыкателя цепей постоянного тока. Вследствие нелинейности вольтамперной характеристики тиристора работа схемы была проанализирована без тиристора ***VS***, что не влияет на принцип работы схемы, но позволяет существенно упростить расчеты.

При расчете переходного процесса будем считать, что в момент времени $t = 0_+$ после размыкания ключа ***K*** нагрузка шунтируется диодом ***VD*** и параметры нагрузки R_H, L_H не оказывают влияния на переходный процесс в остальной цепи. Для предотвращения условий некорректной коммутации размыкание ключа ***K*** эквивалентно последовательному включению в первую цепь с током i_1 сопротивления R_3, величина которого намного превышает величину сопротивления R_1.

С момента времени $t = 0_+$ переходный процесс описывается системой уравнений, составленной по законам Кирхгофа для мгновенных значений [1]:

$$\begin{cases} E = i_1(R_1 + R_3) + L_1 \dfrac{di_1}{dt} - M\dfrac{di_2}{dt} \\ E = i_2 R_2 + L_2 \dfrac{di_2}{dt} - M\dfrac{di_1}{dt} \end{cases}$$

Полученную систему удобно решить методом переменных состояния в программе MathCad, согласно которому в матричной форме дифференциальные уравнения переменных состояния записываются в форме Коши [2]:

$$\left(dx/dt\right) = (A)\cdot(x) + (B)\cdot(V),$$

где (x) - матрица-столбец переменных состояния (величины, подчиняющиеся законам коммутации); (A) - матрица состояния (коэффициенты при переменных состояния); (V) -

матрица-столбец источников энергии; (B) - матрица коэффициентов при источниках; $\left(dx/dt\right)$ - матрица-столбец первых производных по времени от переменных состояния.

После преобразования получим:

$$\begin{pmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{-(L_2 \cdot R_1 + L_2 \cdot R_3)}{L_2 \cdot L_1 - M^2} & \dfrac{-M \cdot R_2}{L_2 \cdot L_1 - M^2} \\ \dfrac{-(M_2 \cdot R_3 + M \cdot R_1)}{L_2 \cdot L_1 - M^2} & \dfrac{-L_1 \cdot R_2}{L_2 \cdot L_1 - M^2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dfrac{M + L_2}{L_2 \cdot L_1 - M^2} \\ \dfrac{L_1 + M}{L_2 \cdot L_1 - M^2} \end{pmatrix} \cdot (E)$$

Кроме того, для решения необходимо задать матрицу-столбец начальных условий, значения которой равны установившимся значениям токов $\boldsymbol{i_1}$ и $\boldsymbol{i_2}$ до размыкания ключа ***K***:

$$(x_0) = \begin{pmatrix} \dfrac{E}{R_1} \\ \dfrac{E}{R_2 + R_H} \end{pmatrix}$$

Было проведено расчетное исследование работы модели бесконтактного размыкателя цепей постоянного тока с параметрами:

E=5 В, L_1=0.758 Гн, R_1=104.8 Ом, L_2=0.03 Гн, R_2=10.6 Ом, R_3=100000 Ом,

M=0.113 Гн. Параметры нагрузки**:** L_H=3.37 Гн, R_H=44.5 Ом.

Установившееся значение тока в нагрузке перед коммутацией составило $\boldsymbol{i_2} = 90.7$ мА, ток первичной обмотки $\boldsymbol{i_1} = 47.7$ мА.

Дифференциальные уравнения переменных состояния цепи:

$$\begin{pmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.893 \cdot 10^5 & -55.428 \\ -5.323 \cdot 10^5 & -506.571 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 7.12 \\ 53.019 \end{pmatrix} \cdot (5)$$

Матрица-столбец начальных условий: $(x_0) = \begin{pmatrix} 0.0477 \\ 0.0907 \end{pmatrix}$

График тока $\boldsymbol{i_2}$ переходного процесса приведен на рис. 2. Ток $\boldsymbol{i_2}$ практически мгновенно переходит через нулевое значение, бросок тока составил $\Delta \boldsymbol{i_2} = 172.7$ мА, минимальное значение, $\boldsymbol{i_{2min}} = -82$ мА. В момент времени t_1 ток i_2 вновь переходит через нулевое значение и длительность отрицательной части импульса тока составляет $\Delta t = 0.48$ мс. На интервале времени $0 \le t \le t_1$ происходит запирание тиристора ***VS*** и отключение нагрузки от источника ЭДС ***E***.

Экспериментальные исследования модели размыкателя цепей постоянного тока с такими же параметрами были проведены на лабораторном стенде. Для измерения импульса

тока $\boldsymbol{i_2}$ был использован токоизмерительный шунт $R_{ш}$=10 Ом, коэффициент трансформации трансформатора тока составил $\boldsymbol{n}$ = 3.

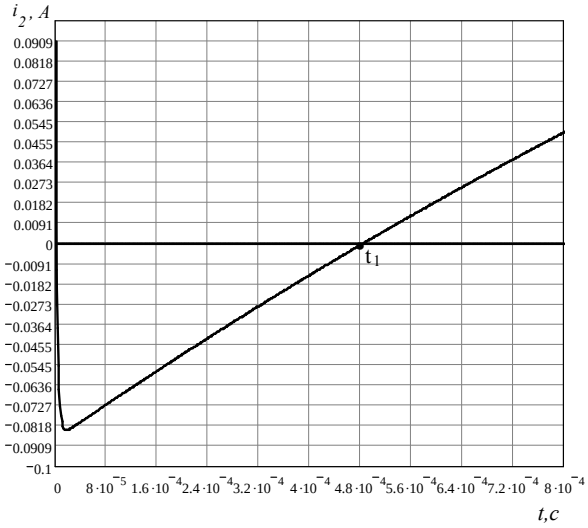

Рис. 2. Расчетный график тока переходного процесса в нагрузке

Установившееся значение тока в нагрузке перед коммутацией составило $\boldsymbol{i_2} = 88.6$ мА, ток первичной обмотки $\boldsymbol{i_1} = 46.8$ мА. Осциллограмма тока $\boldsymbol{i_2}$ показана на рис. 3. При размыкании ключа $\boldsymbol{K}$ бросок тока во вторичной обмотке составил $\Delta \boldsymbol{i_2} \approx 178.6$ мА, ток $\boldsymbol{i_2}$ переходит через нулевое значение до минимальной величины $\boldsymbol{i_{2min}} \approx -90$ мА, длительность отрицательной части импульса тока составила $\Delta t \approx 0.6$ мс .

Таким образом, экспериментальные исследования лабораторной модели размыкателя цепей постоянного тока практически полностью совпадают с расчетными результатами, что подтверждает эффективность его работы и предполагает возможность расчета и применения такого устройства для коммутации сильноточных цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой.

40 мА/дел

0.4 мс/дел

Рис. 3. Осциллограмма тока переходного процесса в нагрузке

Выводы

1. Разработан бесконтактный размыкатель цепей постоянного тока, способный коммутировать силовые цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой путем размыкания слаботочной цепи постоянного тока, величина которого в несколько раз меньше тока нагрузки.
2. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитать ток переходного процесса в нагрузке методом переменных состояния при известных параметрах бесконтактного размыкателя и параметрах нагрузки.
3. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования лабораторной модели бесконтактного размыкателя цепей постоянного тока показывают хорошую сходимость результатов и возможность расчета и применения такого устройства для коммутации сильноточных цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой или с внутренней индуктивностью.

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. - М. : Высшая школа, 1996. – 638 с.
2. Демирчан К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. - М. : Высшая школа, 1988. – 335 с.
3. Егоров О.Г. Способ бездугового переключения тока накачки индуктивного накопителя энергии на нагрузку : патент РФ № 2131635.1999. Бюл. № 32.
4. Пичугина М.Т. Мощная импульсная энергетика. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2005. – 96 с.
5. Пустынников С.В. Бесконтактный размыкатель цепей постоянного тока : патент РФ № 12082.2012. Бюл. № 27.

Рецензенты:

Новиков С.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

Канев Ф.Ю., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск.