

Д. Е. ДУЛЕПОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕГУЛИРУЕМЫХ УСТАНОВКАХ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Ключевые слова: демпфирующий резистор, конденсаторная установка, коэффициент перенапряжений, переходный процесс, реактивная мощность.

Аннотация. Приведена схема установки поперечной емкостной компенсации. Рассмотрены причины возникновения переходных процессов в тяговой сети переменного тока. Дано описание и алгоритм работы программы для анализа переходных процессов при включении установки поперечной емкостной компенсации в три этапа.

Конденсаторные установки поперечной емкостной компенсации (КУ) в системе тягового электроснабжения железных дорог позволяют повысить пропускную способность за счет повышения напряжения в тяговой сети до нормируемых значений, а также позволяют нормализовать баланс по реактивной мощности и снизить потери энергии от перетоков реактивной мощности [1, с. 12].

При включении установки в цепи будет проходить переходный процесс, во время которого напряжение на конденсаторе и ток через конденсатор могут значительно превосходить свои значения в установившемся режиме более чем на 70–100 %. Такие колебания напряжения на емкостном элементе недопустимы, т. к. это ведет к ускоренному их износу и снижению надежности работы установки в целом [2, с. 67].

Коммутационные перенапряжения при включении КУ можно снизить, если при подключении КУ к сети последовательно с конденсатором и реактором включать демпфирующий (балластный) резистор, как показано на рисунке 1. Лучшие результаты можно получить, если шунтировать демпфирующий резистор по частям с помощью двух выключателей.

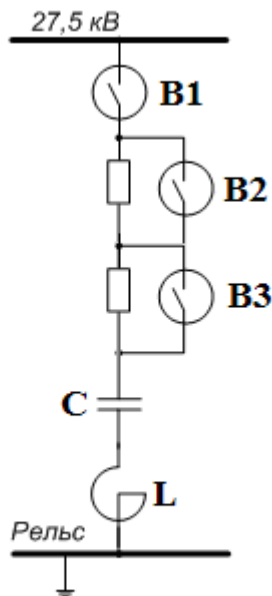


Рисунок 1 – Схема включения КУ в три этапа

Для определения мгновенных и максимальных значений тока и напряжения на конденсаторе установки поперечной компенсации реактивной мощности при подключении ее к питающей сети в три этапа разработана программа KUPER – 1, которая является расширением интегрированного математического пакета MathCad [3, с. 30].

Описание и алгоритм работы программы представлены ниже.
Программа KUPER – 1

$$\underline{R} := \begin{pmatrix} 70 \\ 30 \\ 2.4 \end{pmatrix}$$

$$r := R_2$$

$$U := 27500$$

Вектор активных сопротивлений в цепи КУ на первом, втором и третьем этапах включения

Активное сопротивление в цепи КУ на третьем этапе включения

Действующее значение напряжения питающей

$$\text{psi} := \frac{90 \cdot \pi}{180}$$

$$u(t) := \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(314t + \text{psi})$$

$$\underline{C} := 12.02 \cdot 10^{-6}$$

$$X_c := \frac{1}{314C}$$

$$\underline{L} := 0.09$$

$$X_L := 314L$$

Вспомогательная функция, задающая время переключения ступеней активных сопротивлений

$$T2 := 0,056$$

$$T3 := 0,146$$

$$R(t) := \text{if}(t < T2, R_0, \text{if}(t < T3, R_1, R_2))$$

$$\underline{I_m} := \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{(r)^2 + (X_L - X_c)^2}}$$

$$U_{Cm} := X_c \cdot I_m$$

$$x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$D(t, x) := \begin{pmatrix} \frac{u(t) - R(t) \cdot x_0 - x_1}{L} \\ \frac{1}{C} x_0 \end{pmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(x, 0, 0.2, 2000, D)$$

$$n := 0..2000$$

$$i_n := Z_{n, 1}$$

сети

Перевод начальной фазы питающего напряжения в радианную меру

Мгновенное значение напряжения питающей сети

Емкость батареи конденсаторов КУ, мкФ

Емкостное сопротивление батареи конденсаторов, Ом

Индуктивность реактора, Гн

Индуктивное сопротивление реактора, Ом

Время переключения ступеней, с

Амплитудное значение установившегося тока, А

Амплитудное значение установившегося напряжения на конденсаторе, В
Вектор начальных условий: x_0 – ток, x_1 – напряжение на конденсаторе

Вектор производных

Решение методом Рунге – Кутты

количество точек на всем диапазоне решения

полная матрица токов на всем диапазоне решения

```

unn := Zn, 2
k := 0 .. 10000 T2
l := 10000 · T2 + 1 .. 10000 · T3
u1k := Zk, 2 u2l := Zl, 2
u3m := Zm, 2 i1k := Zk, 1 i2l := Zl, 1
i3m := Zm, 1

```

полная матрица напряжений на всем диапазоне
 количество точек на первом этапе включения
 количество точек на втором этапе включения

Матрицы напряжений и токов на первом, втором и третьем этапах включения

Вспомогательные функции выделения максимальных значений токов и напряжений на первом, втором и третьем этапах включения

```

UCM1k := max(u1) UCM2k := min(u1)
UCM1 := if (|UCM1k| > |UCM2k|, UCM1k, |UCM2k|)
UCM1l := max(u2) UCM2l := min(u2)
UCM2 := if (|UCM1l| > |UCM2l|, UCM1l, |UCM2l|)
UCM1m := max(u3) UCM2m := min(u3)
UCM3 := if (|UCM1m| > |UCM2m|, UCM1m, |UCM2m|)
iCM1k := max(i1) iCM2k := min(i1)
iCM1 := if (|iCM1k| > |iCM2k|, iCM1k, |iCM2k|)
iCM1l := max(i2) iCM2l := min(i2)
iCM2 := if (|iCM1l| > |iCM2l|, iCM1l, |iCM2l|)
iCM1m := max(i3) iCM2m := min(i3)
iCM3 := if (|iCM1m| > |iCM2m|, iCM1m, |iCM2m|)

```

Расчет коэффициентов перегрузки по току и по напряжению на первом, втором и третьем этапах включения

$ki1 := \frac{iCM1}{Im}$	$ki2 := \frac{iCM2}{Im}$	$ki3 := \frac{iCM3}{Im}$
$ku1 := \frac{UCM1}{UCm}$	$ku2 := \frac{UCM2}{UCm}$	$ku3 := \frac{UCM3}{UCm}$
$ki1 = 1.576$	$ki2 = 1.213$	$ki3 = 1.124$
$ku1 = 0.959$	$ku2 = 1.058$	$ku3 = 1.089$
$iCM1 = 258.9$	$iCM2 = 199.265$	$iCM3 = 184.1$

$UCM1 = 4.174 \times 10^4$ $UCM2 = 4.607 \times 10^4$ $UCM3 = 4.741 \times 10^4$

$U_{nn} := \sqrt{2} \cdot 27500 \sin\left(\frac{n}{2000} 20 \cdot \pi + \psi_i\right)$ Функция для построения кривой питающего напряжения

Чтобы подключить разработанную программу, необходимо сначала запустить оболочку MathCad и затем предлагаемую программу.

Далее вводятся значения активных сопротивлений в цепи КУ в каждом этапе включения. Значения вводятся в виде матрицы R . Далее вводятся параметры КУ: действующее значение питающего напряжения и его начальная фаза, а также емкость батареи конденсаторов и индуктивность реактора.

Время T_2 переключения второй и T_3 третьей ступеней задается с помощью функции условного перехода if . Далее задается вектор x начальных условий и вектор $D(t,x)$ первых производных искомых величин – тока (компьютерная переменная x_0) и напряжения (компьютерная переменная x_1).

Для решения системы дифференциальных уравнений, записанных в форме Коши численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка использована функция $rkfixed$, интегрирующая дифференциальные уравнения с постоянным шагом. В скобках функции перечисляются через запятую: вектор начальных условий, начальная и конечная точка интервала интегрирования, число точек, не считая нулевой точки, и первые производные искомых функций.

Решение получается в виде матрицы Z , содержащей $2+1=3$ столбца. Первый столбец матрицы соответствует времени, второй – току i , третий – напряжению u_C .

Далее полученная матрица разбивается на шесть матриц – три матрицы тока и три матрицы напряжения по числу ступеней включения КУ. После этого с помощью вспомогательных функций $iCM1$, $iCM2$ и $iCM3$, а также $UCM1$, $UCM2$ и $UCM3$ находят максимальные значения токов и напряжений в каждом этапе включения КУ для каждой из шести матриц. Затем вычисляют коэффициенты перегрузки по току и по напряжению [4, с. 41].

Таким образом, программа позволяет: определить мгновенные и максимальные значения тока и напряжения на конденсаторе установки поперечной компенсации реактивной мощности при подключении ее к питающей сети в три этапа, а также определить коэффициенты перегрузки по току и по напряжению для каждого этапа включения.

С помощью предлагаемой программы можно оптимизировать следующие параметры КУ: значение демпфирующего резистора для первого и второго этапов включения КУ и моменты их шунтирования. Это позволит сделать коэффициенты перегрузки по току и по напряжению минимальными и тем самым увеличить эксплуатационную надежность КУ. Это становится актуальным в связи с тем, что в настоя-

щее время для эффективной работы КУ при резко неравномерных нагрузках их приходится переводить из нерегулируемого режима работы в режим дискретного регулирования, то есть часто включать и отключать. Такой режим работы отрицательно сказывается на надежности КУ. Поэтому требуется оптимизация значений демпфирующих резисторов и моментов их шунтирования [5, с. 22].

В результате проведенных исследований с помощью KUPER-1 было точно определено значение демпфирующих резисторов и значения перенапряжений при включении КУ в три этапа, а именно при значении демпфирующего резистора $R_g = 73 \text{ Ом}$ коэффициенты перенапряжения при первой и второй коммутациях будут равны 1,05. Оставшаяся часть сопротивления демпфирующего резистора будет равна $0,32 \cdot 73 = 23 \text{ Ом}$. В относительных единицах для трехэтапного включения сопротивление демпфирующего резистора следует брать равным 0,85 от волнового сопротивления КУ, а после второго этапа оставлять 0,25–0,3 от волнового сопротивления. Перенапряжения в этом случае не превосходят 5 % от номинального значения напряжения на конденсаторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берковский А. М., Лысков Ю. И. Мощные конденсаторные батареи. М.: Энергия, 1967. 168 с.
2. Бородулин Б. М., Герман Л. А., Николаев Г. А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. 183 с.
3. Герман Л. А. Поперечная емкостная компенсация в тяговой сети железных дорог. Промышленная энергетика. № 10. 2009. С. 30–35.
4. Герман Л. А., Серебряков А. С., Кващук В. А., Бренков С. Н. Синхронизированные выключатели для регулирования поперечной емкостной компенсации. Локомотив № 1. 2011. С. 41–43.
5. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации, ЦЭ-462, М.: МПС РФ 1997, 79 с.

STUDY OF TRANSITION PROCESSES IN CONTROLLED PLANTS OF CAPACITIVE COMPENSATION OF REACTIVE POWER

Keywords: reactive power, capacitor installation, transition, damping resistor, ratio surge.

Annotation. Article Shows the setup of transverse capacitive compensation. It consists the reasons for the occurrence of transients in the AC traction. There is the description of the algorithm and the program for the analysis of transients when the installation of lateral capacitive compensation in three stages.

ДУЛЕПОВ ДМИТРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – аспирант кафедры «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, Россия, Княгинино (dulepov.86@mail.ru).

DULEPOV DMITRIY EVGENIEVICH – postgraduate of the department «Electrification and Automation», Russia, Knayginino, (dulepov.86@mail.ru).
