

РЕАКТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИСТОЧНИКОВ ТОКА В ИСТОЧНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ

С. П. КОНОНОВ, А. С. БЕЛОКОПЫТОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

В литературе достаточно хорошо описаны реактивные (индуктивно-емкостные) преобразователи источников напряжения в источники тока (схемы БУШЕРО). Им посвящено много статей [1, 2] и др. и даже целые монографии [3]. Это объясняется перспективностью таких схем в импульсной электроэнергетике в качестве промежуточных устройств при зарядке емкостных накопителей от сети переменного напряжения.

В соответствии с принципом дуальности можно утверждать, что существуют схемы, дуальные схемам БУШЕРО, которые также могут быть использованы в технике. Анализ таких схем, позволяющих преобразовать источник тока в источник напряжения, и посвящена настоящая статья. В известной авторам литературе существует лишь упоминание о подобных схемах, но их анализ отсутствует.

Процессы в первой из схем (рис. 1), подключенной к источнику тока $\dot{I}$, описываются следующими выражениями:

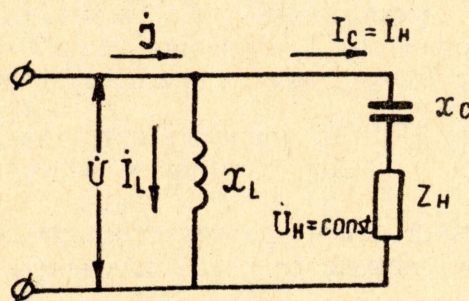


Рис. 1

Напряжение на выходе —

$$U = \dot{I} \frac{jX_L(Z_N - jX_C)}{Z_N + j(X_L - X_C)},$$

ток индуктивности —

$$\dot{I}_L = \dot{I} \frac{Z_N - jX_C}{Z_N + j(X_L - X_C)},$$

ток нагрузки —

$$\dot{I}_N = \dot{I} \frac{jX_L}{Z_N + j(X_L - X_C)},$$

напряжение на емкости —

$$U_c = I \frac{x_L x_c}{z_H + j(x_L - x_c)},$$

напряжение на нагрузке —

$$U_H = I \frac{x_L z_H}{z_H + j(x_L - x_c)}.$$

Если $x_L = x_c = x$, тогда имеем

$$\dot{U} = I \left(jx + \frac{x^2}{z_H} \right), \quad \dot{I}_L = I \left(1 - j \frac{x}{z_H} \right), \quad \dot{I}_H = I j \frac{x}{z_H},$$

$$\dot{U} = I \frac{x^2}{z_H}, \quad \dot{U}_H = I j x.$$

Видно, что при $x_L = x_c$ напряжение нагрузки не зависит от ее сопротивления. Это объясняется автоматическим увеличением тока при снижении сопротивления нагрузки. Анализ векторной диаграммы (рис. 2)

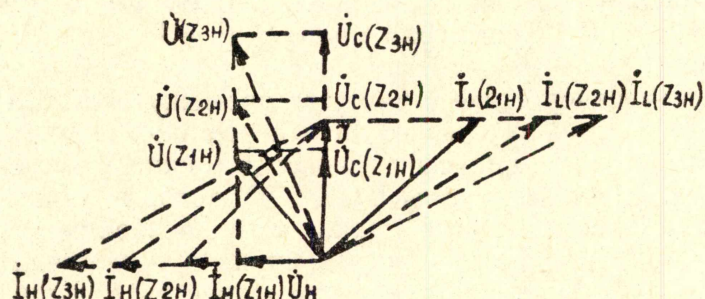


Рис. 2

для случая, когда $x_L = x_c = x$, при трех различных сопротивлениях нагрузки z_H подтверждает высказанные соображения. Видно, что напряжение нагрузки, опережающее ток I источника на $\pi/2$, неизменно. Изменение же сопротивления z_H влияет лишь на ток нагрузки и напряжение на других элементах схемы. Полная мощность нагрузки $S = \dot{U}_H \dot{I}_H$ равна активной и определяется как сопротивлением нагрузки, так и током источника.

Такая схема может найти практическое применение, например, для зарядки индуктивных накопителей L_H , включенных вместо сопротивле-

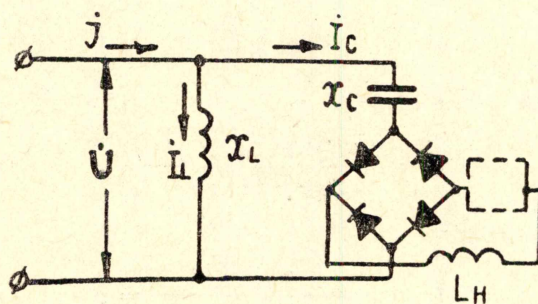


Рис. 3

ния z_H (рис. 3). Преимуществом схемы является возможность получения в индуктивности тока, значительно превышающего ток источника. Тео-

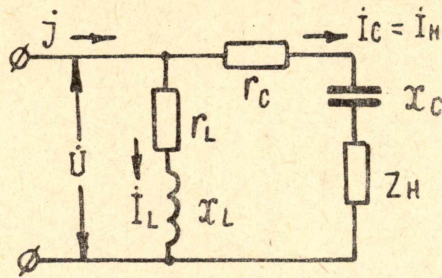


Рис. 4

ретиически при наличии идеальных элементов зарядный ток может возрасти до бесконечно большой величины даже при питании от источника незначительного тока.

В реальной схеме (рис. 4) потерями энергии в индуктивности и емкости контура пренебречь нельзя. В этом случае имеем

$$\dot{U} = \dot{I} \frac{r_L z_H + r_C r_L + x_C x_L + j(x_L r_C - x_C r_L + z_H x_L)}{x_L + r_C + z_H + j(x_L - x_C)},$$

$$\dot{I}_L = \dot{I} \frac{z_H + r_C - jx_C}{r_L + r_C + z_H + j(x_L - x_C)}, \quad \dot{I}_H = \dot{I} \frac{r_L + jx_L}{r_L + r_C + z_H + j(x_L - x_C)},$$

$$\dot{U}_C = \dot{I} \frac{x_L x_C - j r_L x_C}{r_L + r_C + z_H + j(x_L - x_C)}, \quad \dot{U}_H = \dot{I} z_H \frac{r_L + jx_L}{r_L + r_C + z_H + j(x_L - x_C)}.$$

Если $x_L = x_C = x$, тогда

$$\dot{U} = \dot{I} \frac{r_L z_H + r_C r_L + x^2 + j(r_C - r_L + z_H)}{r_C + r_L + z_H},$$

$$\dot{I}_H = \dot{I} \frac{r_L + jx}{r_L + r_C + z_H}, \quad \dot{U}_H = \dot{I} z_H \frac{r_L + jx}{r_L + r_C + z_H}.$$

Видно, что в таком, неидеальном, случае напряжение на нагрузке уже зависит от его сопротивления z_H , увеличиваясь при росте последнего. Только при $r_L + r_C \ll |z_H|$ напряжение на нагрузке практически постоянно, а ток изменяется обратно пропорционально сопротивлению нагрузки.

Существует и другая разновидность подобного однофазного реактивного преобразователя (рис. 5), когда сопротивление нагрузки вклю-

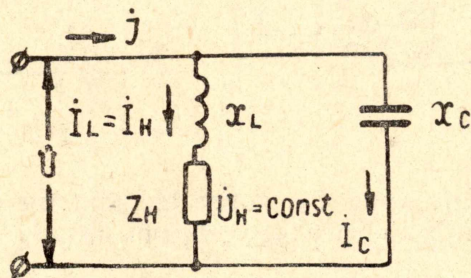


Рис. 5

чено последовательно с индуктивностью параллельного контура. В этом случае на зажимах z_H также сохраняется неизменное напряжение, если она подключена к источнику тока $\dot{I}$. При этом имеем

$$\begin{aligned}\dot{U} &= -Ijx_c \frac{z_H + jx_L}{z_H + j(x_L - x_c)}, \quad \dot{I}_c = I \frac{z_H + jx_L}{z_H + j(x_L - x_c)}, \\ \dot{I}_H &= -Ijx_c \frac{1}{z_H + j(x_L - x_c)}, \quad \dot{U}_L = I \frac{x_L x_c}{z_H + j(x_L - x_c)}, \\ \dot{U}_H &= -Ij \frac{x_c z_H}{z_H + j(x_L - x_c)}.\end{aligned}$$

Если $x_L = x_c = x$, тогда находим, что

$$\begin{aligned}\dot{U} &= I \left(\frac{x^2}{z_H} - jx \right), \quad \dot{I}_c = I \left(1 + j \frac{x_c}{z_H} \right), \quad \dot{I}_H = -I \frac{jx}{z_H}, \\ \dot{U}_L &= I \frac{x^2}{z_H}, \quad \dot{U}_H = -Ijx.\end{aligned}$$

Характер процесса в системе удобно оценить, используя векторную диаграмму (рис. 6), построенную для трех различных сопротивлений z_H . Индуктивный накопитель L_H импульсной электроэнергетической системы и в этом случае также подключен вместо сопротивления z_H (рис. 7). Как и в предыдущей схеме, ток такого накопителя может быть значительно больше тока источника, что является положительным свойством системы.

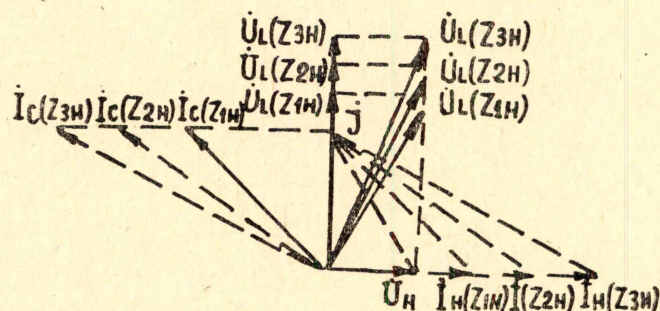


Рис. 6

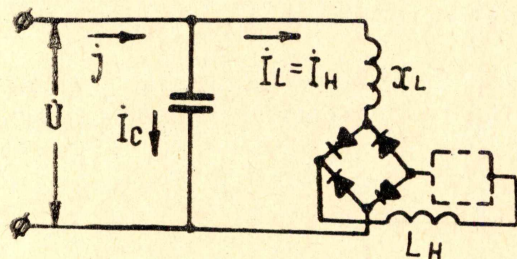


Рис. 7

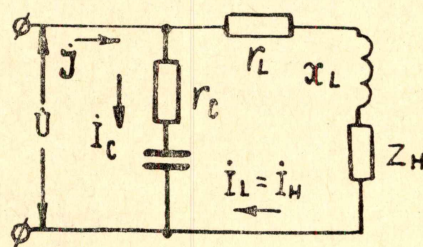


Рис. 8

В реальной схеме (рис. 8), когда активными сопротивлениями индуктивной и емкостной ветвей пренебречь нельзя, процессы описываются соотношениями

$$\begin{aligned}\dot{U} &= I \frac{r_c z_H + r_L r_c + x_L x_c + j(x_L r_c - r_L x_c - z_H x_c)}{r_c + r_L + z_H + j(x_L - x_c)}, \\ \dot{I}_c &= I \frac{r_L + jx_L + z_H}{r_c + r_L + z_H + j(x_L - x_c)}, \quad \dot{I}_H = I \frac{r_c - jx_c}{r_c + r_L + z_H + j(r_L - x_c)},\end{aligned}$$

$$\dot{U}_L = I j x_L \frac{r_c - j x_c}{r_c + r_L + z_H + j(x_L - x_c)}, \quad \dot{U}_H = I z_H \frac{r_c - j x_c}{r_c + r_L + z_H + j(x_L - x_c)}.$$

Если $x_L = x_c = x$, тогда имеем

$$\dot{U} = I \frac{r_c z_H + r_L r_c + x^2 + j x (r_c - r_L - z_H)}{r_c + r_L + z_H},$$

$$I_H = I \frac{r_c + j x}{r_c + r_L + z_H}, \quad \dot{U}_H = I z_H \frac{r_c - j x_c}{r_c + r_L + z_H}.$$

Видно, что в реальной схеме напряжение на нагрузке уже не постоянно. Оно зависит от сопротивления z_H , и лишь при $|z_H| \gg r_L - r_c$ напряжение на нагрузке близко к идеальному.

Анализ показывает, что помимо описанных может быть создано большое количество и других разновидностей реактивных преобразователей источников тока в источник напряжения: однофазные Т-образные и мостовые, с индуктивной связью и без нее, трехфазные.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. C. Green, I. B. Kuper. Constant Current Sources, Rev. Scient. Instruments. New-York, Vol. 11, 1940.
2. H. K. Lennings. Charging Large Capacitor Bank in Thermonuclear Research, Electric Eng., № 6, 1961.
3. А. Н. Милях, Б. Е. Кубышин, И. В. Волков. Индуктивно-емкостные преобразователи. Киев, 1967.