

АНАЛИЗ Т-ОБРАЗНЫХ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ CLL-СТРУКТУРЫ

В.П. Кабан, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Проведен анализ более 40 схем индуктивно-емкостных преобразователей, которые ранее не были исследованы. Полученные результаты дополняют каталог известных схем и дают возможность выбрать среди них наиболее оптимальную по стабилизирующим свойствам. Библ. 1, рис. 2, таблица.

Ключевые слова: индуктивность, емкость, преобразователь, напряжение, ток, стабилизация.

В современной электроэнергетике широко используются индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП) источников напряжения в источники тока. Исследованию ИЕП посвящено значительное количество научных работ в Украине, России, Грузии и других странах. Наибольшее количество работ посвящено разработке новых схем, анализу и оптимизации их по массогабаритным и другим показателям. В Институте электродинамики НАН Украины разработан метод построения схем ИЕП на основе однофазных эквивалентов, представляемых в виде активных четырехполюсников*, что позволило создать своеобразный каталог ИЕП, куда вошли известные схемы, а также значительное количество новых схем, произвести их сравнительный анализ и выдать рекомендации по их применению. В работе созданы и проанализированы возможные варианты построения схем ИЕП на основе Г-, Т-, П-образных и мостовой структур активных четырехполюсников, причем при построении и анализе преобразователей Т-образной структуры не рассматривался вариант, состоящий из конденсаторной батареи и двухобмоточного дросселя, обе обмотки которого включены в нагрузочный контур. По терминологии* эти ИЕП относятся к структуре вида CLL. Обобщенный однофазный эквивалент рассматриваемых схем показан на рис. 1. Таким образом, проведенный анализ и оптимизация схем ИЕП Т-образной структуры* являются неполными, что в свою очередь не позволяет сделать окончательный вывод по эффективности применения той или иной схемы в конкретном электротехническом устройстве. Настоящая статья дополняет проведенные исследования и устраняет указанные недостатки.

Однофазный эквивалент (рис. 1) представлен в виде активного четырехполюсника, на входе которого действует ЭДС \dot{E}_1 , а на выход подключена нагрузка. Внутри четырехполюсника могут быть подключены другие ЭДС \dot{E}_2 и \dot{E}_3 , что не влияет на условие преобразования источника напряжения в источник неизменного тока. Применительно к трехфазной системе питающих напряжений на входе четырехполюсника всегда подключена ЭДС фазы А, а

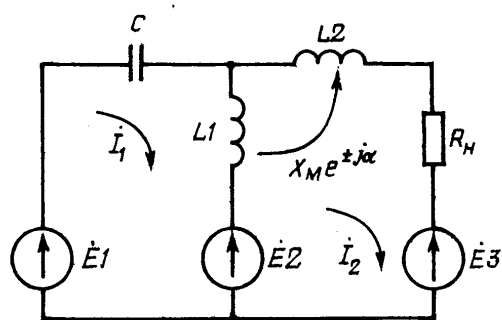


Рис. 1

внутри могут быть подключены в различных сочетаниях ЭДС фаз В и С. Возможные варианты подключения и значения ЭДС для трехфазной сети представлены в таблице. Из нее видно, что возможны семь вариантов реализации преобразователей. Переход от однофазного эквивалента к реальной схеме преобразователя осуществляется путем соединения однофазных структур каждой из трех фаз и последующего соединения точек равного потенциала. Для удобства последующих вычислений в последних двух колонках таблицы представлены значения контурных ЭДС. Индексы возле контурных ЭДС соответствуют при-

нятым на рис. 1 обозначениям: 1 – для входного контура и 2 – для контура нагрузки.

Номер варианта	$\dot{E}1$	$\dot{E}2$	$\dot{E}3$	$U_1 e^{j\varphi^1}$	$U_2 e^{j\varphi^2}$
1	U	0	0	U	0
2	U	Ue^{j240°	Ue^{j120°	$\sqrt{3}Ue^{j30^\circ}$	$\sqrt{3}Ue^{j270^\circ}$
3	U	Ue^{j120°	Ue^{j240°	$\sqrt{3}Ue^{-j30^\circ}$	$\sqrt{3}Ue^{j90^\circ}$
4	U	Ue^{j240°	0	$\sqrt{3}Ue^{j30^\circ}$	Ue^{j240°
5	U	Ue^{j120°	0	$\sqrt{3}Ue^{-j30^\circ}$	Ue^{j120°
6	U	0	Ue^{j240°	U	Ue^{j60°
7	U	0	Ue^{j120°	U	Ue^{-j60°

Дальнейшие исследования будем вести, предполагая, что исследуемые схемы содержат трехфазный линейный дроссель с двумя обмотками, выполненный на трех отдельных магнитопроводах, причем на одном магнитопроводе могут располагаться обмотки, принадлежащие разным фазам. Коэффициент магнитной связи (K_{CB}) между обмотками в этом случае имеет вид комплексной величины* с аргументом α , который представляет собой угол между векторами токов, протекающих в обмотках расположенных на одном и том же магнитопроводе. Предположим, что коэффициент связи между обмотками равен единице, тогда в трехфазной цепи возможно шесть вариантов соединения обмоток, что соответствует значениям аргумента, равным 0, 60, 120, 180, 240, 300 эл. град. Вариант при 180 эл. град. и равных по величине реактивных сопротивлений обмоток исключается из рассмотрения, так как результирующее реактивное сопротивление дросселя в этом случае стремится к нулю. Остается пять значений аргумента, которым соответствуют пять однофазных эквивалентов, а следовательно, и пять реальных трехфазных схем ИЕП. Кроме того, между обмотками может отсутствовать магнитная связь ($K_{CB} = 0$), чему соответствует вариант выполнения обмоток $L1$ и $L2$ на отдельных магнитопроводах. Таким образом, для каждого из семи вариантов подключения ЭДС возможны шесть вариантов выполнения в зависимости от значения коэффициента связи между обмотками, то есть на основе одной и той же структуры (рис. 1) можно вести анализ 42-х различных схем ИЕП.

Для удобства идентификации схем воспользуемся принятым правилом*, в соответствии с которым каждой схеме присваивается индекс, где сначала в обозначении идет перечисление элементов в ветвях схемы, причем первым обозначается элемент, входящий в первую (рис. 1) горизонтальную ветвь схемы, затем элемент, входящий в вертикальную ветвь, и затем элемент второй горизонтальной ветви. Далее, после тире, стоит цифра, обозначающая номер варианта подключения ЭДС питающей сети согласно таблице, и еще через тире – значение аргумента в электрических градусах. Например, индекс $CLL-3-60$ обозначает схему, выполненную в соответствии с рис. 1, у которой ЭДС питающей сети подключены по третьему варианту, а угол междуфазной магнитной связи между обмотками составляет 60 эл. град. Индексы схем, у которых магнитная связь между обмотками отсутствует, содержат только элементы структуры и номер варианта подключения ЭДС.

При анализе схем принято ряд допущений: считается, что дроссель линейный и реактивные сопротивления обмоток равны между собой, а активные сопротивления равны нулю. Кроме того, система питающих напряжений симметрична, а нагрузка носит чисто активный характер. При таких допущениях матричное уравнение, описывающее схему, представленную на рис. 1, имеет следующий вид:

* См. сноску стр. ...

$$\begin{vmatrix} U_1 e^{j\varphi_1} \\ U_2 e^{j\varphi_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X + X_C & -X - X_M e^{j\alpha} \\ -X - X_M e^{-j\alpha} & 2X + 2X_M \cos \alpha + R_H \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{vmatrix}.$$

Отсюда контурные токи определяются выражениями

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{U_1 e^{j\varphi_1} (2X + 2X_M \cos \alpha + R_H) + U_2 e^{j\varphi_2} (X + 2X_M e^{j\alpha})}{X^2 - X_M^2 + 2X_C (X + X_M \cos \alpha) + R_H (X + X_C)}; \\ \dot{I}_2 &= \frac{U_1 e^{j\varphi_1} (X + X_M e^{-j\alpha}) + U_2 e^{j\varphi_2} (X + X_C)}{X^2 - X_M^2 + 2X_C (X + X_M \cos \alpha) + R_H (X + X_C)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Токи в ветвях схемы $\dot{I}_C = \dot{I}_1$;

$$\dot{I}_{L1} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = \frac{U_1 e^{j\varphi_1} (X + X_M e^{j\alpha} + R_H) - U_2 e^{j\varphi_2} (X_C - X_M e^{j\alpha})}{X^2 - X_M^2 + 2X_C (X + X_M \cos \alpha) + R_H (X + X_C)};$$

$$\dot{I}_H = \dot{I}_{L2} = \dot{I}_2,$$

где \dot{I}_H – ток нагрузки.

Из выражения (1) определяем условие независимости тока в нагрузке от величины ее сопротивления

$$X + X_C = 0. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что введение магнитной связи между обмотками, включенными в контур нагрузки, не влияет на условие стабилизации тока. Рассмотрим два предельных случая, когда сопротивление взаимоиндуктивной связи равно индуктивному сопротивлению обмотки ($K_{CB} = 1$) и равно нулю ($K_{CB} = 0$).

Как уже отмечалось, для данной структуры существует семь вариантов подключения ЭДС питающей сети, кроме того, для каждого из вариантов возможно пять значений угла междуфазной магнитной связи α , в соответствии с различными способами расположения обмоток дросселя на магнитопроводе той или иной фазы. Таким образом, на основе данной структуры можно производить анализ 35-ти различных схем ИЕП. Кроме того, эта же структура используется для анализа ИЕП, обмотки дросселя которого не имеют магнитной связи. Таких схем всего семь – в соответствии с вариантами подключения ЭДС питающей сети. В итоге данная структура позволяет получить обобщенные выражения, пригодные для вычисления величины токов в элементах 42-х схем ИЕП, для этого в обобщенные формулы необходимо подставить значения контурных ЭДС в соответствии с таблицей и значение угла электромагнитной связи между обмотками.

Рассмотрим вначале схемы с магнитной связью между обмотками. Они идентифицируются углом междуфазной магнитной связи и вариантом подключения ЭДС.

Выражения для токов в элементах схемы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= \frac{U_1 e^{j\varphi_1} [4e^{j90^\circ} \cos^2(-\frac{\alpha}{2}) + n] + U_2 e^{j(\varphi_2+90^\circ)} (1 + e^{j\alpha})}{4X \cos^2 \frac{\alpha}{2}}; \\ \dot{I}_{L1} &= \frac{U_1 e^{j\varphi_1} [e^{j90^\circ} (1 + e^{j\alpha}) + n] + U_2 e^{j(\varphi_2+90^\circ)} (1 + e^{j\alpha})}{4X \cos^2 \frac{\alpha}{2}}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_H = \dot{I}_{L2} = \frac{U_1 e^{j(\varphi_1 + 90^\circ)} (1 + e^{-j\alpha})}{4X \cos^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad (3)$$

где $n = \frac{R_H}{X}$ – относительное сопротивление нагрузки.

Ток намагничивания дросселя \dot{I}_0 определяется как геометрическая сумма токов, протекающих в его обмотках. Он необходим для определения габаритной мощности дросселя и последующего проектирования в конкретном устройстве:

$$\dot{I}_0 = \frac{U_1 e^{j\varphi_1} [e^{j90^\circ} (1 + e^{j\alpha}) + n] + U_2 e^{j(90^\circ + \varphi_2)} (1 + e^{j\alpha}) + U_1 e^{j(90^\circ + \varphi_1 + \alpha)} + U_1 e^{j(\varphi_1 + 90^\circ)}}{4X \cos^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

Из выражения (3) видно, что фаза тока нагрузки зависит от угла магнитной связи и от варианта подключения ЭДС питания.

Выражение для модуля тока нагрузки получим в следующем виде:

$$|\dot{I}_H| = \frac{U_1}{2X \left| \cos \frac{\alpha}{2} \right|}.$$

Из последнего выражения видно, что модуль тока нагрузки не зависит от варианта подключения ЭДС, а зависит лишь от величины угла межфазной магнитной связи α .

Одной из важных характеристик индуктивно-емкостного преобразователя является стабильность тока нагрузки, которая представляет собой отношение модуля тока текущей

нагрузки реального преобразователя (когда учитываются активные потери в дросселе) к модулю тока в режиме короткого замыкания. Данный параметр позволяет оценить величину отклонения тока нагрузки при изменении ее сопротивления. Для определения величины стабильности введем понятие добротности дросселя D , под которой будем понимать отношение величины индуктивного сопротивления катушки к активному ее сопротивлению, т.е. $D = X/R$.

Стабильность тока нагрузки, исходя из определения, найдем по

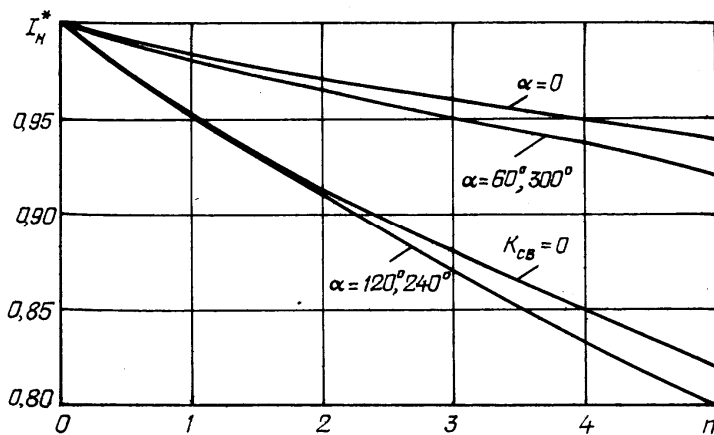


Рис. 2

следующему выражению:

$$i_H^* = \frac{2(1 + \cos \alpha)}{2(1 + \cos \alpha) + \frac{n}{D}}.$$

Для случая $D=20$ на рис. 2 представлены графики изменения величины модуля тока нагрузки от относительного сопротивления n и угла межфазной магнитной связи α .

Из рисунка видно, что лучшими стабилизирующими свойствами обладают схемы, у которых угол межфазной магнитной связи $\alpha = 0$. Следует отметить, что величина стабильности для конкретных схем может быть определена с учетом величины расчетного сопротивления нагрузки. Последнее выбирается исходя из оптимального значения установленной мощности

реактивных элементов ИЕП, однако для предварительной оценки данные, представленные на рисунке, являются вполне пригодными.

Рассмотрим случай, когда электромагнитная связь между обмотками отсутствует ($X = 0$). Таких схем ИЕП *CLL*-структуры всего семь, и отличаются они лишь вариантом подключения ЭДС питания. Условие независимости тока нагрузки от ее сопротивления остается таким же, как и в предыдущем случае, так как оно не зависит от коэффициента электромагнитной связи. Токи в ветвях схемы при выполнении условия $U \rightarrow I$ преобразования определяются следующими выражениями:

$$i_C = \frac{U_1 e^{j\varphi_1} (2e^{j90^\circ} + n) + U_2 e^{j(\varphi_2 + 90^\circ)}}{X};$$

$$i_{L1} = \frac{U_1 e^{j\varphi_1} (e^{j90^\circ} + n) + U_2 e^{j(\varphi_2 + 90^\circ)}}{X};$$

$$|i_H| = I_{L2} = \frac{U_1 e^{j(\varphi_1 + 90^\circ)}}{X}.$$

Модуль тока нагрузки $|i_H| = \frac{U_1}{X}$.

Величина модуля тока нагрузки зависит от варианта подключения ЭДС питания (в вариантах 2, 3, 4, 5 увеличивается в $\sqrt{3}$ раз). Стабильность в рассматриваемых схемах определяется выражением

$$I_H^* = \frac{1}{\sqrt{1 + 2n/D}}.$$

График $I_H^* = f(n)$ при $D = 20$ показан на рис. 2.

Проведенный анализ схем ИЕП *CLL*-структуры позволил получить в общем виде выражения, описывающие величину токов в элементах схемы. Они могут быть использованы при конкретном расчете и проектировании ИЕП.

Сравнительный анализ схем данной структуры по стабилизирующим свойствам позволил выбрать наиболее эффективные схемы с точки зрения стабилизации тока в нагрузке.

УДК 621.372.061

В.П. Кабан, канд. техн. наук

Институт електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Аналіз Т-подібних індуктивно-ємнісних перетворювачів *CLL*-структури

Проведено аналіз більш як 40 схем індуктивно-ємнісних перетворювачів, які раніше не були досліджені. Одержані результати доповнюють каталог відомих схем та дають змогу вибрати серед них найбільш оптимальну за стабілізуючими властивостями. Бібл. 1, рис. 2, таблиця.

Ключові слова: індуктивність, ємність, перетворювач, напруга, струм, стабілізація.

V.P. Kaban

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

T-type inductive-capacitive converters of *CLL*-structures analysis

The analysis of more than 40 schemes of inductance-capacitance converters that haven't been investigated earlier is made. The received results supplement the catalogue of known schemes and offer the opportunity to choose the most optimal ones according to their stabilizing properties. Reference 1, figures 2, table.

Key words: inductance, capacitance, converter, voltage, current, stabilization.

Надійшла 7.07.2011

Received 7.07.2011