

Розглянуто роботу резонансного інвертора з нелінійним управлінням, що поєднує переваги імпульсного регулювання та можливість перемикає силові ключі при нульових рівнях струму та напруги. Отримано функціонали несучих імпульсів та їх взаємозв'язок з бажаними характеристиками вихідної напруги. Сформульовано закон формування послідовності управляючих імпульсів для нелінійного управління резонансним інвертором. Визначено переключальну функцію, що відповідає отриманому закону. Проведено синтез нелінійної системи управління резонансним інвертором на основі використання цифрової системи. Побудовано імітаційну модель резонансного інвертора з нелінійним регулюванням для верифікації синтезованої системи управління, що показала відповідність отриманих характеристик вихідної напруги заданим. Бібл. 6, рис. 3.

Ключові слова: закон формування управляючих впливів, нелінійне управління, резонансний інвертор, синтез системи управління.

G.V. Pavlov, A.V. Obrubov, I.L. Vinnichenko

Institute of Automatics and Electrotechnics National University of Shipbuilding named by Admiral Makarov, Lenin pr., 3, Mykolaiv, 54048, Ukraine

Nonlinear control of the frequency converter's resonant inverter

Work of the resonant inverter with a nonlinear control, combining the advantages of pulse regulation and the ability to switch power switches at zero current and voltage states was examined. The functional of carrying pulses and its relationship with the desired characteristics of the output voltage were obtained. The law of the formation of the control pulses' sequence for controlling the nonlinear resonant inverter was formulated. The switching function, which corresponds to the formulated law, was defined. The synthesis of a nonlinear control system based on resonant inverter based on the digital system was conducted. The simulation model of the resonant inverter was designed for testing of the formulated control law, which showed correlation of the characteristics of the output voltage to the desired ones. References 6, figures 3.

Key words: the law of the control pulses' formation, nonlinear control, resonant inverter, synthesis of the control system.

Надійшла 26.05.2015

Received 26.05.2015

УДК 621.314.061

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ Г-ОБРАЗНЫХ СХЕМ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ CL-ВИДА ПО УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.М. Спирин, докт. техн. наук, **В.П. Кабан**, канд. техн. наук, **В.Ю. Матвеев**, канд. техн. наук, **В.Н. Губаревич**, канд. техн. наук, **Ю.В. Маруня**, инж. I-й кат.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина
e-mail: lotox@ied.org.ua

Проведен сравнительный анализ Г-образных схем индуктивно-емкостных преобразователей CL-вида по установленной мощности реактивных элементов с учетом характера нагрузки. Даны рекомендации по применению схем в зависимости от емкостной или индуктивной реакции нагрузки. Библ. 6, таблица.

Ключевые слова: индуктивно-емкостные преобразователи, установленная мощность, реактивные элементы.

Расчет и сравнительный анализ индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) на чисто активную нагрузку освещены в работе [1]. Как показано в работе [6], значения установленной мощности реактивных элементов схем ИЕП LC- и CL-видов значительно зависят от характера нагрузки. В связи с этим расчет схем Г-образных ИЕП CL-вида с учетом характера нагрузки был произведен в [5], но сравнительный анализ для таких схем по установленной мощности реактивных элементов, как одного из наиболее важных показателей, определяющих массогабариты и стоимость ИЕП, сделан не был. Поэтому для определения схемы с наименьшей установленной мощностью элементов в зависимости от характера нагрузки воспользуемся результатами, полученными в работе [5], используя допущения и обозначения, принятые в [4].

Абсолютное значение реактивной мощности элемента найдем как произведение квадрата модуля тока, протекающего через элемент, на его реактивное сопротивление. Для рассматриваемых схем эти выражения будут иметь следующий вид:

$$Q_L = I_L^2 x_L; \quad Q_C = I_C^2 x_C; \quad S_H = I_H^2 Z_H, \quad (1)$$

где Q_L, Q_C, S_H – абсолютные значения реактивных мощностей соответственно дросселя, конденсатора и полной мощности нагрузки; I_L, I_C, I_H – модули токов, протекающих через дроссель, конденсатор, нагрузку; x_L, x_C, Z_H – реактивное сопротивление дросселя, конденсатора и полное сопротивление нагрузки.

Подставляя в (1) выражения (1), (2) из работы [3] для ИЕП CL -вида, получаем следующие формулы:

$$Q_C = \frac{n^2 E_I^2 + 2nE_I^2 \sin \varphi_H - 2nE_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_H) + E_I^2 + E_{II}^2 + 2E_I E_{II} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{x}; \quad (2)$$

$$Q_L = \frac{n^2 E_I^2 - 2nE_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_H) + E_{II}^2}{x}; \quad (3)$$

$$S_H = \frac{E_I^2 n}{x}. \quad (4)$$

Однако мощность элементов, вычисленная по полученным выражениям, не дает однозначного ответа на вопрос – «какая из исследуемых схем лучше», ведь мощность, выделяющаяся в нагрузке, и мощность реактивных элементов зависит от значений относительно сопротивления нагрузки n , которые отличаются для разных схем. Обычно для сравнения схем используют понятие относительной мощности q , которая представляет собой отношение текущего значения реактивной мощности элемента к мощности нагрузки.

Для ИЕП CL -вида получим следующие формулы для относительных мощностей реактивных элементов:

$$q_C = \frac{Q_C}{S_H} = n + 2 \sin \varphi_H - 2 \frac{E_{II}}{E_I} \sin(\varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_H) + \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \frac{E_{II}^2}{E_I^2} + 2 \frac{E_{II}}{E_I n} \cos(\varphi_2 - \varphi_1); \quad (5)$$

$$q_L = n - 2 \frac{E_{II}}{E_I} \sin(\varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_H) + \frac{E_{II}^2}{E_I^2 n}, \quad (6)$$

где q_L – относительная мощность дросселя; q_C – относительная мощность конденсатора.

Полученные выражения дают возможность вычислить относительную мощность реактивных элементов при любом сопротивлении нагрузки. Очевидно, наиболее эффективно используются элементы ИЕП, если удельная мощность имеет минимальное значение. Значение сопротивления нагрузки, при котором достигается этот минимум, называют оптимальным (n_{opt}). Чтобы найти оптимальные значения, приравняем первые производные выражений (5) и (6) к нулю. Для определения оптимального значения сопротивления нагрузки при оптимизации реактивной мощности конденсаторной батареи вычислим первую производную от q_C по n и приравняем ее к нулю:

$$n_{opt}^C = \sqrt{1 + \frac{E_{II}^2}{E_I^2} + \frac{2E_{II}}{E_I} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (7)$$

Определение оптимального значения сопротивления нагрузки при оптимизации реактора ИЕП CL -вида производится аналогично и дает следующее соотношение:

$$n_{opt}^L = \frac{E_{II}}{E_I}. \quad (8)$$

Оптимальное значение сопротивления нагрузки следует принимать в качестве расчетного в том случае, если нагрузка не меняется. Если сопротивление нагрузки меняется в полном диапазоне, то целесообразно за расчетное значение использовать сопротивление, определенное в соответствии с алгоритмом, предложенным в [6], а именно определить оптимальное и максимальное значения сопротивления нагрузки и большее из них принять в качестве расчетного.

Определим зависимость установленных относительных мощностей реактора и конденсатора для ИЕП CL -вида от аргумента комплексной нагрузки. При полном диапазоне

изменения сопротивления нагрузки n максимальные значения сопротивлений n_{\max} найдем из выражений (2), (3), определив и приравняв мощности при $n = 0$ и при n_{\max} :

$$n_{\max}^C = 2 \left[\frac{E_{II}}{E_I} \sin(\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_H) - \sin \varphi_H \right], \quad (9)$$

$$n_{\max}^L = 2 \frac{E_{II}}{E_I} \sin(\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_H). \quad (10)$$

Подставив найденное расчетное сопротивление нагрузки в (5) и (6), определим установленную относительную мощность реактора и конденсатора для ИЕП CL -вида в зависимости от изменения аргумента нагрузки. Для рассматриваемых схем полученные данные представлены в таблице.

Из таблицы видно, что для различных схем ИЕП CL -вида при уменьшении аргумента комплексного сопротивления нагрузки от индуктивного до емкостного, относительная установленная мощность реактивных элементов изменяется в широких пределах. Зная характер и величину комплексного сопротивления нагрузки по представленным в таблице результатам, можно выбрать нужный вариант исполнения схемы ИЕП CL -вида.

Из представленных схем ИЕП наиболее интересной является схема $\Gamma 1-CL$, как формально эквивалентная схема ИЕП, выполненного на основе трансформатора с немагнитным зазором с включенной конденсаторной батареей в каждую фазу первичной обмотки [2]. Из таблицы видно, что для этой схемы установленная относительная мощность реактора остается неизменной при полном изменении аргумента нагрузки. Установленная относительная мощность конденсаторной батареи с увеличением индуктивного характера нагрузки возрастает, а с увеличением емкостного характера нагрузки уменьшается до нуля при $\varphi = 90^\circ$, что соответствует включению параллельно индуктивности ИЕП по схеме $\Gamma 1-CL$ конденсатора на резонансной частоте.

В работе [3] в качестве одной из оптимальных трехфазных схем ИЕП по массогабаритным, энергетическим и стабилизирующим свойствам определена схема $\Gamma 5-CL$. Для этой схемы наблюдаются увеличение установленной мощности конденсаторной батареи при увеличении значения индуктивной нагрузки и снижение этой мощности при росте емкостной нагрузки. Установленная относительная мощность реактора, наоборот, с увеличением индуктивной нагрузки уменьшается и возрастает при увеличении емкостной нагрузки.

Выводы. Приведенные формулы для определения модулей токов в элементах схем Γ -образной структуры ИЕП CL -вида с учетом характера нагрузки позволяют более точно вести расчет и проектирование ИЕП. Определена схема ИЕП $\Gamma 5-CL$, которая имеет минимальную мощность реактора при индуктивном характере нагрузки и минимальную мощность конденсатора при емкостном характере нагрузки.

№ варианта	Вид мощности	Аргумент комплексного сопротивления нагрузки, φ						
		90°	60°	30°	0°	-30°	-60°	-90°
1	\bar{Q}_L	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	\bar{Q}_C	4,0	3,73	3,0	2,0	1,0	0,27	0
2	\bar{Q}_L	1,0	2,0	3,0	3,73	4,0	3,73	3,0
	\bar{Q}_C	3,0	3,73	4,0	3,73	3,0	2,0	1,0
3	\bar{Q}_L	1,0	0,58	0,5	0,58	1,0	2,0	3,0
	\bar{Q}_C	3,0	2,0	1,0	0,58	0,5	0,58	1,0
4	\bar{Q}_L	0,33	0,58	1,16	1,73	2,16	2,31	2,16
	\bar{Q}_C	2,16	2,3	2,16	1,73	1,89	1,31	0,33
5	\bar{Q}_L	0,33	0,29	0,33	0,58	1,16	0,58	2,16
	\bar{Q}_C	2,16	1,73	1,16	0,58	0,33	0,29	0,33
6	\bar{Q}_L	3,0	2,0	1,0	0,58	0,5	0,58	1,0
	\bar{Q}_C	6,46	5,19	3,46	1,73	1,0	0,87	1,0
7	\bar{Q}_L	3,0	3,73	4,0	3,73	3,0	2,0	1,0
	\bar{Q}_C	6,47	6,92	6,47	5,2	3,47	1,72	1,0

1. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизация схем индуктивно-емкостных преобразователей. – К.: Наук. думка. – 1981. – 173 с.
2. Волков И.В., Губаревич В.Н., Чиженко А.И., Спиринов В.М. Зарядное устройство с совмещенным трансформатором-реактором индуктивно-емкостного преобразователя // Техн. электродинамика. Спец. вып. 2. «Силовая электроника и энергоэффективность». – 1998. – Т. 2. – С. 82–85.
3. Губаревич В.Н., Спиринов В.М., Кабан В.П. Алгоритм выбора схем индуктивно-емкостных преобразователей для источников питания электротехнологических установок. Стабилизированные источники питания для потребителей с переменной нагрузкой. – К.: Наук. думка. – 1984. – С. 47–53.
4. Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спиринов В.М. Расчет основных параметров индуктивно-емкостных преобразователей с учетом характера нагрузки // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2008. – Вип. 21. – С. 118–121.
5. Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спиринов В.М. Расчет схем Г-образных индуктивно-емкостных преобразователей СL-вида с учетом характера нагрузки // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2012. – Вип. 33. – С. 83–87.
6. Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спиринов В.М. Сравнительный анализ простейших схем индуктивно-емкостных преобразователей по установленной мощности реактивных элементов // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2009. – Вип. 24. – С. 94–99.

УДК 621.314.061

В.М. Спирін, докт. техн. наук, **В.П. Кабан**, канд. техн. наук, **В.Ю. Матвеев**, канд. техн. наук, **В.Н. Губаревич**, канд. техн. наук, **Ю.В. Маруня**, інж. І-ї кат.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Порівняльний аналіз Г-подібних схем індуктивно-ємнісних перетворювачів СL-виду за встановленою потужністю реактивних елементів

Проведено порівняльний аналіз Г-подібних схем індуктивно-ємнісних перетворювачів СL-виду за встановленою потужністю реактивних елементів з урахуванням характеру навантаження. Надано рекомендації щодо застосування схем залежно від ємнісної або індуктивної реакції навантаження. Бібл. 6, таблиця.

Ключові слова: індуктивно-ємнісні перетворювачі, встановлена потужність, реактивні елементи.

V.M. Spirin, V.P. Kaban, V.Yu. Matveev, V.N. Gubarevych, Yu.V. Marunya

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

A comparative analysis of G-shaped schemes of inductive-capacitive CL-type transducers for an installed capacity by reactive elements

A comparative analysis of the G-shaped schemes of inductive-capacitive CL-type transformers for an installed capacity by reactive elements, where considered the nature of the load, is done. Recommendations, for the application of schemes, which are based on capacitive or inductive load response, were issued. References 6, table.

Key words: inductive-capacitive transducers, an installed capacity, reactive elements.

Надійшла 21.04.2015

Received 21.04.2015

УДК 621.373:519.62

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СХЕМЕ МАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПРЯМЫХ ИМПУЛЬСОВ

В.И. Зозулев¹, канд. техн. наук, **Д.А. Шолох²**, канд. техн. наук, **А.И. Христо³**, мл. науч. сотр.

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

e-mail: dep8ied@ied.org.ua

3 – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,
пр. Октябрський, 43-А, Николаев-18, 54018, Україна

Проведено численне моделювання перехідних процесів в магнітно-полупроводниковому генераторі високовольтних імпульсів при варіації параметрами його зарядного контура, цепі подмагнічування і динамічної коефіцієнтної сили індуктивних елементів. Представлені графіки відповідуючих змінених індукції в цих елементах, токів і напруг в зв'язках компресії імпульсів, по котрим визначені межі частотних властивостей і стійкої роботи генератора. Бібл. 10, рис. 5.