

ПРОЕКТИРОВАНИЕ LCL-ФИЛЬТРА И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИНВЕРТОРА, ПОДКЛЮЧЕННОГО К ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Ю.И. Сысоева¹, П.В. Чусовитин²

uisysoeva@gmail.com

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. В данной работе представлена простая, систематизированная методология проектирования и расчета параметров LCL-фильтра для подключения трехфазного инвертора к энергосистеме. Основная цель применения LCL-фильтра заключается в снижении высших гармонических составляющих тока, которые возникают из-за быстро переключающихся транзисторов инвертора, создающих большие скачки напряжения. В ходе работы проведено сравнение двух топологий фильтра. Проектирование выполнено путем моделирования системы в среде MATLAB/Simulink и расчета различных режимов энергосистемы при подключении инвертора. Результатом работы является алгоритм, который демонстрирует этапы предлагаемой методологии проектирования LCL-фильтра. Этот алгоритм позволяет рассчитывать параметры LCL-фильтра в соответствии с входными данными управляемой системы.

Ключевые слова: фильтро-компенсирующее устройство (ФКУ), сетевой трехфазный инвертор, LCL-фильтр, энергосистема, автоматическое регулирование, широтно-импульсная модуляция.

LCL-FILTER DESIGN AND CONTROL FOR THREE-PHASE GRID-CONNECTED INVERTER

Yulia I. Sysoeva¹, Pavel V. Chusovitin²

uisysoeva@gmail.com

^{1,2} Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. This paper presents a simple, systematized methodology for designing and calculating the parameters of an LCL-filter for three-phase grid-connected inverter. The main purpose the LCL-filter is to reduce the higher harmonic components of the current that arise due to rapidly switching transistors of the inverter, creating large voltage surges. In this paper two filter topologies were compared. The design was carried out by modeling the system in MATLAB/Simulink and calculating the various states of the power system when inverter is connected to grid. The result is an algorithm that demonstrates tages of the proposed LCL-filter design methodology. This algorithm allows to calculate the parameters of the LCL-filter in accordance with the input data of the controlled system.

Keywords: passive filter design, three-phase inverter, grid-connected inverter (VSI), LCL filter, power system, pulse width modulation.

Введение

За последнее десятилетие активно развилось применение технологий Smart Grid и устройств FACTS, в совокупности с накопителями энергии, большинство из которых строятся на базе инверторов. Возобновляемые источники энергии тоже не могут быть внедрены без преобразователей, согласующих разнохарактерные источники питания.

Гармоники, возникающие из-за внутренних особенностей работы преобразователей, являются основным фактором, вызывающим проблемы с чувствительным оборудованием, системами релейной защиты и автоматики, телемеханики и связи. Помимо этого, возникает значительный экономический ущерб из-за снижения срока службы электрооборудования и надежности работы электросетей [1]. И поэтому коэффициент нелинейных искажений является важным фактором на этапе проектирования энергосистем. Поэтому для подавления возникающих гармоник применяются различные ФКУ.

L-фильтр или LCL-фильтр обычно подключается между инвертором и сетью для ослабления гармоник частоты переключения, создаваемых подключенным к сети инвертором. По сравнению с L-фильтром, LCL-фильтр обладает лучшей способностью ослабления гармоник высокого порядка и лучшей динамической характеристикой [2]. Чтобы избежать резонанса, который может возникнуть при применении LCL-фильтра, была рассмотрена топология фильтра с демпфированием.

Конструкция низкочастотного фильтра высокого порядка сложная, и для его корректной работы необходим алгоритм расчета параметров устройства, который будет представлен в данной работе.

I Описание системы, топология фильтра и аналитическое моделирование

Описание энергосистемы

Энергосистема состоит из трехфазного сетевого инвертора, работающего по алгоритму широтно-импульсной модуляции, LCL-фильтра, источника постоянного напряжения, который может представлять из себя либо массив фотоэлектрических панелей, либо ветряную турбину и т.д. Сеть моделируется как шина бесконечной мощности, к которой подключено две нагрузки через понижающий трансформатор. Параметры системы приведены в Табл. 1. Общая эквивалентная схема системы представлена на Рис. 1.

Таблица 1 – Исходные параметры системы

Линейное напряжение сети и на выходе инвертора	$U_{\text{сеть}}^{\text{л}} = U_{\text{инв}}^{\text{л}} = 400 \text{ В}$
Частота сети	$f_c = 50 \text{ Гц}$
Напряжение источника постоянного тока	$V_{DC} = 650 \text{ В}$
Номинальная активная мощность инвертора	$P_{\text{ном}} = 1000 \text{ Вт}$
Частота переключения инвертора	$f_{sw} = 10 \text{ кГц}$

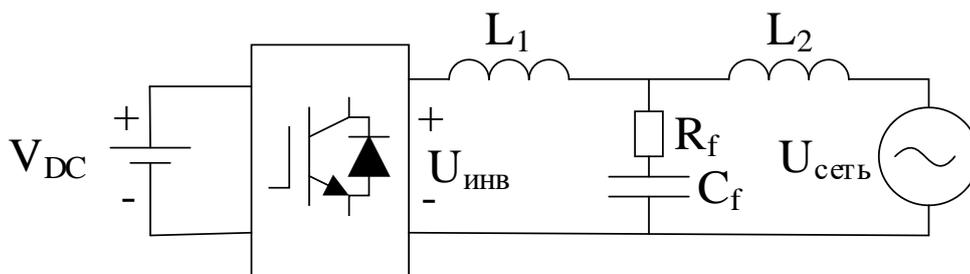


Рис. 1 – Общая эквивалентная схема

Топология фильтра

Как было сказано ранее, фильтр выполняет функцию подавления высокочастотных гармоник в линейном токе. Обычно фильтр состоит из комбинации катушек индуктивности и конденсаторов.

L-фильтр – это фильтр первого порядка. Его затухание составляет 20 дБ/дек во всем диапазоне частот, при правильно определенном значении индуктивности. При использовании этой топологии фильтра частота переключения преобразователя должна быть высокой, чтобы получить достаточное ослабление гармоник, создаваемых инвертором.

При использовании LCL-фильтра, резонансная частота, заданная уравнением (1), зависит только от значений компонентов фильтра.

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} \quad (1)$$

где L_1 – индуктивность со стороны инвертора;

L_2 – индуктивность со стороны сети;

C_f – емкость конденсатора.

Наибольшими преимуществами LCL-фильтра являются:

- низкое искажение сетевого тока и выработка реактивной мощности,
- ослабление 60 дБ/декада для частот, превышающих резонансную частоту.

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) L-, LCL- и LCL-фильтров с демпфированием приведены на Рис. 2. Показано, что три фильтра имеют одинаковое затухание ниже резонансной частоты. Так как наклон высокочастотной области диаграммы LCL-фильтра больше, чем на диаграмме L-фильтра, из чего следует, что фильтр высшего порядка лучше подавляет помехи. Так как сумма двух индуктивностей LCL-фильтра меньше, чем индуктивность L-фильтра. Следовательно, падение напряжения на LCL-фильтре, вызванное вводимыми гармониками тока, ниже.

АЧХ LCL-фильтра с демпфированием показывает, что скачок тока на значении резонансной частоты значительно меньше.

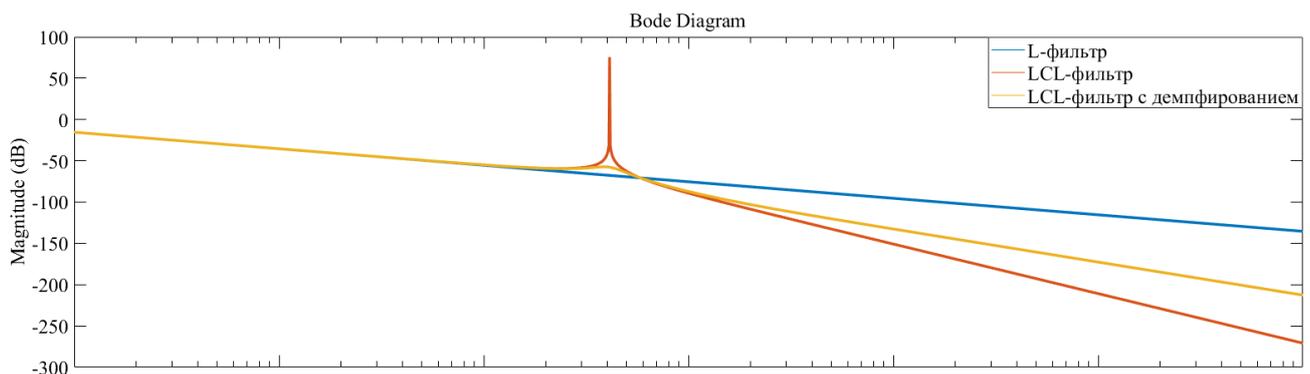


Рис. 2 – Диаграмма Бode для LCL-фильтра без демпфирования

Математическая модель LCL-фильтра

Конструкция LCL-фильтра зависит от значений, необходимого для уменьшения высокочастотной составляющей линейного тока. Для оценки этого ослабления необходимо использовать ГОСТ 32144–2013 [1], регулирующий содержание гармоник тока, которые попадают в электрическую сеть. Для этого рассчитывается коэффициент нелинейных искажений (КНИ) по формуле (2):

$$k_{\text{НСУ}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $U_{(1)i}$ – действующее значение междуфазного (фазного) напряжения основной частоты для i -го наблюдения, В, кВ.

Нормированные значения КНИ представлены в Табл. 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

Нормально допустимое значение $k_{\text{НСУ}}$, % при $U_{\text{ном}}$, кВ				Предельно допустимое значение $k_{\text{НСУ}}$, % при $U_{\text{ном}}$, кВ			
0,38	6-20	35	110-330	0,38	6-20	35	110-330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Уравнения состояния LCL-фильтра получены опираясь на схему, изображенную на Рис.3. Выражения приведены для одной фазы, для остальных фаз уравнения аналогичны.

$$\begin{cases} \frac{\partial i_{\text{инв}}}{\partial t} = \frac{U_{\text{инв}} - U_c}{L_1}; \\ \frac{\partial i_{\text{сеть}}}{\partial t} = \frac{U_c - U_{\text{сеть}}}{L_2}; \\ \frac{\partial U_c}{\partial t} = \frac{i_c}{C_f} = \frac{i_{\text{инв}} - i_{\text{сеть}}}{C_f}, \end{cases} \quad (3)$$

Взаимосвязь между выходным напряжением инвертора и тока сети задается передаточной функцией $G(s)$ из приведенной системы:

$$G^{dq}(s) = \frac{i_{\text{сеть}}(s)}{U_{\text{инв}}(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2)s}. \quad (4)$$

При проектировании LCL-фильтра необходимо учитывать несколько характеристик, таких как пульсации тока, размер фильтра и ослабление пульсаций тока. В данной работе применяется пассивное демпфирование, в виде последовательного подключения резистора с конденсатором, для наиболее эффективной работы фильтра.

II Расчет параметров LCL-фильтра

Для проектирования фильтра необходимы следующие входные параметры:

$$Z_{\text{баз}} = \frac{(U_{\text{инв}}^{\text{л}})^2}{P_{\text{ном}}}; \quad (5)$$

$$C_{\text{баз}} = \frac{1}{Z_{\text{баз}} \cdot \omega_c}; \quad (6)$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot U_{\text{инв}}^{\text{л}}}, \quad (7)$$

В Табл. 3 приведены основные формулы параметров LCL-фильтра.

Из приведенного алгоритма видно, что для того, чтобы определить оптимальные значения фильтра, необходимо соблюсти баланс между значениями двух индуктивностей, чтобы сделать устройство наиболее экономически выгодным. А также между уменьшением пульсации тока и допустимыми потерями мощности.

III Система управления

Регулирование смоделированной электрической системы с сетевым инвертором осуществляется на основе синхронизации выходного тока с напряжением сети. Также необходимо регулирование выходного тока и активной и реактивной составляющих тока.

Система управления, рассматриваемая в данной работе, предполагает переход из одной системы координат в другую. В ходе работы было применено преобразование Кларка (abc- $\alpha\beta$), преобразование Парка-Горева ($\alpha\beta$ -dq) и обратное преобразование в координаты abc.

Рассматривается регулирование, ориентированное на напряжение трехфазного инвертора с широтно-импульсной модуляцией, подключенного к сети, с LCL-фильтром.

Каскадная структура управления представлена на Рис. 4.

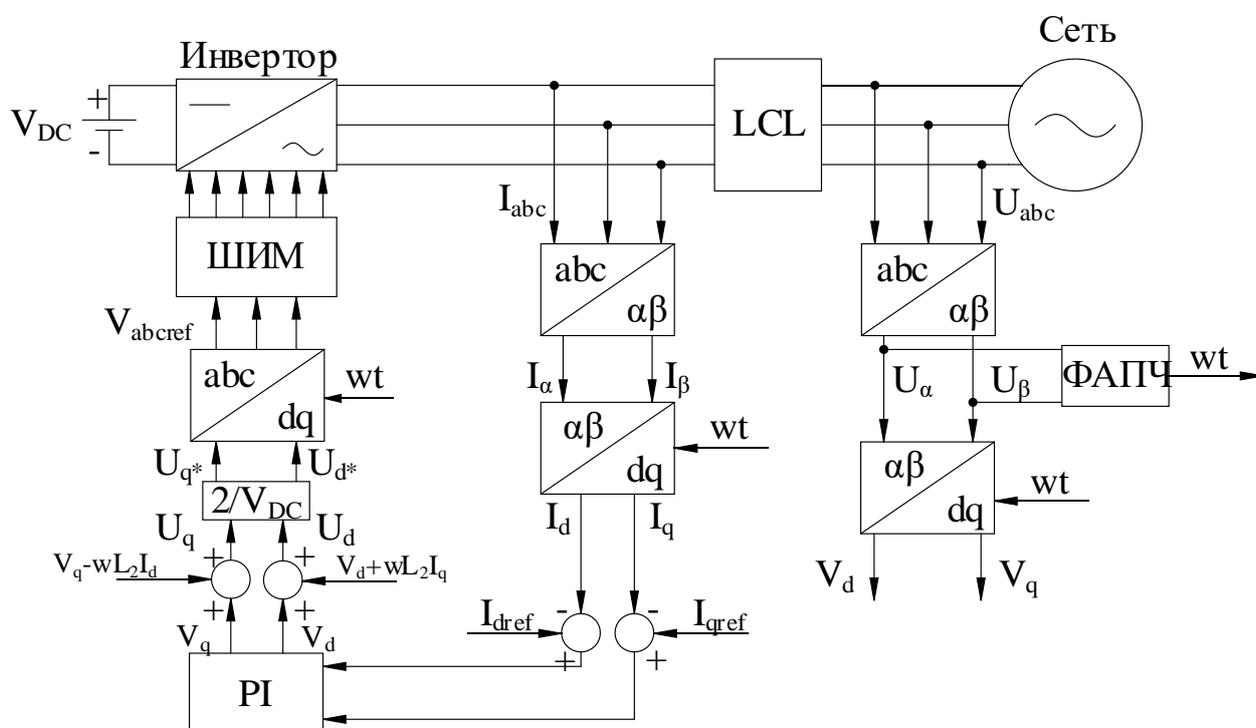


Рис. 4 – Структура управления

Внешний контур регулирует напряжение линии постоянного тока до постоянного опорного напряжения V_{DC}^* . Внутренние контуры регулируют активный и реактивный токи (I_d и I_q соответственно) во вращающейся системе координат, выровненной по вектору линейного напряжения (dq-координаты). Регулируются либо токи инвертора, либо линейные токи сети. Определение фазового угла линейного напряжения выполняется с помощью алгоритма фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

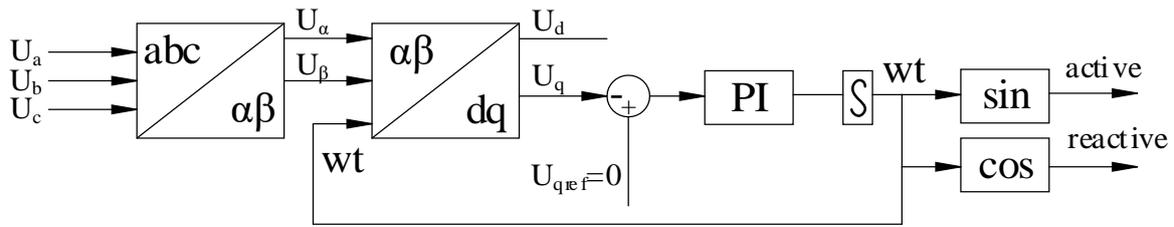


Рис. 5 – Схема замкнутого контура ФАПЧ

IV Результаты моделирования

На рисунке 6 представлена схема энергосистемы в ПК Matlab/Simulink.

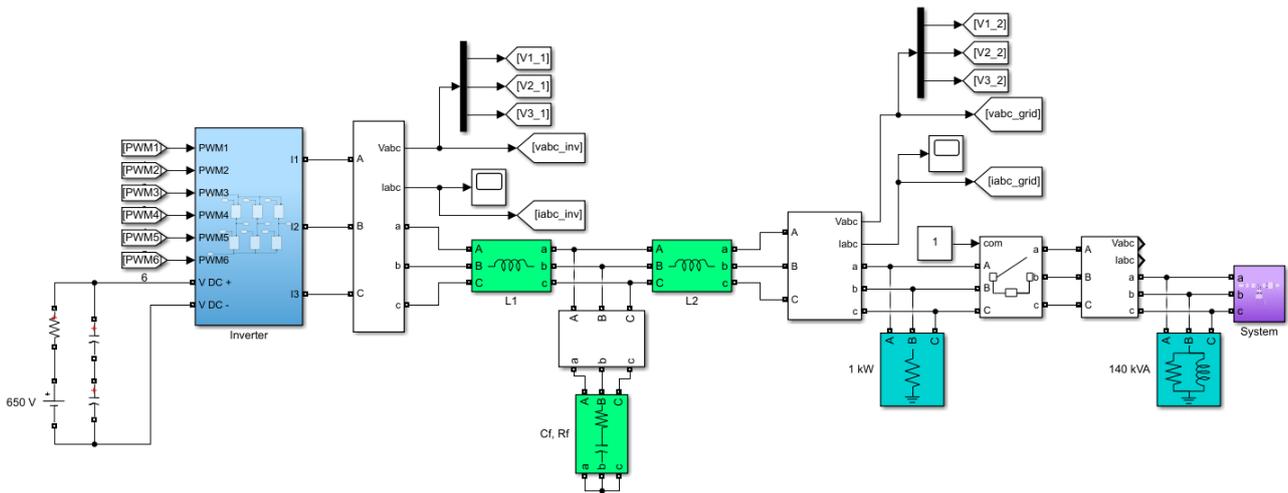


Рис. 6 – Схема энергосистемы в ПК Matlab/Simulink

Проверка соответствия коэффициента нелинейных искажений

Для того, чтобы оценить эффективность спроектированного LCL-фильтра необходимо провести FFT анализ сигнала, который в результате отображает спектр в виде гистограммы в процентах относительно базового значения сигнала.

На Рис. 7 и 8 приведены осциллограммы токов со стороны преобразователя и со стороны сети после LCL-фильтра, соответственно. На Рис. 10 и 11 представлен анализ БПФ тока со стороны инвертора и тока со стороны сети, соответственно.

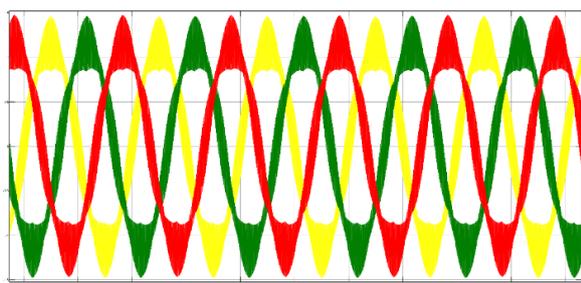


Рис. 7 – Осциллограмма токов со стороны инвертора

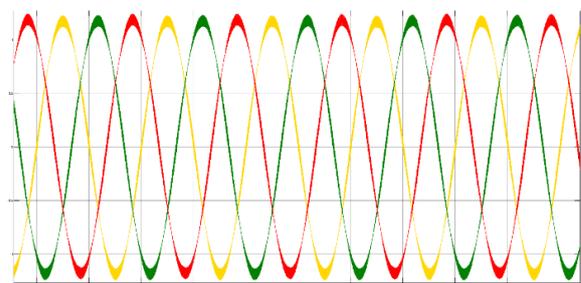


Рис. 8 – Осциллограмма токов со стороны сети

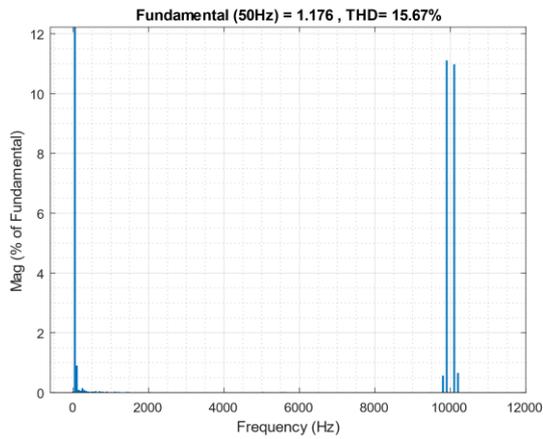


Рис. 9 – Результаты анализа БПФ тока со стороны инвертора

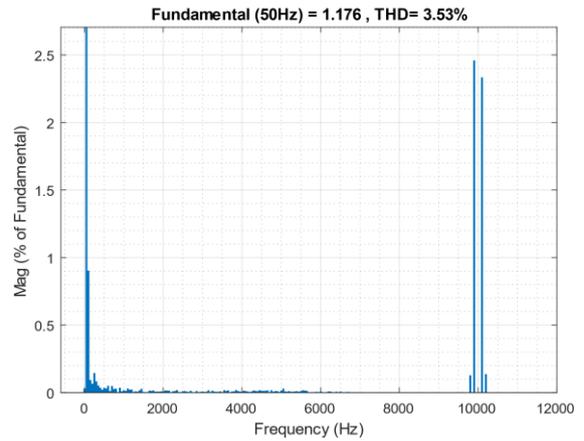


Рис. 10 – Результаты анализа БПФ тока со стороны сети

Результат работы системы регулирования

Чтобы продемонстрировать работу системы регулирования ФАПЧ достаточно показать осциллограммы напряжения инвертора и сети. На Рис. 11 изображены напряжение инвертора после LCL-фильтра и напряжение сети для каждой фазы, и из него видно, что они равны по фазе.

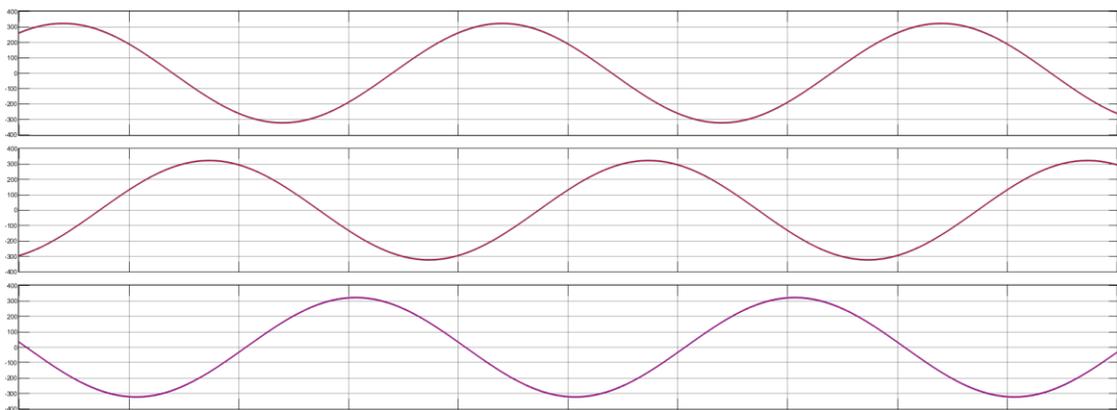


Рис. 11 – Напряжения инвертора после LCL-фильтра и сети

Изменяя уставку активной и реактивной составляющих тока, изменяется режим подачи мощности. Были рассмотрены все варианты подачи мощности, которые соответствуют каждому квадранту векторной диаграммы, представленной на Рис. 12. Результат регулирования представлен на Рис. 13.

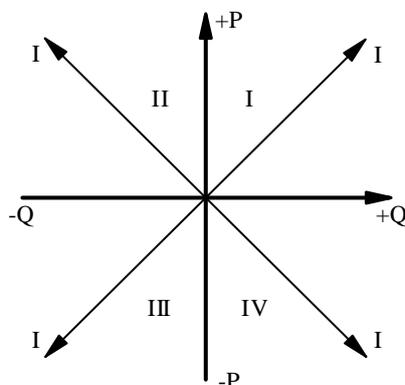


Рис. 12 – Направление активной и реактивной мощности и векторов тока (для одной фазы)

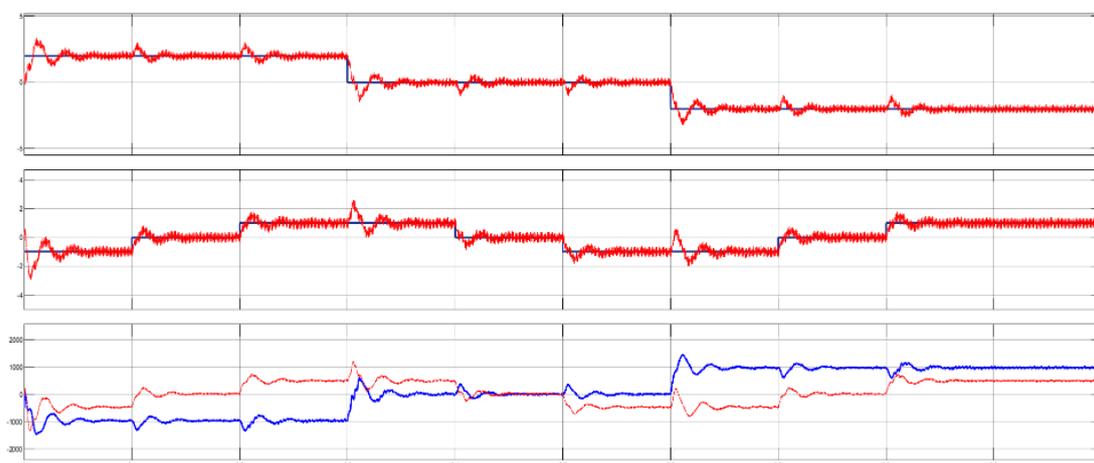


Рис. 13 – Осциллограммы токов уставки и их действующих значений, активной и реактивной мощности

Первая и вторая осциллограммы соответствуют значениям уставок активной и реактивной составляющих тока и их действующим значениям. Третья осциллограмма показывает значения активной и реактивной мощности.

В период времени с 0 до 0,1 с соответствует третьему квадранту векторной диаграммы.

В период времени с 0,1 до 0,2 с реактивная мощность равна 0; 1 кВт активной мощности подается в сеть.

Период времени с 0,2 до 0,3 с соответствует четвертому квадранту векторной диаграммы.

С 0,3 до 0,4 с значение активной мощности равно 0, реактивная мощность равна 0,5 кВар.

В момент времени с 0,4 до 0,5 с и активная, и реактивная мощности равны 0.

В период времени с 0,5 до 0,6 с активная мощность равна 0, 0,5 кВар реактивной мощности подается в сеть.

Период времени с 0,6 до 0,7 с соответствует второму квадранту векторной диаграммы.

В период времени с 0,7 до 0,8 потребляется 1 кВт активной мощности.

Период времени с 0,8 до 0,9 с соответствует первому квадранту векторной диаграммы.

Заключение

В данной статье представлена методология проектирования LCL-фильтра, используемого для сопряжения трехфазного сетевого инвертора с энергосистемой. В ходе работы разработана модель в ПК Matlab/Simulink, с помощью которой оценивалась эффективность спроектированного фильтра и работа схемы управления.

Предлагаемая методология проектирования эффективна, так как спроектированный фильтр удовлетворял требованиям по коэффициенту нелинейных искажений, который составил 3,53%. Было проведено сравнение эффективности L- и LCL-фильтров, по результатам которого было выяснено, что топология LCL-фильтра наиболее эффективно подавляет высшие гармонические составляющие тока.

Список литературы

- [1] ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Изд-во стандартов, 2013 г. 44 с. 2.
- [2] С. Bao, X. Ruan, X. Wang, W. Li, D. Pan and K. Weng, ‘Step-by-Step Controller Design for LCL-Type Grid-Connected Inverter with Capacitor–Current-Feedback Active-Damping’, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, N°3, pp. 1239 – 1253, 2014.
- [3] Erickson R. W. Fundamentals of Power. - 1997. - 1326 с.
- [4] ГОСТ 30804.3.12–2013. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения. М.: Изд-во Стандартиформ, 2014 г. 27 с.
- [5] Сычев Ю. А. Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий: дис. д-р техн. наук наук: 05.09.03. - Санкт-Петербург, 2021. - 365 с.
- [6] Chen, Jingxin; Li, Yang; Zhang, Xuen; Ma, Yaofei Simulation and Design of Solar Power System for Ocean Buoy // Journal of Physics: Conference Series. - 2018. - №1061, doi:10.1088/1742-6596/1061/1/012018