

Синтез алгоритма пофазной стабилизации напряжения трехфазного четырехпроводного автономного инвертора напряжения

Ся Цзинцзин¹, Н. А. Доброскок²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹ tssya@stud.etu.ru, ² nadobroskok@etu.ru

Аннотация. В данной статье представлен сравнительный анализ алгоритмов стабилизации фазного напряжения на основе развязанного пофазного управления и управления на основе виртуального синхронного генератора, используемых в трехфазных четырехпроводных системах для обеспечения стабильного напряжения питания симметричных и несимметричных трехфазных и однофазных электрических нагрузок. В трехфазной энергосистеме нагрузка считается несимметричной, если существует значительный дисбаланс между фазами по току, напряжению или распределению мощности, что затрудняет стабилизацию выходного напряжения. В данной работе анализируются и сравниваются два различных алгоритма стабилизации. Выходное напряжение регулируется путем управления амплитудой первой гармоники выходного напряжения инвертора. В работе анализируется качество электроэнергии на выходе посредством моделирования в программе MatLab/Simulink при подключении несимметричной нагрузки в условиях автономной сети.

Ключевые слова: алгоритмы стабилизации фазного напряжения, алгоритмы управления виртуальными синхронными генераторами, асимметричные нагрузки

I. ВВЕДЕНИЕ

С прогрессом общества и развитием науки и техники, популярностью новых электросетей, микросетей и распределенных источников энергии, соответственно, повышаются требования к стабильности напряжения сети. Несимметрия нагрузки инвертора является распространенной опасностью в работе энергосистемы, особенно в случае высокой доли однофазных нагрузок или неравномерного распределения трехфазного силового оборудования, длительная несбалансированная работа ускорит старение силовых устройств и даже приведет к срабатыванию защиты от перегрузки. Традиционный трехфазный инвертор состоит из трех полумостовых плеч, и из-за отсутствия нейтральной линии невозможно реализовать прямое питание однофазных нагрузок. Между тем, когда нагрузка системы меняется, токи нулевой последовательности, генерируемые несбалансированными нагрузками, не могут быть возвращены через трехфазную трехпроводную систему, что приводит к искажению напряжения и нестабильности системы. Чтобы устранить

влияние колебаний напряжения на систему, к исходной трехмостовой структуре добавляется четверть полумоста, образуя топологию из четырех полумостов, а ток нулевой последовательности возвращается, чтобы избежать дрейфа напряжения и обеспечить независимость и управляемость фазного напряжения.

Трехфазные четырехмостовые инверторы демонстрируют значительные преимущества в области силовой электроники благодаря своей уникальной конструкции, которая обладает такими достоинствами, как простота конструкции, высокая плотность мощности, высокая адаптивность и исключительная экономичность, а значит, имеет широкие перспективы применения, широко используется в фотоэлектрических инверторах, источниках бесперебойного питания и других областях [1]. В настоящее время широко используются такие методы управления, как управление током запаздывания [2], управление нейтралью [3], управление положительной последовательностью и т. д. Из-за сложности управления трехфазным четырехпроводным инвертором эти методы управления хоть и решают в определенной степени проблему трехфазной несимметричной нагрузки, но в то же время приносят некоторые недостатки в управление нейтралью, например: при несимметричной нагрузке потенциал нейтрали подвержен влиянию тока нулевой последовательности, и необходимость в дополнительных стратегиях управления для стабилизации напряжения значительно усложнит алгоритмы, а вместе с тем и увеличит потери.

С этой целью в данной работе предлагается управление 3D-ШИМ в сочетании с обобщенным интегратором второго порядка (SOGI) на основе управления однофазным напряжением и методами управления на основе виртуального синхронного генератора, соответственно, которые анализируются и сравниваются.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ НАГРУЗКАХ

Трехфазный четырехпроводной инвертор состоит из восьми IGBT, а чтобы избежать короткого замыкания, между верхним и нижним IGBT формируется блокировочная структура. Постоянный ток, генерируемый источником питания, используется для формирования трехфазного переменного сигнала квадратной волны путем объединения мостовой схемы инвертора, управляемой логическими сигналами, а затем гладкий трехфазный переменный ток выводится через фильтр LCLL. Структура трехфазного четырехпроводного инвертора показана на рис. 1.

Исследование, представленное в данной статье, выполнено в рамках НИР "Разработка цифровых структур и программно-аппаратных средств для изолированных энергосистем с масштабируемыми накопителями энергии (СП-4/2024/1)" (регистрационный номер: 124091700014-5), выполняемой в рамках программы стратегического академического лидерства "Приоритет 2030" в Санкт-Петербургском электротехническом университете.

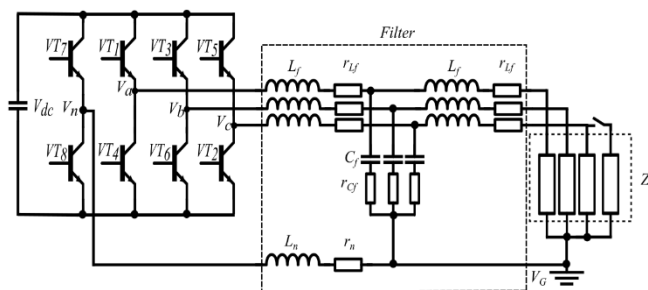


Рис. 1. Конфигурация трехфазного четырехпроводного инвертора с источником напряжения

На рис. 1 инверторный мост этого инвертора состоит из восьми IGBT – VT_1 – VT_8 ; источник постоянного тока V_{DC} проходит через инверторный мост для создания трехфазного переменного тока ABC, который проходит через фильтр LCLL для создания плавного трехфазного переменного тока. В фильтре типа LCLL r_{Lf} и L_f – активное и индуктивное сопротивление соответственно, r_{Cf} и C_f – активное и емкостное сопротивление конденсатора фильтра LCLL, r_n и L_n – активное и реактивное сопротивление дросселя в проводнике, образованном нейтральной линией, Z – несимметричная трехфазная нагрузка. Резкий переход от симметричной к несимметричной нагрузке моделируется в виде параллельного нагрузочного резистора.

В практических системах проблемы динамического дисбаланса, вызванные внезапными изменениями нагрузки или нелинейным доступом к устройствам, все еще могут преодолеть порог регулирования существующих систем управления, поэтому в данной работе предлагается два метода управления, один из которых - метод управления дисбалансом однофазного напряжения, основанный на обобщенном интеграторе второго порядка, который развязывает трехфазные токи в однофазное напряжение и управляет однофазным напряжением индивидуально. Другой метод - управление виртуальным синхронным генератором.

А. Развязанное управление фазовым напряжением в системах с несимметричной нагрузкой

Когда система подключена к несимметричной нагрузке или происходит однофазное замыкание на землю, ток нейтрали (составляющая нулевой последовательности) трехфазного четырехпроводного инвертора вызывает колебания напряжения шины постоянного тока, что приводит к повреждению конденсаторов, а традиционная система фазово-замкнутого контура (PLL) выходит из строя, что приводит к нестабильному управлению. Динамическая регулировка центральной частоты SOGI позволяет согласовывать фактическую частоту сети в режиме реального времени, что позволяет избежать накопления фазовых ошибок в традиционных PLL при переключении частоты.

Структура PLL с фазовым детектором SOGI имеет очень хорошие статические и динамические характеристики при низкой вычислительной сложности и простой реализации. Очень хорошие результаты достигаются даже при ступенчатом изменении амплитуды, частоты и фазы входного сигнала [4].

Стандартная структура SOGI-PLL показана на рис. 2 [5].

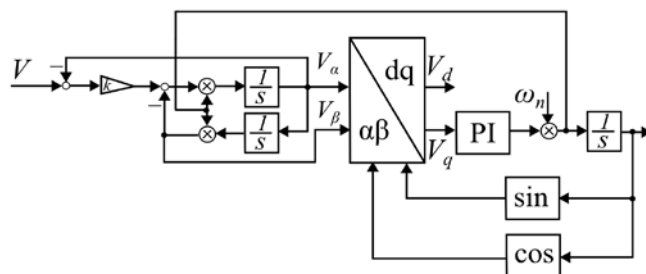


Рис. 2. Принципиальная схема стандартной структуры SOGI-PLL

Для того чтобы быстро реагировать на влияние несимметричных нагрузок на систему и уменьшить задержку управления, в данной работе k задается как критическое состояние демпфирования $\sqrt{2}$ [6]. Настроенная на совместную работу даже при наличии дисбаланса напряжения, система обеспечивает высокоточное отслеживание частоты и фазы.

Фазы трехфазного четырехпроводного инвертора продолжают быть развязанными, соответственно, напряжение каждого элемента продолжает управлять работой, взяв в качестве примера фазу А, ее метод управления фазовым напряжением показан на рис. 3 [7], где введены следующие обозначения V_{dc} – напряжение источника напряжения; C_{dc} – значение емкости источника напряжения; VS – датчики напряжения; PI – контроллер PI; P – контроллер П; u_{cA} – Напряжения фазы А; $u_{A\alpha}$ – проекция напряжения фазы А на ось α ; $u_{A\beta}$ – проекция напряжения фазы А на ось β ; ω_{tA} – накопленный фазовый угол напряжения фазы а; u_{Ad} – проекция напряжения фазы А на ось d; u_{Aq} – проекция напряжения фазы А на ось q; u_d^{ref} и u_q^{ref} – контрольное значение напряжения фазы А на оси d и q; i_{cA} – ток конденсатора фильтра; u_{CB} и u_{CC} – фазное напряжение В и С. Возьмем для примера фазу А.

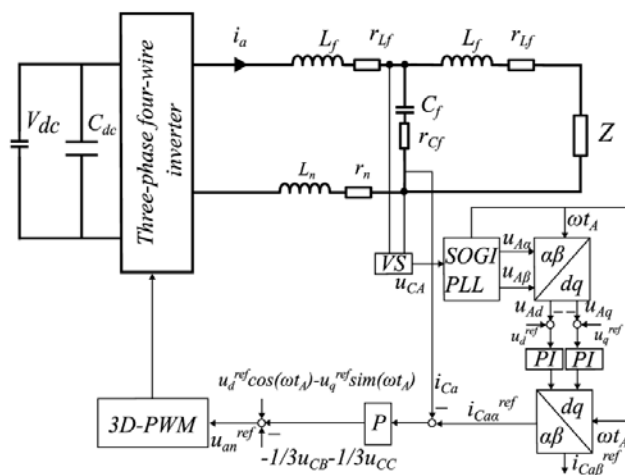


Рис. 3. Структурная схема одноконтурного автоматического управления фазным напряжением и фазным током

Поскольку рассматриваемая система управления строится для каждой фазы в отдельности, использовать преобразование Парка непосредственно для получения u_α и u_β не представляется возможным. В данной работе для искусственного получения этих составляющих используется модифицированное устройство обобщенного интегратора второго порядка (SOGI-PLL). Затем эти компоненты сравниваются с компонентами u_d^{ref} и u_q^{ref} , полученными из изменения парка, с их

переменными ошибки, и, наконец, связь снова активируется между фазой и фазой с помощью управления ПИ и управления током, чтобы получить управляющий сигнал 3D-ШИМ, формируя полный замкнутый контур управления.

Система моделируется с помощью программы Simulink, структура моделирования показана на рис. 4 и рис. 5, где V_{abc} – выходное фазное напряжение V_a, V_b и V_c ; I_{abc} – ток конденсатора фильтра I_a, I_b и I_c ; V_{abcc} – напряжение конденсатора фильтра.

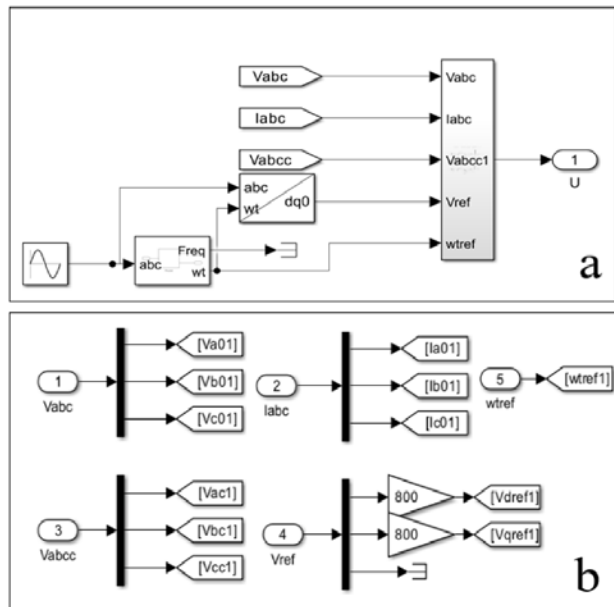


Рис. 4. Измерение параметров и диаграмма разложения: а – общая структурная схема управления напряжением, б – декомпозиция входных параметров

Если взять в качестве примера напряжение фазы А, то структура управления показана на рис. 5.

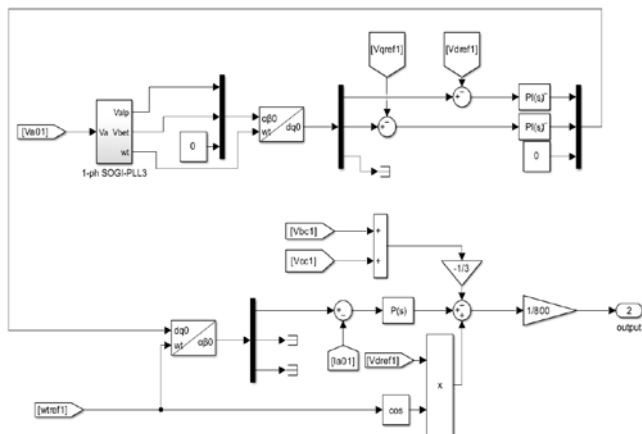


Рис. 5. Однофазные цепи управления напряжением

В данном исследовании для оптимизации комбинаций параметров ПИ-регулятора с помощью ручной итерации использовался метод переменных управления по пунктам, было проведено в общей сложности n независимых испытаний, и были получены окончательные стабильные экспериментальные результаты со значительными различиями, как показано в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Наименование параметры	Значение
Пропорциональный регулятор обобщенного интегратора второго порядка ФАПЧ	
Пропорциональная составляющая, k	$\sqrt{2}$
ПИ-регулятор (ФНЧ) ФАПЧ	
Пропорциональная составляющая, K_P	10
Интегральная составляющая, K_I	30
ПИ-регулятор напряжения	
Пропорциональная составляющая, k_{U_P}	0.3
Интегральная составляющая, k_{U_I}	48
Насыщение интегральной составляющей	± 800
Пропорциональный регулятор тока	
Пропорциональная составляющая, k_{I_P}	0.7

Архитектура управления трехфазным напряжением в этой системе использует принцип симметрии, при котором контуры управления фаз В и С строго соответствуют контурам управления фазы А с точки зрения топологии и стратегии управления, как показано на рис. 5, и их параметров регулятора, которые были перечислены в табл. 1.

Полученное скалярное значение напряжения подается в 3D-ШИМ контроллер для формирования замкнутого контура. Ниже на рис. 6 показано моделирование многоконтурной стратегии управления напряжением и током, полученной в среде Simulink.

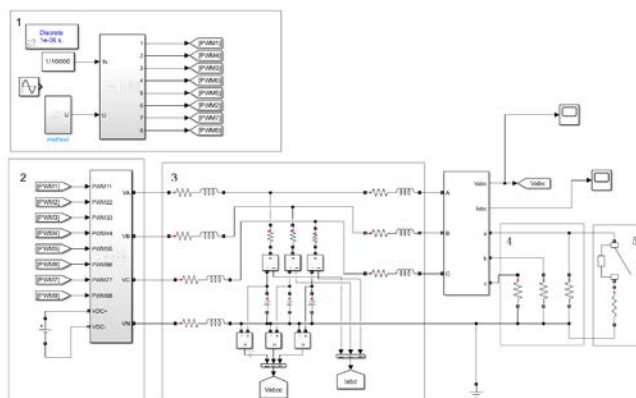


Рис. 6. Схема моделирования многоконтурной стратегии управления напряжением и током

На рис. 6 введены следующие обозначения: 1 – 3D-ШИМ с развязанным управлением однофазным напряжением; 2 – мостовая схема трехфазного четырехпроводного инвертора; 3 – измерение напряжения и тока фильтра типа LCL и фильтрующего конденсатора; 4 – симметричная нагрузка; 5 – возмущенные нагрузки.

В. Управление виртуальным синхронным генератором в несимметрично нагруженных системах

В статье также представлен метод на основе усовершенствованного виртуального синхронного генератора для уменьшения источников колебаний мощности, то есть для подавления влияния токов отрицательной или нулевой последовательности на симметрию напряжения, с помощью виртуального импеданса положительной последовательности, чтобы справиться с внезапными изменениями нагрузки или несимметричными нагрузками [8].

Сигналы были разделены на ортогональные сигналы с разностью фаз 90° с помощью SOGI. Аналогично k устанавливается в критическое состояние затухания $\sqrt{2}$,

а трехфазные напряжения ABC преобразуются в разделение сигналов напряжения-тока положительной и отрицательной последовательности с помощью SOGI в истеме $\alpha\beta$ координат на рис. 7.

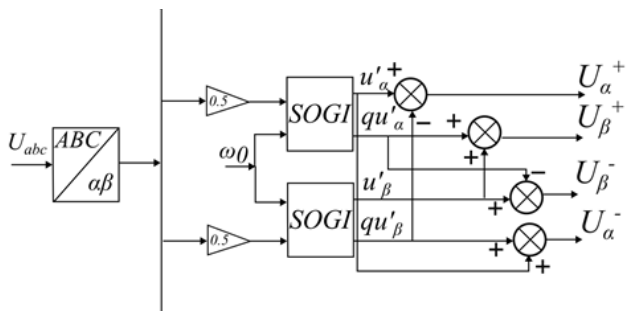


Рис. 7. Функциональная схема SOGI

В методе управления виртуальным синхронным генератором ток положительной последовательности, средняя активная мощность и средняя реактивная мощность должны использоваться в качестве обратной связи для достижения эффекта устранения влияния колебаний мощности на частоту, что обеспечивает стабильность частоты. Средние значения активной и реактивной мощности приведены в уравнении (1).

$$\begin{aligned} \bar{P}_e &= u_{an}i_a^+ + u_{bn}i_b^+ + u_{cn}i_c^+, \\ \bar{Q}_e &= u_{\beta a}i_a^+ - u_{\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (1)$$

где u_{an}, u_{bn} и u_{cn} – ABC трехфазное напряжение нагрузки; i_a^+, i_b^+ и i_c^+ – ток положительной последовательности нагрузки трехфазной ABC; u_{α} и u_{β} – напряжения в электросети в системе отсчета $\alpha\beta\gamma$. i_a^+ и i_{β}^+ – ток положительной последовательности нагрузки в системе отсчета $\alpha\beta\gamma$.

Обычная стратегия управления виртуальным синхронным генератором и уравнения управления методом предварительной синхронизации показаны в уравнении (2).

$$\begin{aligned} J\omega_n \frac{d\omega}{dt} &= P_{ref} - P_e - D_1\omega_n(\omega - \omega_n), \\ E_m &= \frac{1}{Ks}(Q_{ref} - Q_e + D_2(U_{ref} - U_m)), \end{aligned} \quad (2)$$

где, P_{ref} и P_e обозначают опорную активную мощность и расчетную активную мощность в точке общей связи, соответственно; Аналогично, Q_{ref} и Q_e – реактивные мощности; J и D_1 – постоянные виртуальной инерции и коэффициенты демпфирования соответственно; D_2 и K – коэффициенты регулирования напряжения и интегральные коэффициенты регулирования соответственно; ω_n – опорная угловая частота. ω – угловая частота выходного виртуального синхронного генератора; E_m – амплитуда потенциала внутри виртуального синхронно генератора; U_{ref} и U_m – опорное и измеренное значения амплитуды напряжения соответственно.

Чтобы избежать проблемы асимметрии напряжения, вызванной токами отрицательной и нулевой последовательности, вводится ток положительной последовательности со средней мощностью, который используется в качестве обратной связи и управляется. Заменив мощность в уравнении (2) на среднюю мощность, можно получить структуру, показанную на рис. 8.

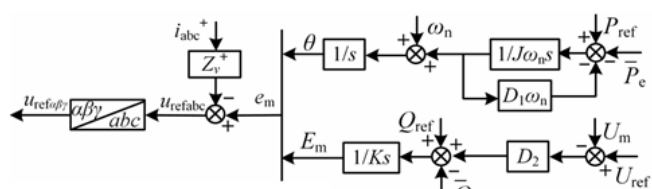


Рис. 8. Схема контура управления виртуальным синхронным генератором по средней мощности

В соответствии со структурной схемой и уравнениями, моделирование проводится в среде Simulink, как показано на рис. 9.

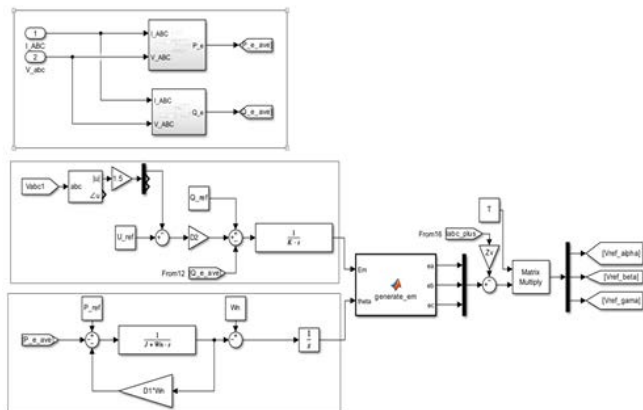


Рис. 9. Диаграмма моделирования Simulink

Полученная система координат $\alpha\beta\gamma$ выдает опорное напряжение, которое затем подвергается пропорциональному резонансному (PR) управлению напряжением, и, наконец, осуществляется управление током для преобразования его в скалярный сигнал в системе координат ABC и подключения к 3D-ШИМ для формирования полного управления виртуальным синхронным генератором.

Передаточная функция пропорционального резонансного регулятора (PR) показана в уравнении (3).

$$G_{PR}(s) = k_v + \frac{k_r s}{s^2 + \omega_n^2} \quad (3)$$

где k_v обозначает масштабный параметр, k_r – резонансный параметр, ω_n – опорную частоту квадратной волны. Параметры данных виртуального синхронного генератора приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА II. ПАРАМЕТРЫ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Наименование параметры	Значение
Ссылка на активную мощность, P_{ref}	10700
Ссылка на реактивную мощность, Q_{ref}	0
Частота опорной квадратной волны, ω_n	$2 \cdot 50 \cdot \pi$
коэффициент демпфирования, D_1	50
Коэффициент регулирования напряжения, D_2	307
Общий корректировочный коэффициент, K	15
Виртуальный импеданс виртуального синхронного генератора, Z_v	0.003
Амплитуда выходного опорного напряжения, U_{ref}	400
Пропорциональные и резонансные параметры контуров регулирования напряжения, K_v, K_r и K_{ry}	0; 213; 50.

Результат, полученный после управления напряжением и током, находится в системе координат $\alpha\beta\gamma$, а синусоидальный сигнал, полученный в системе координат abc , вводится в 3D-ШИМ для формирования замкнутого контура управления с использованием вариации $\alpha\beta\gamma - ABC$.

III. АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ

Фазовое управление напряжением осуществляется с помощью пофазного управления напряжением [7], что приводит к колебаниям мощности и, следовательно, к колебаниям частоты при несимметричной нагрузке. Это может привести к таким проблемам, как снижение производительности оборудования, например, двигателей и компрессоров, выход из строя чувствительного оборудования и трудности с подключением к сети. В отличие от этого, усовершенствованный подход на основе виртуального синхронного генератора уменьшает источник колебаний мощности за счет использования виртуального импеданса положительной последовательности, т.е. подавления влияния токов отрицательной/нулевой последовательности на симметрию напряжения и подавления колебаний частоты в источнике.

Для того чтобы изучить и сравнить влияние двух методов управления на качество управления, мы смоделировали и сравнили два метода управления,

действующие на одну и ту же систему в среде Simulink. Параметры системы приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА III. ПАРАМЕТРЫ СХЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наименование параметры	Значение
LCLL-фильтр на выходе трехфазного четырехпроводного автоматического инвертора напряжения	
Индуктивное сопротивление дроссел, L	5000 мкГн
Активное сопротивление дроссел, R	10 мОм
Емкостное сопротивление конденсатора, C	9.1342 мкФ
Активное сопротивление конденсатора, R	10 Ом
Трехфазная симметричная нагрузка	
Активная мощность, P	10.7 кВт
Номинальная частота, ω ном	50 Гц
Номинальное действующее фазное напряжение, U ном	220 В
Дополнительная однофазная нагрузка фазы А	
Активная мощность, P	10 кВт
Номинальная частота, ω ном	50 Гц
Номинальное действующее фазное напряжение, U ном	220 В
Время включения, t	0.3с
Аккумуляторная батарея	
Номинальное напряжение, V	800 В

Система подключается параллельно нагрузочному резистору на 0,3 секунды, симметричное состояние нарушается в момент доступа, два метода управления начинают действовать мгновенно, и эффект управления напряжением сравнивается, как показано на рис. 10.

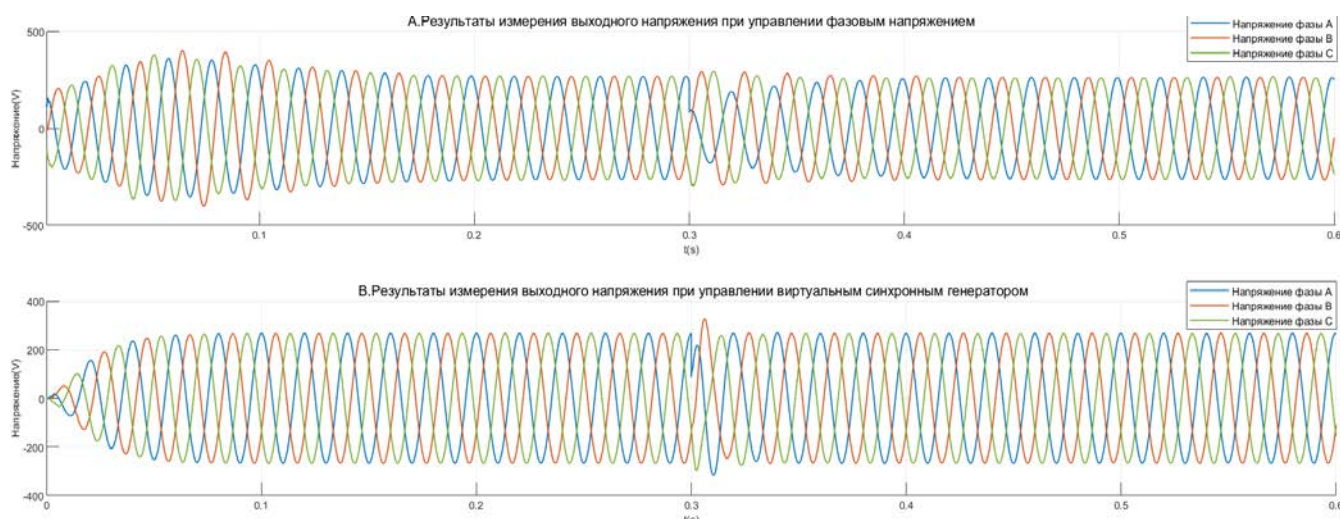


Рис. 10. Сравнительные исследования алгоритмов управления при несбалансированной нагрузке

Из рис. 10 А видно, что в начале работы системы происходит скачок напряжения и тока, но стабильность восстанавливается в течение 0,2 с. При подключении к цепи А-фазной шунтирующей нагрузки происходит резкое изменение выходного напряжения, и в этот момент система управления вмешивается и быстро реагирует, возвращая напряжение к исходному уровню. Между тем, как видно из рис. 10 В, метод управления виртуальным синхронным генератором начинается с быстрого и устойчивого роста напряжения без образования перегрузки. В то же время, когда неравновесное состояние нарушается в течение 0,3 секунды, сравнивая время восстановления двух методов управления, легко обнаружить, что метод управления виртуальным синхронным генератором намного лучше, чем метод управления фазным напряжением, и поэтому эта система возвращается в равновесное состояние быстрее, чем метод управления фазным напряжением. Суммарные гармонические искажения метода

виртуального синхронного генератора также получены с помощью быстрого анализа Фурье и составляют 0,33%, что является лучшей стабильностью по сравнению с 0,99% для фазового управления напряжением.

Для дальнейшего исследования качества электроэнергии после стабилизации в данной работе анализируется качество выходного напряжения системы с помощью среднего арифметического значений напряжений трехфазной сети переменного тока ABC, где меньшая разница в амплитуде напряжения в трехфазной системе означает более высокое качество электроэнергии. Результаты среднего арифметического значения амплитуды выходного напряжения для управления фазным напряжением и управления виртуальным генератором показаны на рис. 11.

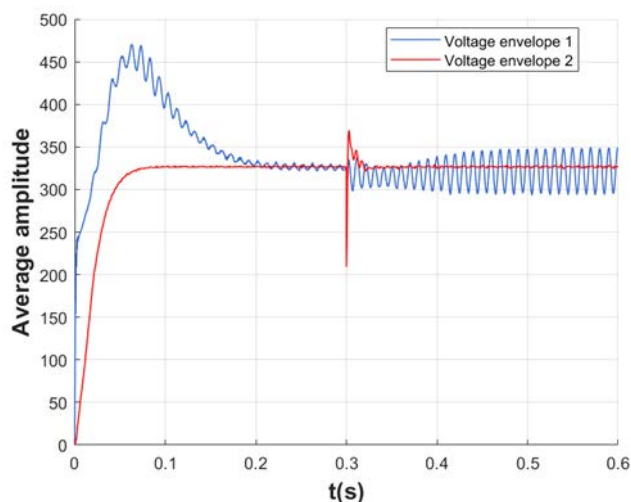


Рис. 11. График сравнения среднего арифметического

На рис. 11 показано, что метод разделения положительной последовательности виртуального синхронного генератора устраняет влияние колебаний мощности на частоту, что приводит к уменьшению амплитудной разницы между фазными напряжениями по сравнению с методом управления напряжением по желанию. Хорошо видно, что разница напряжений значительно уменьшается, а пусковой ток подавляется.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании стратегия управления фазовым напряжением на основе SOGI-PLL с развязкой для трехфазного четырехпроводного инвертора способна быстро сходить по напряжению в условиях внезапной несимметричной нагрузки всего за 0,2 секунды. Среди них улучшенная схема управления виртуальным синхронным генератором, включающая виртуальный импеданс положительной последовательности, управляет напряжением положительной последовательности и средней мощностью через механизм развязки частоты и энергии, и время сходимости виртуального синхронного генератора составляет всего 0,03 с, что не только быстрее, но и разность фаз напряжения почти равна 0 по сравнению с 0,2 с для управления фазовым напряжением с развязкой, и, таким образом, виртуальный синхронный генератор является более благоприятным с точки зрения напряжения. Также показано, что виртуальный синхронный генератор имеет более высокую

эффективность компенсации напряжения (0,33% общих гармонических искажений с помощью быстрого Фурье-анализа) и лучшую стабильность (значительно меньшее время восстановления), и эта разница в характеристиках обеспечивает важную основу для выбора контроллера для модели автономной/подключенной к сети микросети. Этот результат закладывает теоретическую основу для оптимизации качества электроэнергии в новых энергосистемах, и в дальнейшем будут проводиться исследования, такие как параллельное управление несимметричными нагрузками с помощью нескольких инверторов, чтобы помочь воплотить теорию в инженерную практику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] P. Sanchis, A. Ursua, E. Gubia, J. Lopez and L. Marroyo, "Control of three-phase stand-alone photovoltaic systems with unbalanced loads," *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2005. ISIE 2005., Dubrovnik, Croatia, 2005, pp. 633-638 vol.
- [2] T. Nguyen-Van and K. Tanaka, "State Observer-based Current Sensor-less Hysteresis Current Control for Stand-alone Inverters," *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, Paris, France, 2019, pp. 1992-1997.
- [3] G. Dong and O. Ojo, "Current Regulation in Four-Leg Voltage-Source Converters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 2095-2105, Aug. 2007.
- [4] D. Janik, J. Talla, T. Komrska and Z. Peroutka, "Optimization of SOGI PLL for single-phase converter control systems: Second order generalized integrator (SOGI)," *2013 International Conference on Applied Electronics*, Pilsen, Czech Republic, 2013, pp.
- [5] S. Golestan, J. M. Guerrero and J. C. Vasquez, "Single-Phase PLLs: A Review of Recent Advances," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9013-9030, Dec. 2017.
- [6] Wen, Chunxue & Huang, Yijun & Li, Jianlin & Wang, Peng. (2023). Improved control of virtual synchronous generator under unbalance of grid voltage. *Energy Reports*. 9. 824-834. 10.1016/j.egy.2023.05.206.
- [7] Hadidian Moghaddam M.J., Kalam A., Miveh M.R., Naderipour A., Gandoman F.H., Ghadimi A.A., Abdul-Malek Z. Improved Voltage Unbalance and Harmonics Compensation Control Strategy for an Isolated Microgrid. *Energies* 2018, 11, 2688.
- [8] Huang Z., Liu Z., Shen G., Li K., Song Y., Su B. A Virtual Synchronous Generator-Based Control Strategy and Pre-Synchronization Method for a Four-Leg Inverter under Unbalanced Loads. *Symmetry* 2024, 16, 1116.
- [9] C. Qiming, T. Fengren, G. Jie, Z. Yu and Y. Deqing, "The separation of positive and negative sequence component based on SOGI and cascade DSC and its application at unbalanced PWM rectifier," *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Chongqing, China, 2017, pp. 5804-5808.