

УДК 534.1

***УПРАВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕШЕТЧАТЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ***

Пеленко В.В.

доктор технических наук, профессор,

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна. Высшая школа технологии и энергетики,*

Санкт-Петербург, Россия

Васюхно Н.С.

студент,

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна. Высшая школа технологии и энергетики,*

Санкт-Петербург, Россия

Кащеев К.О.

студент,

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна. Высшая школа технологии и энергетики,*

Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В данной статье авторы рассматривают решетчатые преобразователи, которые набирают все большее распространение в возобновляемых источниках энергии, электромобилях и устройствах кондиционирования. Затрагивают вопрос оптимизации эффективности преобразователя и его управления, так, чтобы удовлетворить требованиям к выходному напряжению и току.

Ключевые слова: решетчатые преобразователи, оптимизация эффективности, каскадно-мостовые преобразователи, модульные многоуровневые преобразователи, преобразователи с переключаемыми конденсаторами, топология.

CONTROL AND OPTIMIZATION OF LATTICE CONVERTERS

Pelenko V.V.

doctor of technical sciences, professor,

St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

Higher School of Technology and Energy,

Saint Petersburg, Russia

Vasyukhno N. S.

student,

St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

Higher School of Technology and Energy,

Saint Petersburg, Russia

Kashcheev K.O.

student,

St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

Higher School of Technology and Energy,

Saint Petersburg, Russia

Abstract

In this article, the authors consider lattice converters, which are gaining increasing popularity in renewable energy sources, electric vehicles and air conditioning devices. They address the issue of optimizing the efficiency of the converter and its control, so as to meet the requirements for output voltage and current.

Keywords: lattice converters, efficiency optimization, cascaded-bridge converters, modular multilevel converters, switched-capacitor converters, topology.

Преобразователи с каскадным мостом (ПКМ) и модульные многоуровневые преобразователи (ММП) применяются во все большем числе областей благодаря их преимуществам, таким как модульность и масштабируемость [1]. Передача электроэнергии высокого напряжения, производство возобновляемой энергии, электромобили — вот некоторые из областей, в которых многоуровневые преобразователи начинают приобретать все большую популярность. Модульные многоуровневые преобразователи особенно выгодны благодаря высокому качеству выходного сигнала, спектру гармоник, адекватному динамическому отклику из-за более умеренных переходных процессов напряжения.

Несмотря на вышеперечисленные преимущества, классические модульные многоуровневые преобразователи во многих отношениях ограничены. Они имеют слабые возможности распределения тока [2], пониженную эффективность при более низких напряжениях и более строгие требования к балансировке напряжения. Эти недостатки мотивируют введение параллельного подключения к ММП. Такие разработки приводят к появлению ММП с последовательным и параллельным подключением, которые обладают как расширенными возможностями по току, так и привилегией простых и даже бездатчиковых алгоритмов балансировки напряжения [3].

Хотя реализация параллельного соединения между соседними подмодулями дает ряд преимуществ, поскольку они являются последовательными на макроуровне, а это означает, что модули в целом не могут быть параллельны. Поэтому предлагаются решетчатые преобразователи для соединения отдельных модулей преобразователя как последовательно, так и параллельно для образования решетчатой сетки [4]. Решетчатые преобразователи обладают широкими возможностями преобразования

напряжения/тока, несколькими входными/выходными клеммами, позволяющими свободно подключаться к различным схемам, а также возможностью простого модульного расширения. Таким образом, по сравнению с ММС, решетчатые преобразователи имеют более высокие верхние пределы по напряжению и току, улучшенную модульность и масштабируемость.

На рисунке 1(а) показан пример схемы подключения простого решетчатого преобразователя 3×3 , где каждый submodule представляет собой H-мостовой преобразователь с питанием от источника постоянного напряжения [5]. На рисунке 1(б) показаны схемы примеров решетчатых преобразователей 3×3 и 4×4 , где пронумерованные точки обозначены как узлы, а линии, соединяющие узлы, — ребра, которые, в общем случае, могут быть H-мостами, симметричными полумостами, несимметричными полумостами или другими подмодулями. В этой статье все ребра рассматриваются как H-мосты, что обеспечивает наибольшую свободу управления.

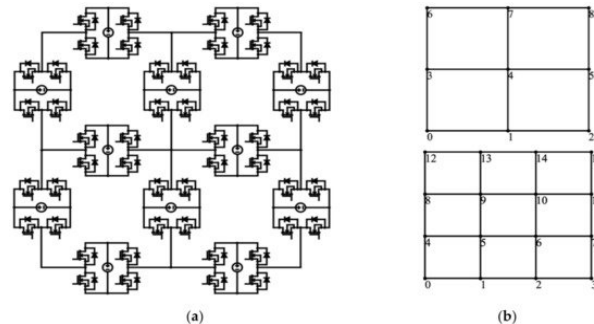


Рис.1 – Схемы решетчатых преобразователей [14]

Решетчатые преобразователи управляются посредством манипулирования отдельными ребрами или H-мостами. На рисунке 2 показан пример H-моста, используемого в решетчатых преобразователях. Конкретный H-мост состоит из четырех полупроводниковых переключателей и источника напряжения. Предполагая, что ток втекает через левую клемму и вытекает из правой, H-мост может выполнять одну из четырех функций преобразования напряжения, управляя состояниями включения/выключения переключателей. В первом состоянии, +1, H-мост выдает положительное напряжение U_{dc} при включении

переключателей S_2 , S_3 . В качестве альтернативы H-мост может находиться в состоянии -1 , снижая напряжение на U_{dc} включением переключателей S_1 , S_4 . Третье состояние 0 — это короткое замыкание, когда все верхние/нижние переключатели включены. Наконец, выключенное состояние — разомкнутая цепь. H-мосты с разомкнутой цепью принципиально отличаются от трех других, поскольку они изменяют топологию решетчатого преобразователя и, следовательно, называются иначе, чем другие состояния [6]. Тот факт, что каждое ребро может иметь четыре разных состояния, делает решетчатые преобразователи чрезвычайно универсальными, позволяя управлять ими и оптимизировать их для решения широкого круга задач.

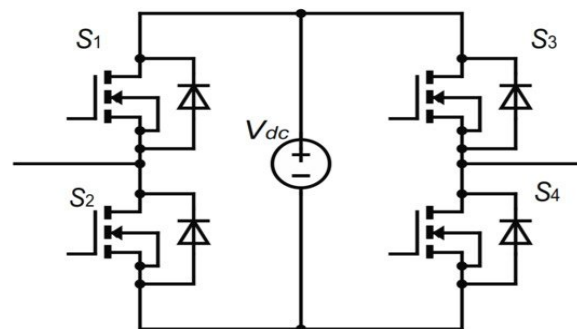


Рис.2 – H-мост [15]

Оптимизация эффективности решетчатого преобразователя желательна из-за большого количества вариантов управления даже при строгих требованиях. Для решетчатого преобразователя заданного размера эффективность зависит исключительно от того, находится ли каждое ребро в состоянии разомкнутой цепи (в выключенном состоянии) или нет. Таким образом, граф, показывающий, где соединяются ребра, служит решением задачи оптимизации эффективности. Таким образом, наиболее эффективные решения могут помочь свести к минимуму рассеиваемую энергию, преобразовывая больше входной мощности в полезную выходную мощность.

Для поиска наилучшего графа используется метод перебора. Все возможные графы исчерпываются распараллеливанием разного количества

путей, т. е. от распараллеливания одного пути до распараллеливания всех путей. Вычисляются и сравниваются эффективности всех возможных графов заданного размера [7].

Для нахождения КПД заданного графика считается, что каждый H-мост имеет полное внутреннее сопротивление r источника напряжения и неидеальные ключи. Напряжение в начальном узле считается равным 0 В, а напряжение в узле назначения является выходным напряжением $U_{\text{выход}}$. Сопротивление нагрузки равно $R_{\text{нагрузки}}$. Следовательно, КПД η данного решетчатого преобразователя равен $\eta = \frac{P_{\text{выход}}}{P_{\text{всего}}}$, где $P_{\text{выход}} = \frac{U^2}{R}$; $P_{\text{всего}} = P_{\text{выход}} + P_{\text{рассеивания}}$, где $P_{\text{рассеивания}}$ можно найти путем суммирования мощности, рассеиваемой на каждом H-мосте. Предположим, что ток, проходящий через конкретный H-мост α , равен i_α , $P_{\text{рассеивания}} = \sum_{\alpha} i_\alpha^2 r$.

Таким образом, задача сводится к нахождению i_α для каждого ребра, для которого мы можем создать неизвестный вектор \vec{i} , для которого нужно найти решение. Для этого пишем и решаем законы тока и напряжения Кирхгофа. Оба закона могут быть представлены с помощью матриц, соответствующих графу преобразователя решетки, что упрощает запись системы линейных уравнений и определение тока на каждом ребре [8].

Закон Кирхгофа связан с матрицей инцидентности графа [9]. Матрица инцидентности показывает взаимосвязь между узлами и ребрами. Каждый столбец представляет ребро, а каждая строка представляет собой узел. Если элемент матрицы в X-й строке и Y-м столбце равен 1, то ребро с меткой y указывает на узел с меткой X; если элемент равен -1, то ребро выходит из узла; а если элемент равен 0, то ребро не соединено с узлом. Матрица инцидентности графа, показанного на рисунке 3, выглядит следующим образом:

$$I = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Если перевести эту матрицу на язык схем, то + 1 представляет ток, втекающий в узел, а - 1 означает ток, выходящий из узла, а 0 означает отсутствие тока. В соответствии с каждой строкой матрицы инцидентности KCL можно записать в виде: $\vec{I} = \vec{b}, (1)$, где вектор \vec{b} не имеет элементов, кроме тех, которые соответствуют начальному и конечному узлам. Пусть $I_{\text{выход}} = U_{\text{выход}} / R_{\text{load}}$ будет выходным током, элемент вектора, представляющий начальные узлы, должен быть $-I_{\text{выход}}$, поскольку ток течет в узел, а вектор \vec{b} находится на другой стороне уравнения. С другой стороны, элемент вектора, представляющий узел назначения, должен быть $+I_{\text{выход}}$ [10].

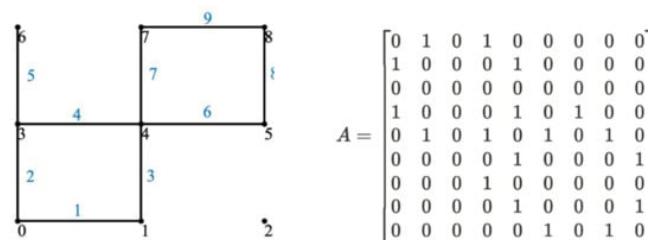


Рис.3 – Матрица смежности показанного решетчатого преобразователя 3×3

[Авторская разработка]

Хотя эта система линейных уравнений дает девять уравнений для девяти неизвестных краевых токов на рисунке 3, одно из уравнений является тривиальным (узел 2 не соединен ни с какими другими узлами), что требует включения уравнений КВЛ. Чтобы найти уравнения КВЛ, нам нужно определить базисные циклы для данного графа. Для примера, показанного на рисунке 3,

имеется два базисных цикла: первый состоит из ребер [(0,1), (1,4), (4,3), (3,0)], второй [(4,5), (5,8), (8,7), (7,4)].

Уравнения КВЛ для рисунка 3 можно записать как:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \end{bmatrix} = \vec{0}$$

Решение систем дает i_α для каждого ребра, хранящегося в векторе \vec{i} . Следовательно, КПД решетчатого преобразователя равен:

$$\eta = \frac{U_{\text{ВЫХОД}}^2 / R_{\text{нагрузки}}}{\frac{U_{\text{ВЫХОД}}^2}{R_{\text{нагрузки}}} + \sum_{\alpha} i_{\alpha}^2 r}$$

Вычисляя и сравнивая эффективности всех возможных графов решетчатых преобразователей, мы можем найти наиболее эффективный граф.

Сложность решетчатого преобразователя во многом зависит от его размеров [11], так на рисунке 4 показан рост числа узлов/ребер по мере расширения решетки.

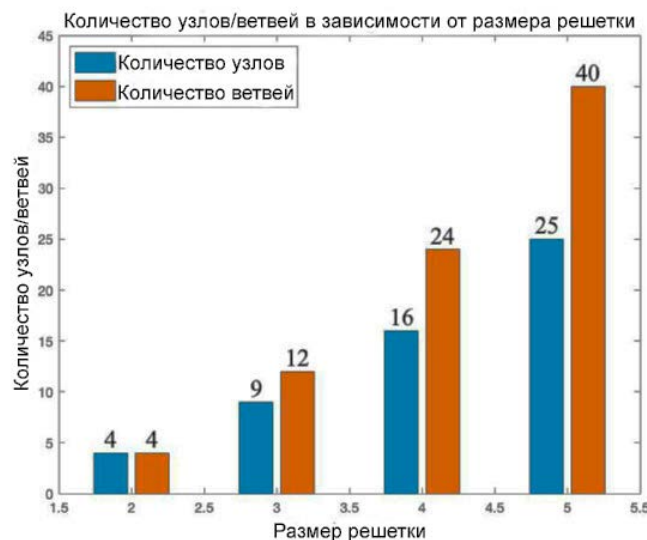


Рис.4 – Количество узлов/ребер в зависимости от размеров решетки

[Авторская разработка]

Возрастающая сложность решетчатых преобразователей отражается на общем количестве путей. Общее количество путей зависит от начального и конечного узлов, а также от размера решетки. Учитывая, что все начальные узлы находятся в нижних левых углах, а все конечные узлы находятся в верхних правых углах, соотношение между количеством путей и размером решетки выглядит следующим образом: решетка размера 2 имеет 2 пути; решетка размера 3 имеет 12 путей; решетка размера 4 имеет 184 пути и т. д. Увеличение размера решетки на единицу приведет к экспоненциальному росту числа путей. Для полностью связанной решетки 3×3 мы находим 12 путей от узла 0 к узлу 8. Два примера показаны на рисунке 5.

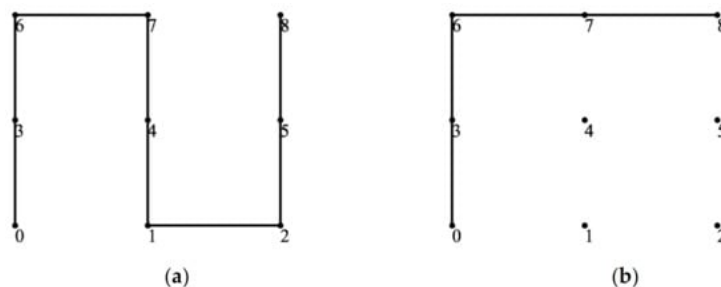


Рис.5 – Примеры путей между узлами 0 и 8 [Авторская разработка]

Для решетчатого преобразователя размера 3×3 мы находим и сравниваем эффективности всех возможных графов. Сначала мы выбираем входной порт как узел 0, а выходной порт как узел 8. Затем мы находим все графы, комбинируя n путей, зацкливая n от одного до двенадцати путей для решетки 3×3 . Мы обнаружили, что наиболее эффективным решетчатым графом 3×3 является полностью связанный граф, как показано на рисунке 6. В частности, при сопротивлении нагрузки 10 Ом и внутреннем сопротивлении 0,01 Ом максимальная эффективность составляет 99,85%.

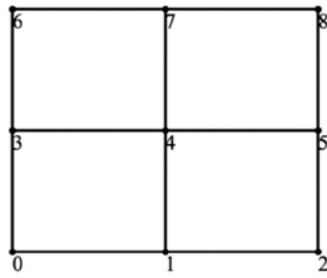


Рис.6 – Наиболее эффективный граф для преобразователя решетки 3×3 из узла 0 в узел 8 [Авторская разработка]

Этот результат согласуется с интуитивным предположением о том, что параллельное подключение большего количества путей приводит к уменьшению тока на каждом пути, что приводит к повышению эффективности. Кроме того, симметрия позволяет равномерно распределять выходной ток между фронтами, избегая высокой рассеиваемой мощности на некоторых преобразователях H-моста [12].

Аналогичные результаты можно получить и для других начальных и конечных узлов. Мы выбираем другую пару входных/выходных терминалов, находим все возможные графы и вычисляем эффективность, соответствующую каждому графу. Затем мы сравниваем результаты и сохраняем наиболее эффективный график [13]. На рисунке 7 показан наиболее эффективный график для решетчатого преобразователя, начиная с узла 0 и заканчивая выходом в узле 6. При одинаковых условиях нагрузки и внутреннего сопротивления наилучший КПД составляет 99,87%.

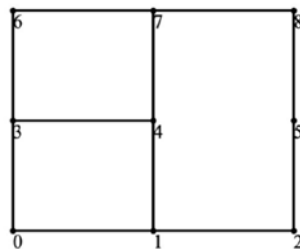


Рис.7. – Наиболее эффективный граф для преобразователя решетки 3×3 из узла 0 в узел 6 [Авторская разработка]

Мы построили модель в MATLAB/Simulink и смоделировали решетчатые преобразователи 3×3 с различными стратегиями управления и измерили токи на каждом H-мосте для проверки расчетов эффективности и выходное напряжение для проверки решения узлового напряжения.

Смоделированное выходное напряжение и ток не меняются со временем, поскольку схема находится в устойчивом состоянии постоянного тока.

Библиографический список:

1. Обзор многоуровневых преобразователей с параллельным подключением. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/ejnFQ> (Дата обращения 26.03.2022)
2. Инновационная топология модульного многоуровневого преобразователя, подходящая для широкого диапазона мощностей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/ejnGf> (Дата обращения 26.03.2022)
3. Управление однофазным каскадным многоуровневым инвертором h-моста для фотоэлектрических систем, подключенных к сети. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/YRpXQ> (Дата обращения 25.03.2022)
4. Многоуровневые инверторные топологии для автономных фотоэлектрических систем. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/emS5W> (Дата обращения 26.03.2022)
5. Модульные многоуровневые преобразователи для электрификации транспорта: проблемы и возможности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/ejnGf> (Дата обращения 27.03.2022)
6. Оценка эффективности модульных многоуровневых преобразователей для аккумуляторных электромобилей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/emS8b> (Дата обращения 26.03.2022)
7. Бестрансформаторный унифицированный регулятор мощности с использованием каскадного многоуровневого инвертора.

- [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/ejnJD> (Дата обращения 27.03.2022)
8. Диагностика коротких замыканий submodule на основе вейвлет-преобразования и машин опорных векторов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/ejnMY> (Дата обращения 25.03.2022)
 9. Модульный преобразователь переменного тока среднего напряжения в постоянный ток низкого напряжения для экстремально быстрой зарядки. [Электронный ресурс]. — Режим доступа — URL: <https://arxiv.org/abs/2007.04369> (Дата обращения 27.03.2022)
 10. Модульный многоуровневый преобразователь с последовательным и параллельным подключением модулей: топология и управление. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/emS9E> (Дата обращения 26.03.2022)
 11. Управление модульным многоуровневым преобразователем с параллельным подключением. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/emSA9> (Дата обращения 27.03.2022)
 12. Уменьшение емкостей MMC за счет распараллеливания submodule симметричного полумоста. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/emSBA> (Дата обращения 27.03.2022)
 13. Методология моделирования и управления решетчатыми преобразователями на основе теории графов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/ejnRt> (Дата обращения 27.03.2022)
 14. Решетчатые преобразователи. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://clck.ru/ejnBE> (Дата обращения 27.03.2022)
 15. H-мост. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <https://www.joyta.ru/> (Дата обращения 27.03.2022)

Оригинальность 94%