

УДК 621.314

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-58-66

Применение многоуровневых инверторов напряжения в распределенных устройствах продольной компенсации

П.А. Рашитов, Д.А. Серегин, М.Д. Аникин, Е.А. Вершанский

Рассмотрены принципы работы многоуровневых схем и методы их управления. Проведен анализ работы многоуровневой схемы в составе трансформаторного распределённого устройства продольной компенсации. Особенностью работы автономного инвертора в составе распределенного устройства продольной компенсации является нагрузка в виде трансформатора, включенного последовательно в линию передачи электроэнергии. В этом случае нагрузка, фактически, представляет собой трансформатор тока. Представлены аналитические выражения для расчета параметров схемы. Приведены результаты спектрального и имитационного моделирования многоуровневой схемы в различных режимах работы. Спектральное моделирование позволило оценить токи и напряжения всех узлов силовой схемы в стационарном режиме и их гармонический состав и показало, что наиболее жестким режимом работы является режим индуктивной инжекции, так как в нем ток инвертора максимален.

Применение многоуровневой схемы предъявляет дополнительные требования к системе управления, которая должна решать проблемы не только стабильного управления выходным напряжением, но и балансировки напряжений на конденсаторах в плече инвертора. При выборе накопителя и конденсатора фильтра следует учитывать, что максимально возможное напряжение на этих компонентах определяется и напряжением необходимой вольтодобавки, и током линии в выпрямительном режиме, и может значительно превышать изначально рассчитанное.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке распределенных устройств продольной компенсации на основе NPC-инвертора.

Ключевые слова: распределенное устройство продольной компенсации, многоуровневая схема.

Для цитирования: Рашитов П.А., Серегин Д.А., Аникин М.Д., Вершанский Е.А. Применение многоуровневых инверторов напряжения в распределенных устройствах продольной компенсации // Вестник МЭИ. 2021. № 3. С. 58—66. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-58-66.

Application of Multilevel Voltage Inverters in Distributed Series Compensation Devices

P.A. Rashitov, D.A. Seregin, M.D. Anikin, E.A. Vershanskiy

The operation principles of multilevel inverter circuits and methods for controlling them are considered. The operation of a multilevel circuit as part of a distributed transformer-based series compensation device is analyzed. The specific feature pertinent to the operation of a self-excited inverter within a distributed series compensation device is that it is loaded on the transformer connected in series into the power transmission line. In this case, the load is in fact a current transformer. Analytical expressions for calculating the circuit parameters are presented. The results of spectral modeling and simulation of the multilevel circuit in different modes of its operation are given. By using the spectral modeling, the currents and voltages of all power circuit components and their harmonic composition were estimated in the steady-state operation mode, and it has been shown that inductive injection is the heaviest mode of operation, because the inverter current reaches its maximum value in this mode. In using the multilevel circuit, additional requirements are posed to the control system, which, in addition to ensuring stable control of the output voltage, must also balance the voltages across the capacitors in the inverter arm. In selecting a storage capacitor and filter capacitor, it should be borne in mind that the maximum possible voltage across these components is determined not only by the necessary boost voltage, but also by the line current in the rectifier mode and can be significantly higher than the originally evaluated value. The obtained results can be used in designing distributed series compensation devices on the basis of an NPC inverter.

Key words: distributed series compensation device, multilevel inverter circuit.

For citation: Rashitov P.A., Seregin D.A., Anikin M.D., Vershanskiy E.A. Application of Multilevel Voltage Inverters in Distributed Series Compensation Devices. Bulletin of MPEI. 2021;3:58—66. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-58-66.

Введение

Одна из актуальных задач, стоящих при передаче электрической энергии, — обеспечение оптимального и гибкого управления потоками мощности, позволяющее не только снизить потери и улучшить пропускную способность сети, но и повысить устойчивость работы компонентов электроэнергетической системы [1].

Воздействие на погонные параметры линии электропередачи является одним из способов управления потоками мощности [2]. Устройства, реализующие данный способ, называют распределенными устройствами продольной компенсации (РУПК) [3].

В настоящее время существует ряд РУПК, основанных на идее СТАТКОМ, позволяющих вводить в линию сопротивление как ёмкостного, так и индуктивного характера [4]. Данные устройства, как правило, основаны на инверторе с накопителем большой емкости, формирующем напряжение (вольтодобавку), пропорциональное величине вводимого сопротивления, со сдвигом $+90^\circ$ или -90° относительно тока линии [5].

Применение РУПК возможно как с использованием трансформатора, так и без него.

Бестрансформаторные РУПК при подключении устанавливаются непосредственно в разрез линии последовательно. При этом весь ток проходит через РУПК, что повышает требования к компонентам, однако исключает использование трансформатора со значительной массой.

В случае использования РУПК с трансформатором в линию последовательно включается силовой трансформатор, первичной обмоткой которого является непосредственно провод линии. Преимущество такого подхода состоит в сниженной нагрузке силовых ключей по току, но при этом возрастает напряжение, которое необходимо сформировать для оказания влияния на передаваемую мощность в линии. Кроме того, увеличивается общая масса из-за использования трансформатора [6].

Принцип действия РУПК следующий. Часть энергии линии отбирается и запасается в ёмкостном накопителе [7]. Преобразователь формирует напряжение, смещенное относительно тока на $+90^\circ$ или -90° , что эквивалентно включению реактивного элемента в расщелку линии [8].

Наличие высоких напряжений в трансформаторном РУПК значительно повышает требование к силовым ключам: рост класса ключей по напряжению ведет к уменьшению КПД, увеличению стоимости и габаритов всего устройства. Такая проблема отсутствует в классе преобразователей, выполненных по многоуровневой топологии, где уровень напряжения на ключах снижается за счет увеличения количества ключей.

В настоящей работе рассмотрена NPC-топология, как самая энергоэффективная из имеющихся [9].

Использование многоуровневой схемы в составе трансформаторного РУПК накладывает определен-

ные требования к системе управления, а также имеет особенности при различных режимах работы [10]. Существуют несколько способов управления многоуровневыми инверторами, различающиеся по сложности реализации и целесообразности применения в зависимости от поставленных задач [11].

Задача данной статьи — анализ силовой части трехуровневого NPC-инвертора, изучение его системы управления, включая систему балансировки напряжений на делительных конденсаторах, а также особенностей работы трехуровневого NPC-инвертора в составе трансформаторного РУПК. Выполнен теоретический расчет и проведено несколько типов моделирования.

NPC-топология

Плечо по топологии многоуровневого инвертора с фиксированной нейтралью (фиксирующими диодами, NPC-топология) представлено на рис. 1.

Схема отличается значительно меньшим числом конденсаторов, но повышенным числом диодов, у которых также имеются потери энергии. В точке подключения блокирующих диодов образуется поделенное конденсаторами напряжение, прикладываемое к выходу при открытии транзистора, коммутирующего эту точку через диод. Замена конденсаторов на диоды позволяет применять схему в малогабаритных преобразователях, рассчитанных на высокое выходное напряжение.

Указанная топология оптимальна для применения в РУПК.

Принципы управления NPC-инвертором

Управление NPC-инвертором не сильно отличается от управления обычным мостовым инвертором (рис. 2) [12].

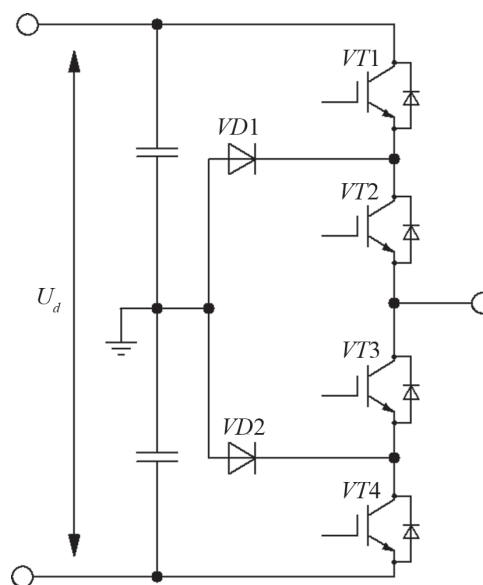


Рис. 1. Плечо трехуровневого NPC-инвертора



Рис. 2. Структурная схема системы управления трехуровневого инвертора

Модулятор создает сигналы для управления каждой ячейкой инвертора (рис. 3). Для n -уровневого инвертора генерируется $n-1$ сигналов развертки.

Таким образом, формируются сигналы управления для плеча многоуровневого инвертора [13]. Для генерации сигналов управления второго плеча необходимо подать на модулятор аналогичный, но инвертированный управляющий сигнал [14]. Воздействуя на модулирующий сигнал, можно управлять параметрами выходного напряжения.

Балансировка напряжений на разделительных конденсаторах

Из-за различных переходных процессов во время выхода инвертора в установившийся режим (изменений нагрузки, неидеальности элементов) неизбежно возникает разбалансировка напряжений на конденсаторном делителе напряжений [15]. В этом случае возрастает напряжение на одной из коммутируемых пар ключей, что, помимо увеличенных энергетических потерь, ведет к аварийному состоянию.

На осциллограмме (рис. 4) изображено выходное напряжение на выходе АИН без балансировки напряжений на конденсаторах.

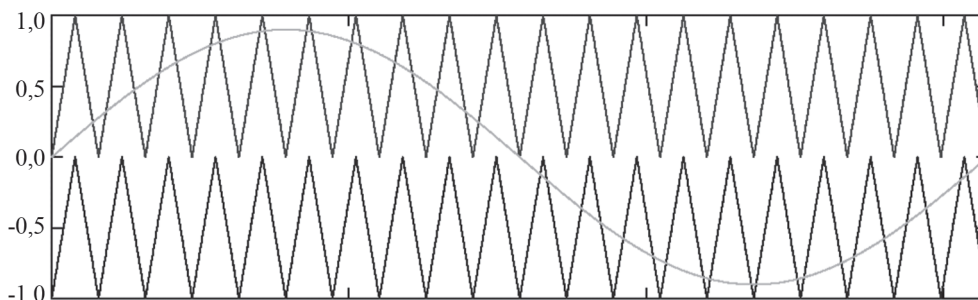


Рис. 3. Сигналы модуляторы для трехуровневого автономного инвертора напряжения (АИН)

Из данных рис. 4 хорошо видно, что, несмотря на то, что система управления инвертора успевает подстраиваться так, что кривая напряжения после фильтра обретает синусоидальную форму, напряжение, формируемое первой ключевой группой, значительно больше напряжения, формируемого второй ключевой группой. Следовательно, первая ключевая группа испытывает значительную перегрузку, что, рано или поздно, приведет к аварийной ситуации. Такой режим сводит на нет все преимущества многоуровневых схем: все напряжение блокируется одним ключом, коэффициент гармоник близок к одноуровневой схеме.

Решением описанной проблемы является обратная связь по напряжению, воздействующая на управляющий сигнал модулятора [2]. Разность напряжений на конденсаторах (ошибка баланса) прибавляется к опорному сигналу, идущему к модулятору.

Особенности применения многоуровневого автономного инвертора напряжения в составе распределенного устройства продольной компенсации

На рисунке 5 изображена структурная схема трансформаторного РУПК на основе трехуровневого NPC-инвертора.

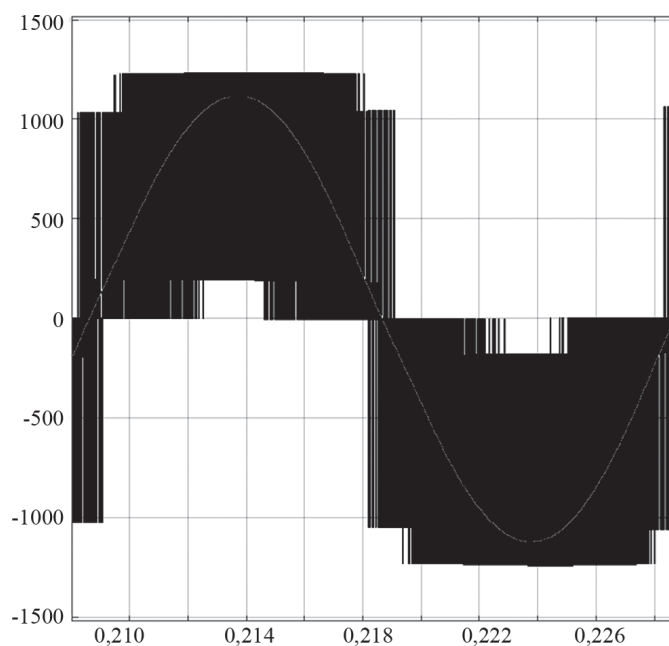


Рис. 4. Выходное напряжение разбалансированного инвертора

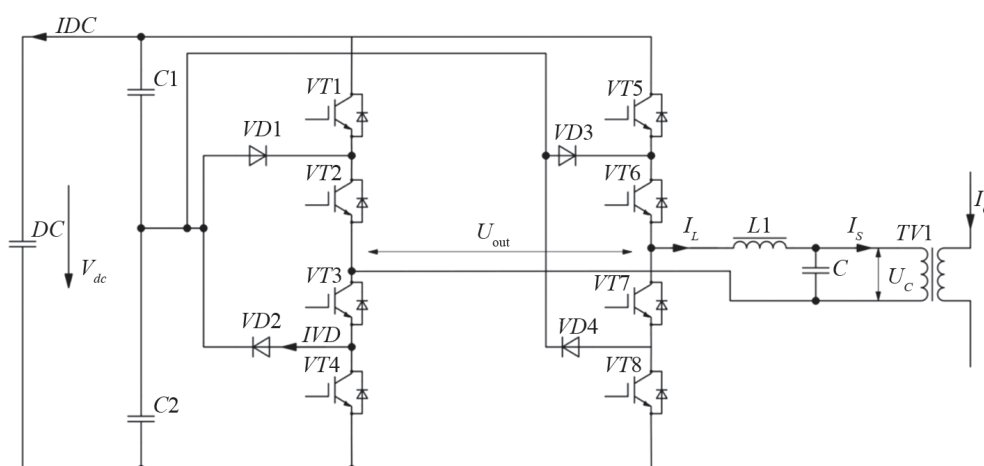


Рис. 5. Схема многоуровневого инвертора в составе трансформаторного РУПК

Особенность работы АИН в составе РУПК выражена нагрузкой в виде трансформатора, включенного последовательно в линию передачи электроэнергии. В этом случае нагрузка, фактически, представляет собой трансформатор тока. Это значит, что ток, проходящий через АИН, практически не зависит от формируемого напряжения и определяется током линии.

Часть тока линии протекает через конденсатор фильтра, а часть — через дроссель фильтра и АИН.

Инвертор формирует синусоидальное напряжение, сдвинутое по фазе относительно тока линии на $+90^\circ$ или -90° . Вводимое в линию реактивное сопротивление определяется уравнением [3]:

$$X_{eq} = U_{DSCD} / I_{line},$$

где U_{DSCD} — действующее значение вводимого напряжения в линию; I_{line} — действующее значение тока линии.

Напряжение на выходе АИН формируется из заряда конденсатора на стороне постоянного напряжения. Управление напряжением на данном конденсаторе осуществляется вариацией угла отклонения выходного напряжения относительно тока линии.

Спектральное моделирование

Спектральное моделирование позволяет быстро оценить токи и напряжения всех узлов силовой схемы в стационарном режиме и их гармонический состав [16]. Токи и напряжение в узлах цепи вычисляют в комплексной форме по законам Ома и Кирхгофа. Воздействия ключей определяют переключаящими функциями, прикладываящими определенное напряжение на выход, когда ключ замкнут [17].

Приведем пример моделирования для трехуровневого инвертора с частотой коммутации 20 кГц и дейст-

вующим выходным напряжением 1000 В при коэффициенте модуляции 0,9.

Модулирующие синусоиды описываются выражениями:

$$U_{\text{mod1}}(\theta) = K_m \sin(\theta);$$

$$U_{\text{mod2}}(\theta) = K_m \sin(\theta).$$

Сигналы развертки имеют различную форму в зависимости от типа широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Так, для симметричной ШИМ

$$U_{r_sim}(\theta) = \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\sin A\theta - \frac{\pi}{2}\right) + (1,5 - l),$$

где A — отношение частоты коммутации к частоте выходного напряжения; l — номер сигнала развертки.

Напряжение на выходе инвертора описывается переключающими функциями, каждая из которых соответствует транзистору и формируется модулятором:

$$U_{\text{out}} = \frac{E}{2} [(VT_{11} + VT_{12}) - (VT_{21} + VT_{22})];$$

$$VT_{11} = \begin{cases} 1, U_{\text{mod1}} > U_{r1}; \\ 0, U_{\text{mod1}} \leq U_{r1}; \end{cases}$$

$$VT_{12} = \begin{cases} 1, U_{\text{mod1}} > U_{r1}; \\ 0, U_{\text{mod1}} \leq U_{r2}; \end{cases}$$

$$VT_{21} = \begin{cases} 1, U_{\text{mod2}} > U_{r1}; \\ 0, U_{\text{mod2}} \leq U_{r1}; \end{cases}$$

$$VT_{22} = \begin{cases} 1, U_{\text{mod2}} > U_{r2}; \\ 0, U_{\text{mod2}} \leq U_{r2}. \end{cases}$$

Результат такой функции — форма напряжения на выходе инвертора до фильтра (рис. 6). Для наглядности частота коммутации на рис. 6 уменьшена во много раз.

По итогам анализа можно сравнить различные типы модуляции по гармоническому составу, разложив полученный сигнал в ряд Фурье и вычислив ТНД (табл. 1).

Из данных табл. 1 видно, что у ШИМ с симметричной модуляцией лучший коэффициент нелинейных искажений [18]. Основная доля высших гармоник приходится на частоты, кратные частоте коммутации.

Таблица 1

ТНД для разных типов модуляции

Тип ШИМ	ТНД, %
По фронту	30,1
По спаду	30,1
Симметричная	28,4

Для установления выходного напряжения и формы тока дросселя следует рассмотреть фильтр более детально [19].

Токи и напряжения опишем через законы Кирхгофа в комплексной форме:

$$\begin{cases} I_L = \frac{U_{\text{out}} - [(I_L - I_s)/pC]}{pL}; \\ U_C = \frac{[(U_{\text{out}} - U_C)/pL] - I_s}{pC}, \end{cases}$$

где I_s — ток сети, приведенный ко вторичной стороне и задаваемый со сдвигом $\pi/2$ (емкостная инжекция) или $-\pi/2$ (индуктивная инжекция).

Значения параметров фильтра в первом приближении следует выбрать так, чтобы резонансная частота фильтра была ниже частоты коммутации и не попадала в какую-либо из гармоник. Параметры фильтра стоит уточнить при расчете устойчивости системы и настройке ПИД-регуляторов.

Моделирование позволяет получить форму тока дросселя для индуктивного и емкостного типов инжекции (рис. 7) и показывает, что при индуктивном типе инжекции ток дросселя больше, чем при емкостном. Это и является наихудшим режимом работы.

Аналогичным образом ведется расчет формы напряжения на конденсаторе фильтра.

Зная ток дросселя, по законам Кирхгофа можно получить ток накопителя энергии. В стационарных режимах работы ток накопителя симметричен относительно нуля, поэтому считаем (при достаточной величине емкости), что напряжение на конденсаторе на период работы сети не меняется. В реальной схеме накопитель будет терять энергию в результате переходных

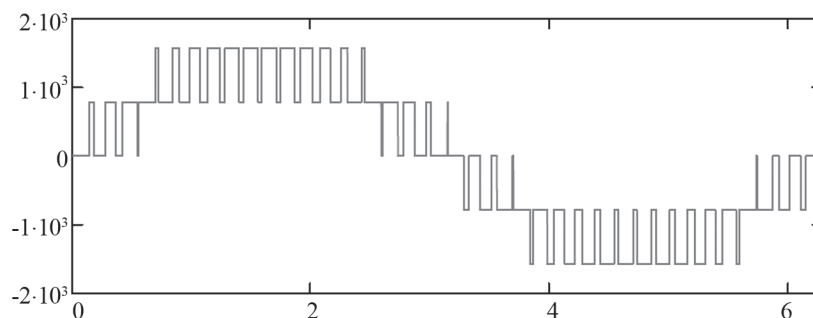


Рис. 6. Выходное напряжение инвертора

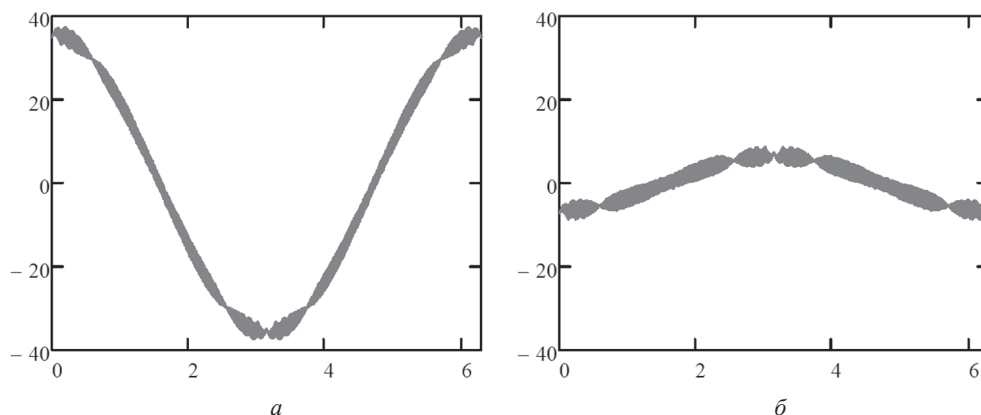


Рис. 7. Формы тока дросселя для индуктивной (а) и емкостной (б) типов инжекции

процессов и наличия токов утечки. Задачу контроля и коррекции должна решать система управления преобразователем. Для заряда конденсатора следует сместить сдвиг тока в сторону нуля относительно рабочего положения. Сдвиг фазы вызовет увеличение тока накопителя, следовательно, рост его напряжения. Сдвиг фазы в противоположную сторону приведет к разрядке конденсатора.

Такой метод управления позволит устанавливать необходимое напряжение накопителя для поддержания оптимального коэффициента модуляции.

Имитационное моделирование

Спектральное моделирование позволяет оценить характеристики преобразователя в стационарных режимах работы, но не дает представления о переходных процессах схемы, процессах выхода на режим. Для полного понимания работы схемы следует использовать имитационное моделирование, позволяющее оценить правильность приведенных расчетов.

Имитационная Matlab Simulink модель состоит из инвертора (см. рис. 5). Сеть имитируется двумя источниками напряжения, работающими на активно-индук-

тивное сопротивление линии (рис. 8). Номинальный ток линии — 750 А.

Моделирование демонстрирует степень влияния спроектированного РУПК на ток воздушной линии (табл. 2).

Смоделированная зависимость строго линейна и подтверждает теоретические выкладки.

Отдельно следует рассмотреть режим работы инвертора, в котором ключи инвертора стационарно закрыты. В этом случае схема представляет собой обычный диодный выпрямитель. В случае, когда напряжение на накопителе энергии меньше, чем напряжение, создаваемое током сети на конденсаторе фильтра, диоды будут закрыты, и весь ток проходит через конденсатор.

Максимальное напряжение на конденсаторе фильтра равно:

$$U_{C_{\max}} = \sqrt{2} \frac{I_s}{2\pi f_s}$$

Напряжение на конденсаторе фильтра имеет синусоидальную форму, и как только оно превышает напряжение накопителя, диоды ключей открываются,

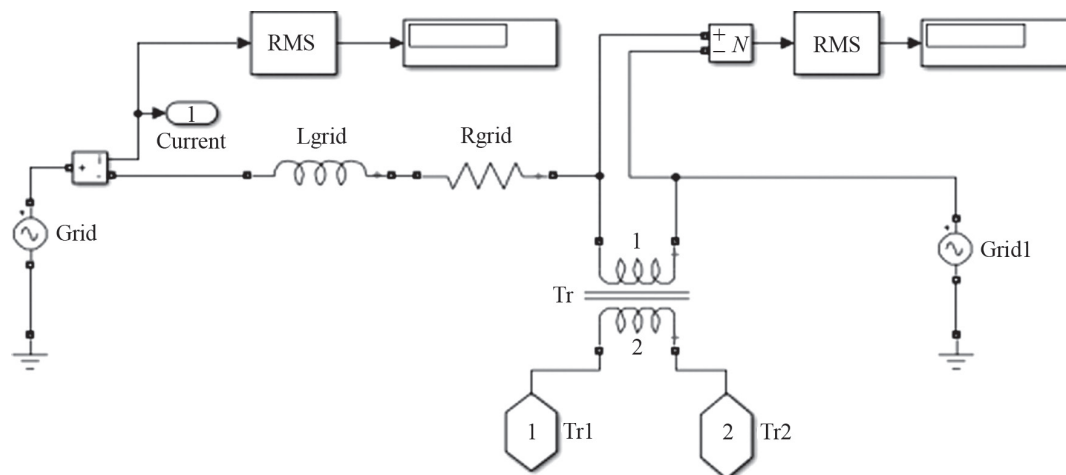


Рис. 8. Имитационная модель сети

Таблица 2

Зависимость тока линии от величины введенной вольтодобавки

Вольтодобавка, В	Ток линии, А	
	$\pi/2$	$-\pi/2$
0	750,0	750,0
2	750,5	749,5
4	751,0	749,0
6	751,5	748,5
8	752,0	748,0
10	752,5	747,5
12	753,0	747,0
14	753,5	746,5
16	754,0	746,0
18	754,5	745,5
20	755,0	745,0

и накопитель начинает заряжаться, причем итоговое максимальное значение напряжения, до которого заряжается накопитель, составляет $U_{C_{\max}}$. Это подтверждают результаты моделирования.

Заключение

Трансформаторные РУПК следует использовать для введения дополнительного реактивного сопротивления в высокочастотные линии электропередач. Их недостатком является необходимость создания высокого напряжения на выходе инвертора для внесения минимальной вольтодобавки, что приводит к увеличенным потерям энергии в ключевых элементах. Многоуровневая схема компенсирует данные проблемы, оставляя преимущество сниженного тока преобразователя. Однако применение многоуровневой схемы предъявляет дополнительные требования к системе управления, которая должна решать не только проблему стабильного управления выходным напряжением, но и проблему балансировки напряжений на конденсаторах в плече инвертора.

Система управления должна учитывать особенности РУПК, отличающие его от обычного инвертора. Работа РУПК на трансформатор тока сильно снижает устойчивость работы преобразователя. Только точная

Литература

1. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. М.: Издат. дом МЭИ, 2012.
2. Панфилов Д.И. и др. Малогабаритные устройства продольной компенсации для воздушных линий электропередачи // Электротехника. 2017. № 7. С. 78—82.
3. Divan D., Johal H. Distributed FACTS – a New Concept for Realizing Grid Power Flow Control // Proc.

настройка ПИД-регуляторов позволяет сделать систему устойчивой во всем диапазоне регулирования тока линии. В отличие от классического инвертора (с одним или двумя контурами связи), РУПК на базе многоуровневого инвертора должен иметь, как минимум, 5 контуров обратной связи [20]:

- по мгновенному выходному напряжению;
- по действующему выходному напряжению;
- по току дросселя фильтра;
- по току линии для определения фазового сдвига выходного напряжения;
- по напряжению на конденсаторах для поддержания баланса напряжений уровней;
- по напряжению на накопителе для поддержания оптимального коэффициента модуляции.

Проведенное моделирование показало, что наиболее жестким режимом работы является режим индуктивной инжекции, поскольку в нем ток инвертора максимален. Все компоненты подбираются именно для обеспечения этого режима.

В режиме работы схемы, когда ключи инвертора закрыты, инвертор представляет собой выпрямитель, последовательно заряжающий накопитель энергии. При выборе накопителя и конденсатора фильтра следует учитывать, что максимально возможное напряжение на компонентах определяется не только напряжением необходимой вольтодобавки, но и током линии в выпрямительном режиме, и оно может значительно превышать изначально рассчитанное. Данный режим нельзя считать безопасным.

При проектировании РУПК следует предусмотреть контактор, замыкающий выводы трансформатора в случае аварии, исключая инвертор из линии.

Существуют несколько режимов управления выходным напряжением инвертора:

- режим регулирования напряжением на накопителе при максимальном коэффициенте модуляции;
- режим регулирования коэффициентом модуляции;
- смешанный режим регулирования.

Каждый из них заслуживает более детального анализа, так как имеет свои особенности и области применения.

Изучение режимов регулирования выходного напряжения и разработка контуров обратной связи станут направлениями дальнейших исследований.

References

1. Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. Upravlenie Potokami Elektroenergii i Povyshenie Effektivnosti Elektroenergeticheskikh Sistem. M.: Izdat. Dom MEI, 2012. (in Russian).
2. Panfilov D.I. i dr. Malogabaritnye Ustroystva Prodol'noy Kompensatsii dlya Vozdushnykh Liniy Elektroperedachi. Elektrotehnika. 2017;7:78—82. (in Russian).
3. Divan D., Johal H. Distributed FACTS – a New Concept for Realizing Grid Power Flow Control. Proc.

36th IEEE Power Electronics Specialists Conf. Brazil, 2005. Pp. 8—14.

4. **Divan D., Kreikebaum F., Imayavaramban M.** Active Smart Wires: an Inverter-less Static Series Compensator // Proc. Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, 2010. Pp. 3626—3630.

5. **Divan D. e. a.** A Distributed Static Series Compensator System for Realizing Active Power Flow Control on existing Power Lines // IEEE PSCE Conf. Records. 2004. Pp. 642—649.

6. **Panfilov D.I., Rashitov P.A., Petrov M.I.** Optimization of Weight and Dimensions of Longitudinal Compensation Devices for Electric Transmission Lines 110—220 kV // Proc. 58th Intern. Sci. Conf. Power and Electrical Eng. Riga, 2017. Pp. 1—6.

7. **Асташев М.Г., Панфилов Д.И., Серегин Д.А., Чернышев А.А.** Анализ режимов работы автономного последовательного регулятора потоков мощности для воздушных линий электропередачи // Известия РАН. Серия «Энергетика». 2017. № 1. С. 39—52.

8. **Rashitov P.A., Vershanskiy E.A., Gorchakov A.V.** The Techniques of Reactance Regulation by the Distributed Static Synchronous Series Compensator in Power Lines // Proc. XX Intern. Conf. Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. M.: NRU MPEI, 2019. Pp. 469—475.

9. **Таранов М.А., Корчагин П.Т.** Многоуровневые и каскадные инверторы // Вестник аграрной науки Дона. 2013. № 1(21). С. 63—66.

10. **Макаров В.Г., Хайбрахманов Р.Н.** Многоуровневые инверторы напряжения. Обзор топологий и применение // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 22. С. 134—138.

11. **Воронин П.А., Воронин И.П., Панфилов Д.И., Рожков Д.В.** Уменьшение перенапряжений и динамических потерь мощности в силовых ключах многоуровневых схем // Известия РАН. Серия «Энергетика». 2014. № 6. С. 41—52.

12. **Колпаков А.И.** Алгоритмы управления многоуровневыми инверторами // Силовая электроника. 2009. № 2. С. 57—65.

13. **Matuskawa K., Yoshida K., Kaku S.** Multilevel Pulse Width Modulation Sinusoidal Inverter with Modulation Switching and Carrier Frequency Modulation // Proc. Electronics and Communication Conf. 1997. V. 80. No. 2. Pp. 35—43.

14. **Rashitov P., Vershanskiy E., Gorchakov A.** Development of Control Algorithms to Ensure Optimal Thermal Modes of Semiconductor Switches in Distributed Static Synchronous Series Compensators // Proc. IEEE Intern. Conf. Environment and Electrical Eng. and Industrial and Commercial Power Systems Europe. 2019. Pp. 1—4.

15. **Брованов С.В., Гришанов Е.В.** Анализ способов баланса напряжений на конденсаторах звена постоянного тока в однофазном трехуровневом преобразователе // Научный вестник НГТУ. 2015. № 1(58). С. 213—230.

36th IEEE Power Electronics Specialists Conf. Brazil, 2005:8—14.

4. **Divan D., Kreikebaum F., Imayavaramban M.** Active Smart Wires: an Inverter-less Static Series Compensator. Proc. Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, 2010:3626—3630.

5. **Divan D. e. a.** A Distributed Static Series Compensator System for Realizing Active Power Flow Control on existing Power Lines. IEEE PSCE Conf. Records. 2004: 642—649.

6. **Panfilov D.I., Rashitov P.A., Petrov M.I.** Optimization of Weight and Dimensions of Longitudinal Compensation Devices for Electric Transmission Lines 110—220 kV. Proc. 58th Intern. Sci. Conf. Power and Electrical Eng. Riga, 2017:1—6.

7. **Astashev M.G., Panfilov D.I., Seregin D.A., Chernyshev A.A.** Analiz Rezhimov Raboty Avtonomnogo Posledovatel'nogo Regulyatora Potokov Moshchnosti dlya Vozdushnykh Liniy Elektropredachi. Izvestiya RAN. Seriya «Energetika». 2017;1:39—52. (in Russian).

8. **Rashitov P.A., Vershanskiy E.A., Gorchakov A.V.** The Techniques of Reactance Regulation by the Distributed Static Synchronous Series Compensator in Power Lines. Proc. XX Intern. Conf. Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. M.: NRU MPEI, 2019:469—475.

9. **Taranov M.A., Korchagin P.T.** Mnogourovnevye i Kaskadnye Invertory. Vestnik Agrarnoy Nauki Dona. 2013;1(21):63—66. (in Russian).

10. **Makarov V.G., Khaybrakhmanov R.N.** Mnogourovnevye Invertory Napryazheniya. Obzor Topologiy i primeneniye. Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta. 2016;19;22:134—138. (in Russian).

11. **Voronin P.A., Voronin I.P., Panfilov D.I., Rozhkov D.V.** Umen'shenie Perenapryazheniy i Dinamicheskikh Poter' Moshchnosti v Silovykh Klyuchakh Mnogourovnevnykh Skhem. Izvestiya RAN. Seriya «Energetika». 2014;6:41—52. (in Russian).

12. **Kolpakov A.I.** Algoritmy Upravleniya Mnogourovnevnyimi Invertorami. Silovaya Elektronika. 2009;2: 57—65. (in Russian).

13. **Matuskawa K., Yoshida K., Kaku S.** Multilevel Pulse Width Modulation Sinusoidal Inverter with Modulation Switching and Carrier Frequency Modulation. Proc. Electronics and Communication Conf. 1997; 80;2:35—43.

14. **Rashitov P., Vershanskiy E., Gorchakov A.** Development of Control Algorithms to Ensure Optimal Thermal Modes of Semiconductor Switches in Distributed Static Synchronous Series Compensators. Proc. IEEE Intern. Conf. Environment and Electrical Eng. and Industrial and Commercial Power Systems Europe. 2019:1—4.

15. **Brovanov S.V., Grishanov E.V.** Analiz Sposobov Balansa Napryazheniy na Kondensatorakh Zvena Postoyannogo Toka v Odnofaznom Trekhurovnevom Preobrazovatele. Nauchnyy Vestnik NGTU. 2015;1(58):213—230. (in Russian).

16. **Чаплыгин Е.Е.** Инверторы напряжения и их спектральные модели. М.: Изд-во МЭИ, 2003.

17. **Рожков Д.В.** Универсальная спектральная модель многоуровневого инвертора напряжения // Вопросы электротехники. 2013. № 3(134). С. 31—36.

18. **Харитонов С.А., Брованов С.В.** Однофазный трехуровневый выпрямитель с улучшенным гармоническим спектром входного тока // Электротехника. 2006. № 10. С. 27—33.

19. **Баховцев И.А.** Анализ выходных характеристик трехуровневого инвертора напряжения с ШИМ // Радиопромышленность. 2012. Вып. 1. С. 124—133.

20. **Берестов В.М.** Алгоритм управления многоуровневым инвертором напряжения // Электротехника. 2007. № 11. С. 7—15.

16. **Chaplygin E.E.** Invertory Napryazheniya i Ikh Spektral'nye Modeli. M.: Izd-vo MEI, 2003. (in Russian).

17. **Rozhkov D.V.** Universal'naya Spektral'naya Model' Mnogourovneвого Invertora Napryazheniya. Voprosy Elektromekhaniki. 2013;3(134):31—36. (in Russian).

18. **Kharitonov S.A., Brovanov S.V.** Odnofaznyy Trekhurovnevyy Vypryamitel' s Uluchshennym Garmonicheskim Spektrom Vkhodnogo Toka. Elektrotekhnika. 2006;10:27—33. (in Russian).

19. **Bakhovtsev I.A.** Analiz Vykhodnykh Kharakteristik Trekhurovneвого Invertora Napryazheniya s SHIM. Radiopromyshlennost'. 2012;1:124—133. (in Russian).

20. **Berestov V.M.** Algoritm Upravleniya Mnogourovnevym Invertorom Napryazheniya. Elektrotekhnika. 2007; 11:7—15. (in Russian).

Сведения об авторах:

Рашитов Павел Ахматович — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ», e-mail: RashitovPA@mpei.ru

Серегин Дмитрий Андреевич — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ», e-mail: SereginDA@mpei.ru

Аникин Михаил Дмитриевич — руководитель группы разработки и моделирования отдела разработки вычислительной техники АО «РТСофт», e-mail: mdanikin@yandex.ru

Вершанский Евгений Александрович — аспирант, ассистент, инженер первой категории кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ», e-mail: vershanskie@mail.ru

Information about authors:

Rashitov Pavel A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Industrial Electronics Dept., NRU MPEI, e-mail: RashitovPA@mpei.ru

Seregin Dmitriy A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Industrial Electronics Dept., NRU MPEI, e-mail: SereginDA@mpei.ru

Anikin Mikhail D. — Head of the Development and Modeling Group of the Computer Engineering Development Dept., JSC «RTSoft», e-mail: mdanikin@yandex.ru

Vershanskiy Evgeniy A. — Ph.D.-student, Assistant, Engineer of the First Category of Industrial Electronics Dept., NRU MPEI, e-mail: vershanskie@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 17.11.2020

The article received to the editor: 17.11.2020