

DOI 10.54596/2958-0048-2024-4-176-182

УДК 621.31

МРНТИ 27.19

АНАЛИЗ ТОПОЛОГИЙ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРАМолдахметов С.С.^{1*}, Гаголина О.С.¹, Доскужинов Е.Т.¹^{1*}НАО «Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева»

Петропавловск, Казахстан

*Автор для корреспонденции: ssmoldahmetov@ku.edu.kz**Аннотация**

В статье представлен сравнительный анализ топологий многоуровневых инверторов с акцентом на количество силовых компонентов, необходимых для реализации каждой схемы в зависимости от числа уровней выходного напряжения. Рассмотрены наиболее популярные топологии, включая многоуровневый инвертор с ограничительными диодами, инвертор с переключаемыми конденсаторами, каскадный мостовой инвертор, а также топология на основе коммутатора уровней. Показано, что топология на основе коммутатора уровней требует минимальное количество силовых компонентов, что снижает затраты на реализацию и делает конструкцию более компактной и экономически эффективной при большом числе уровней напряжения. Результаты исследования могут быть полезны при выборе оптимальной схемы многоуровневого инвертора для потребителя электрической энергии, требующих высокого качества выходного напряжения.

Ключевые слова: многоуровневый инвертор, силовая электроника, топология инвертора, коэффициент нелинейных искажений, преобразование напряжения, экономическая эффективность.

КӨПДЕНГЕЙЛІ ИНВЕРТОРДЫ ЖАСАУ ТОПОЛОГИЯЛАРЫН ТАЛДАУМолдахметов С.С.^{1*}, Гаголина О.С.¹, Доскужинов Е.Т.¹^{1*}«Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КеАҚ

Петропавл, Қазақстан

*Хат-хабар үшін авторы: ssmoldahmetov@ku.edu.kz**Аннотация**

Мақала шығыс кернеу деңгейлерінің санына байланысты көп деңгейлі инверторларды іске асыру үшін қажетті қуат компоненттерінің санына баса назар аудара отырып, топологияларын салыстырмалы талдауға арналған. Ең танымал топологиялар қарастырылады, соның ішінде көп деңгейлі шектеулі диодты инвертор, ауыспалы конденсатор инверторы, каскадты көпір инверторы және деңгей коммутаторына негізделген топология. Деңгей коммутаторына негізделген топология қуат компоненттерінің ең аз санын қажет ететіні көрсетілген, бұл іске асыру шығындарын азайтады және кернеу деңгейлерінің көп санында дизайндықтам және үнемді етеді. Зерттеу нәтижелері жоғары сапалы шығыс кернеуі мен минималды бұрмалануды қажет ететін қолданбалар үшін оңтайлы көп деңгейлі инвертор тізбегін таңдауда пайдалы болуы мүмкін.

Кілт сөздер: көп деңгейлі инвертор, инвертор топологиясы, қуат электроникасы, желілік емес бұрмалаулар коэффициенті, кернеуді түрлендіру, экономикалық тиімділік.

ANALYSIS OF MULTILEVEL INVERTER IMPLEMENTATION TOPOLOGIES

Moldakhmetov S.S.^{1*}, Gagolina O.S.¹, Doskuzhinov E.T.¹

^{1*}Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan

*Corresponding author: ssmoldahmetov@ku.edu.kz

Abstract

The article presents a comparative analysis of multilevel inverter topologies, emphasizing the number of power components required for each configuration depending on the number of output voltage levels. The most popular topologies are considered, including the diode-clamped multilevel inverter, the flying capacitor inverter, the cascaded H-bridge inverter, and the level-shifted switch topology. It is shown that the level-shifted switch topology requires the minimum number of power components, which reduces implementation costs and makes the design more compact and economically efficient, especially for high voltage levels. The research results may be useful in selecting the optimal multilevel inverter configuration for power consumers that require high-quality output voltage.

Кілт сөздер: multilevel inverter, power electronics, inverter topology, total harmonic distortion, voltage conversion, cost efficiency.

Введение

Современные требования к качеству электроэнергии предъявляют повышенные стандарты к характеристикам мощности и синусоидальности напряжения, что особенно важно для точного и устойчивого функционирования высокотехнологичного оборудования. Одним из перспективных решений, способным обеспечить минимальные искажения напряжения, является многоуровневый инвертор, который за счет своей ступенчатой формы выходного сигнала значительно снижает коэффициент нелинейных искажений (КНИ) [1]. При увеличении количества уровней многоуровневого инвертора выходное напряжение все ближе приближается к синусоидальной форме, что улучшает качество электроэнергии и снижает нагрузку на подключенные устройства.

Однако увеличение количества уровней связано с необходимостью применения большего числа силовых элементов, которые зачастую являются дорогостоящими. При этом количество силовых элементов, используемых для реализации инвертора, зависит от топологии построения инвертора и количества уровней. На фоне развития альтернативной энергетики и появления новых мощных силовых модулей, способных коммутировать большие токи и напряжения, за последние два десятилетия было предложено множество схем и топологий многоуровневых инверторов [2, 3]. Таким образом, возникает задача оптимального выбора топологии и количества уровней многоуровневого инвертора, который обеспечил бы баланс между улучшением качества выходного напряжения и экономической эффективностью конструкции силового инвертора.

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ указанных топологий многоуровневых инверторов с точки зрения количества силовых компонентов, необходимых для их реализации. Это позволит определить наиболее подходящую топологию с точки зрения экономической эффективности и функциональности, что особенно актуально для задач, связанных с развитием альтернативной энергетики и улучшением качества электроэнергии.

Методы исследования

Наиболее популярными топологиями являются многоуровневый инвертор с ограничивающими диодами (МИ с ОД), многоуровневый инвертор с промежуточными конденсаторами (МИ с ПК) и каскадный мостовой инвертор (КМИ). Каждая из этих

топологий имеет свои преимущества и недостатки в зависимости от структуры и области применения. В данной статье также рассматривается топология, представленная в [4, 5] (ПТ), также обладающая рядом уникальных характеристик.

Пусть n обозначает число уровней выходного напряжения инвертора. Для каждой из рассмотренных топологий выразим количество силовых компонентов, необходимых для реализации инвертора, через n .

Наиболее распространенной схемой многоуровневого инвертора является использование ограничительных диодов [6]. В такой схеме диоды обеспечивают равномерное распределение напряжения между конденсаторами, ограничивая напряжение источника питания и предотвращая перегрузку каждого из элементов. Для построения инвертора с n уровнями требуется $(n-1)$ конденсаторов, $2(n-1)$ коммутационных ключей и $(n-1) \times (n-2)$ ограничительных диодов. На рисунке 1а представлена схема пятиуровневого инвертора с ограничительными диодами.

Основным недостатком данной схемы является большое количество силовых диодов, что увеличивает сложность конструкции и затраты на ее реализацию. Кроме того, использование большого числа диодов увеличивает потребление энергии и снижает общий КПД инвертора, что может быть значимым ограничением для систем, требующих высокой эффективности.

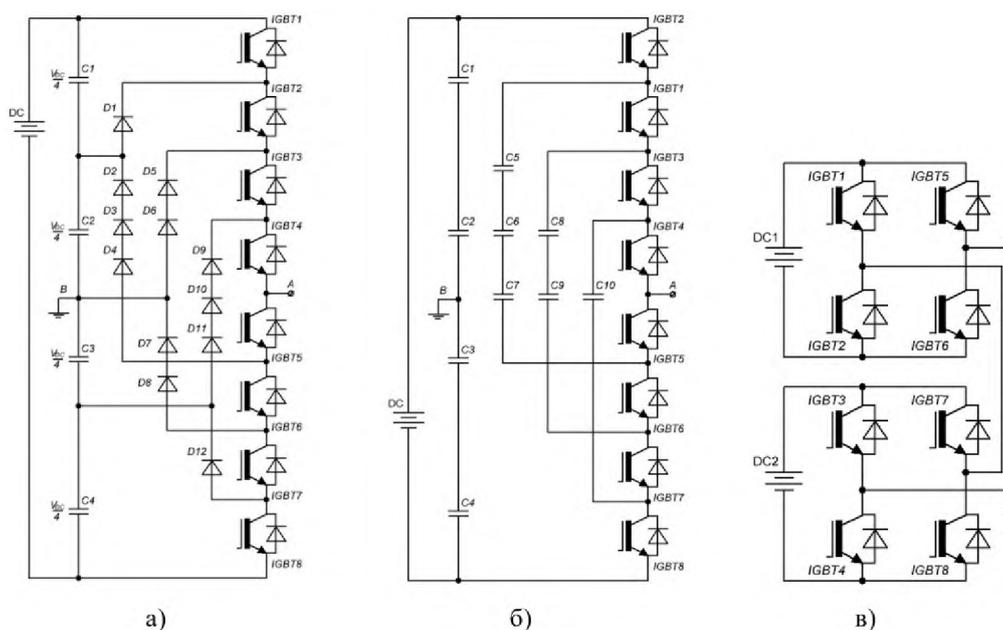


Рисунок 1. Типовые топологии реализации многоуровневых инверторов:
 а) многоуровневый инвертор с ограничивающими диодами; б) многоуровневый инвертор с промежуточными конденсаторами; в) каскадный мостовой инвертор

Топология инверторов с промежуточными конденсаторами представляет собой конфигурацию, где дополнительные уровни напряжения формируются путем подключения конденсаторов между основными компонентами. Конденсаторы при этом заряжаются или разряжаются в зависимости от фазы переключений, обеспечивая требуемый уровень напряжения [7]. Эта топология позволяет уменьшить гармонические искажения и улучшить качество выходного напряжения, так как наличие дополнительных уровней обеспечивает более гладкую форму сигнала.

Основное преимущество инверторов с промежуточными конденсаторами заключается в отсутствии необходимости в большом количестве независимых источников питания для создания промежуточных уровней напряжения, что упрощает конструкцию. Однако данная схема требует точного управления зарядом и разрядом каждого конденсатора, а также постоянного поддержания баланса напряжения для предотвращения нестабильности работы системы. Это усложняет управление и проектирование, особенно при увеличении числа уровней.

Для реализации инвертора с промежуточными конденсаторами требуется $(n-1) \times (n-2) / 2$ конденсаторов. С увеличением количества уровней схема становится более громоздкой и менее удобной в эксплуатации, что ограничивает ее применение в определенных областях, требующих компактности.

Каскадный мостовой инвертор представляет собой топологию, в которой однофазные мостовые инверторы соединяются последовательно для получения ступенчатого выходного напряжения [8]. Преимущество каскадного мостового инвертора заключается в его модульной структуре, которая упрощает конструкцию и обслуживание, а также в возможности работы при высоких уровнях напряжения и тока. Выходное напряжение при такой топологии формируется путем суммирования напряжений каждой ячейки в определенный момент времени. При использовании n мостовых инверторов можно получить выходное напряжение с $(2n+1)$ уровнями. Но при этом каждый H-мост содержит $4n$ ключей коммутации.

Представляет интерес еще одна топология, отличающаяся тем, что задача по формированию уровней напряжения и задача по его инвертированию выполняются отдельными блоками [9]. Данная топология представлена на рисунке 2.

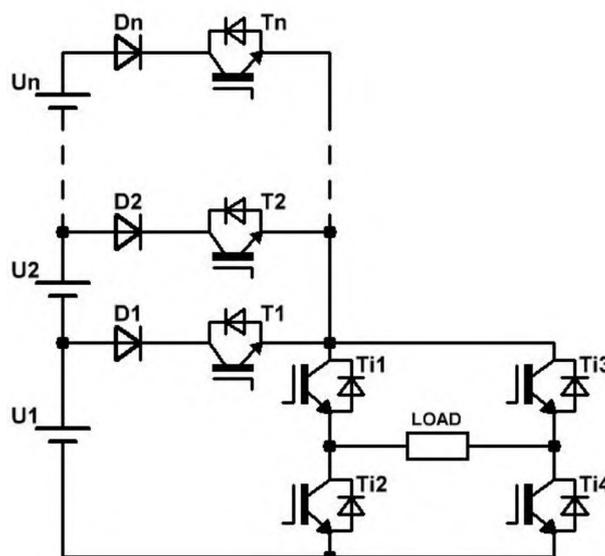


Рисунок 2. Топология на основе коммутатора уровней

Топология на основе коммутатора уровней имеет ряд преимуществ, основным из которых является возможность отдельного от процедуры инвертирования формирования формы выходного напряжения. Топология также позволяет формировать в инверторе любое количество ступеней напряжения. При этом в качестве источников питания можно использовать различное количество аккумуляторов, солнечных батарей или других источников энергии.

Результаты исследования

С учетом высокой стоимости компонентов силовой электроники, таких как аккумуляторные батареи, силовые диоды, коммутационные ключи и конденсаторы, важно учитывать общее количество этих элементов для каждой топологии отдельно. Таким образом, можно вывести уравнение зависимости общего числа силовых компонентов N от числа уровней напряжения инвертора n для каждой из топологий. Полученные результаты аналитических и математических исследований сведены в таблицу 1 и представлены графически на рисунке 3, что позволяет визуальнo оценить различия в потребностях каждой топологии.

Таблица 1. Количество используемых элементов для реализации топологий инвертора

№	Параметр	МИ с ОД	МИ с ПК	КМИ	ПТ
1	Ключи коммутации	$4(n-1)$	$4(n-1)$	$4n$	$n+4$
2	Источники питания	$2n$	$2n$	n	n
3	Силовые диоды	$2(n-1)(n-2)$	0	0	n
4	Силовые конденсаторы	0	$(n-1)(n-2)$	0	0
	Итого компонентов N	$2n^2$	n^2+3n-2	$5n$	$3n+4$

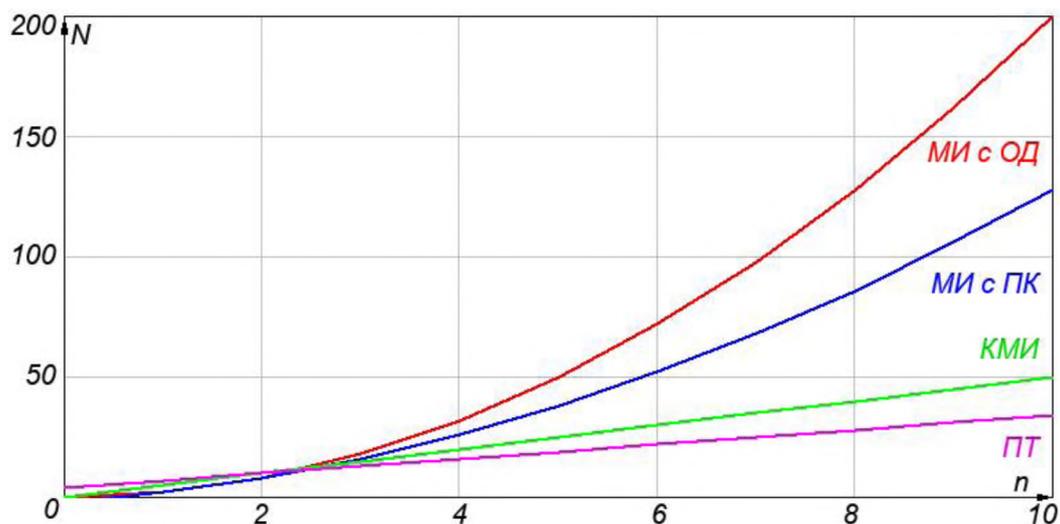


Рисунок 3. График зависимостей количества силовых компонентов от числа уровней напряжения инвертора

Из графика видно, что топология на основе коммутатора уровней (ПТ) требует наименьшего числа силовых компонентов по сравнению с другими схемами, такими как многоуровневый инвертор с ограничительными диодами (МИ с ОД), инвертор с переключаемыми конденсаторами (МИ с ПК) и каскадный мостовой инвертор (КМИ). С увеличением числа уровней n , преимущество топологии на основе коммутатора уровней становится все более очевидным.

Наибольшее количество компонентов требуется для топологии с ограничительными диодами, что ограничивает ее экономическую эффективность при высоких уровнях выходного напряжения. Топология с переключаемыми конденсаторами и каскадный мостовой инвертор также показывают тенденцию к увеличению числа компонентов, хотя и в меньшей степени, чем МИ с ОД. Таким

образом, топология на основе коммутатора уровней является предпочтительным вариантом для инверторов с большим числом уровней. В то же время, при выходном напряжении с числом уровней менее трех, альтернативные схемы могут быть более целесообразными.

Заключение

Результаты анализа показали, что предлагаемая топология на основе коммутатора уровней обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с другими решениями. На графике зависимостей видно, что для реализации многоуровневого инвертора по предлагаемой топологии требуется меньшее количество силовых компонентов, что снижает общую стоимость и повышает компактность конструкции. Эти преимущества становятся особенно очевидными при большом числе уровней, где затраты и габариты инверторов с другими топологиями значительно возрастают. Для инверторов с небольшим числом уровней (менее трех) более подходящими могут быть другие топологии, так как их реализация требует меньше затрат.

Таким образом, результаты данного исследования могут быть использованы для выбора оптимальной топологии многоуровневого инвертора в зависимости от конкретных технических и экономических требований, что позволит эффективно удовлетворить потребности современных систем энергоснабжения и повысить надежность и стабильность их работы.

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось Комитетом науки МНВО РК (грант № AP13268732).

References:

1. Yasmeena, G. Tulasi Ram Das. Cascaded Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2013. – № 4(8) – P. 353-367.
2. Bindeshwar Singh, Nupur Mittal, K.S. Verma, Deependra Singh, S. P. Singh, Rahul Dixit, Manvendra Singh, Aanchal Baranwal. Multi-level inverter: a literature survey on topologies and control strategies. *International Journal of Reviews in Computing*. – 2012. – №10. – P. 1-16.
3. Mamatha Sandhu, Tilak Thakur. Multilevel Inverters: Literature Survey - Topologies, Control Techniques and Applications of Renewable Energy Sources - Grid Integration. *Journal of Engineering Research and Applications*. – 2014. – 4(3). – P. 644-652
4. Isembergenov N.T., Moldahmetov S.S. Insepov D.G., Sposob realizacii mnogourovnevoogo silovogo invertora na baze IGBT / *Nauchnyj zhurnal «Vestnik Kazahstansko-Britanskogo tekhnicheskogo universiteta» №4 (35), 2015. – S. 95-100.*
5. Sayat Moldakhmetov, Nalik Issembergenov, Dauren Insepov and Seitzhan Orynbayev. Implementation of multilevel power inverter / *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 11, №11. – P. 6886-6890.
6. Rosli Omar, Mohammed Rasheed, Marizan Sulaiman, Ahmed Al-Janad. A Study of a Three Phase Diode Clamped Multilevel Inverter Performance for Harmonics Reduction. *MAGNT Research Report*. – 2014. – 2 (4). – P. 62-71.
7. Maheshkumar N., Maheshkumar V., Divya M. The new topology in Flying Capacitor Multilevel Inverter // 2013 International Conference on Computer Communication and Informatics, 2013. – P. 1-6.
8. Ebrahim Babaei, Somayeh Alilu and Sara Laali. A New General Topology for Cascaded Multilevel Inverters with Reduced Number of Components Based on Developed H-Bridge. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2014. – 61(8). – P. 3932-3939.
9. Sayat Moldakhmetov, Nalik Issembergenov and Abdurazak Kasymov. Multilevel inverter based on level switch and H-bridge / *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, – 2015. – Vol. 10, №16. – P. 6884-6887.

Information about the authors:

Moldakhmetov S.S. – corresponding author, PhD, Associate Professor of the Department of Energetic and radioelectronics, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, email: ssmoldahmetov@ku.edu.kz;

Gagolina O.S. – M.Sc., senior lecturer of the Department of Energetic and radioelectronics, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, email: osgagolina@ku.edu.kz;

Doskuzhinov E.T. – student, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: bokakz1603@gmail.com.