

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИММЕТРИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ КАСКАДНЫХ ИНВЕРТОРОВ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Сидоров Г.С.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Ключевые слова: многоуровневый инвертор, высоковольтный электропривод отказоустойчивость, симметрирование линейных напряжений, управляемое смещение нейтральной точки, аварийный режим.

Аннотация. Статья посвящена решению задачи симметрирования линейных напряжений для каскадных инверторов в аварийном режиме работы. Алгоритм симметрирования линейных напряжений обеспечивает повышение отказоустойчивости высоковольтных преобразователей частоты, построенных на базе топологии Н-мост, исключая введение аппаратной избыточности силовых ячеек в его конструкцию. В результате решения задачи получена универсальная программа для вычисления пространственного расположения векторов фазных и линейных напряжений системы преобразователь частоты-электродвигатель. Табличные данные, приведенные в данной статье, могут быть использованы для составления матриц обратного координатного преобразования аналогичного Э. Кларка для создания необходимого искажения фазных напряжений.

SOLUTION TO THE LINE VOLTAGE SYMMETRIZATION PROBLEM FOR CASCADED INVERTERS IN EMERGENCY OPERATION MODE

Sidorov G.S.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Keywords: multilevel inverter, high-voltage electric drive, fault tolerance, line voltage symmetrization, controlled neutral point shift, emergency mode.

Abstract. This paper addresses the problem of line voltage symmetrization for cascaded inverters under emergency operating conditions. The proposed line voltage symmetrization algorithm enhances the fault tolerance of high-voltage frequency converters based on the H-bridge topology. Algorithm enhances the fault tolerance without requiring the hardware redundancy introduction of power cells into the frequency converter design. As the result of solving this problem, the universal program has been developed for calculating the spatial arrangement of the phase and line voltage vectors of the frequency converter – motor system. The tabulated data presented in this paper can be used to construct inverse coordinate transformation matrices analogous to the Clarke transformation in order to generate the required distortion of the phase voltages.

Модульная архитектура Н-мостовых каскадных преобразователей частоты позволяет кардинально повышать отказоустойчивость электромеханических комплексов благодаря интеграции методов аппаратной избыточности и алгоритмической адаптации. В современной практике сложились следующие базовые стратегии обеспечения отказоустойчивости инвертора высоковольтного преобразователя частоты (ВПЧ):

1. Оперативное замещение дефектного силового модуля резервным элементом, находящимся в состоянии «горячего» ожидания, что достигается введением в структуру преобразователя гарантированного числа избыточных ячеек [1].

2. Реализация нагрузочного резервирования путем использования вентильного запаса и форсирования по напряжению сохранивших работоспособность модулей, что неизбежно сопряжено с необходимостью завышения установленной мощности питающего трансформатора и повышенными требованиями к предельным характеристикам полупроводниковых ключей.

3. Обеспечение симметрирования фазных напряжений посредством принудительного вывода из работы одинакового количества неисправных ячеек в каждой фазе, что гарантирует сохранение симметричности режима ценой неизбежного снижения амплитуды выходного напряжения.

4. Шунтирование отказавшего модуля с применением алгоритма симметрирования линейных напряжений, позволяющее сохранить работоспособность системы за счет варьирования потенциала нейтральной точки и искажения фазных напряжений инвертора. Данный подход, не требующий введения структурной избыточности, в настоящее время позиционируется как экономически наиболее целесообразное решение [2-5].

5. Организация резервирования с полной реконфигурацией топологии силового тракта и сопутствующей коррекцией глобального алгоритма широтно-импульсной модуляции [6-8].

В таблице 1 приведено сравнение реализованных функций отечественными производителями ВПЧ.

Табл. 1. Сравнение функциональных возможностей отечественных ВПЧ

Реализованные алгоритмы фирмами производителями	ООО «НПП ИТСПб»	АО «Электромаш»	ЗАО «ЭРАСИБ»	ООО «Электротекс-ИН»	АО «ЧЭАЗ»	ООО «ТЭС»	ООО "НПО Рустмаш"	ООО "Л-Старт"	ООО «НПП Балком»	ЗАО «НПО Стройтехавтоматика»	ООО «НПП ЭКРА»
Алгоритм шунтирования уровня силовых ячеек	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Алгоритм шунтирования силовой ячейки с вводом резерва	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Алгоритм диагностики и реконфигурации силовой части и изменения режима коммутации	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Алгоритм шунтирования силовой ячейки с применением алгоритма симметрирования линейных напряжений	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓

Постановка задачи алгоритма симметрирования линейных напряжений.

При отказе ячейки Н-мостового преобразователя необходимо исказить фазные напряжения для сохранения симметрии линейных напряжений. Гальваническая развязка нейтралей ВПЧ и электродвигателя (ЭД) позволяет обеспечить симметрию токов двигателя при несимметрии фазных напряжений [1-5].

Предлагается метод расчёта смещения нейтрали на основе новой системы уравнений, применимый для произвольного числа модулей N на фазу при любой комбинации работоспособных ячеек. Предыскажение фазных напряжений

реализуется модификацией матрицы обратного преобразования Э. Кларк ($\alpha\beta \rightarrow UVW$) [2, 5].

Для решения задачи симметрирования линейных напряжений предлагается ввести следующие ограничения и требования:

1. Выходные линейные напряжения инвертора U_{UV} , U_{VW} , U_{WU} образуют симметричную систему векторов: $|U_{UV}| = |U_{VW}| = |U_{WU}|$, где индексы UV , VW , WU указывают на соответствующие пары фаз U , V , W .

2. Модуль вектора линейного напряжения на выходе достигает своего предельного значения: $|U_{UV}| \rightarrow \max$, $|U_{VW}| \rightarrow \max$, $|U_{WU}| \rightarrow \max$.

3. В составе выходных линейных напряжений нулевая последовательность отсутствует.

4. Напряжение звена постоянного тока (ЗПТ) U_{DC} силовых ячеек стабилизировано и поддерживается на неизменном уровне: $U_{DC_k} = \text{const}, \forall k \in \{1 \dots N\}$, где k – любой номер силовой ячейки, N – количество силовых ячеек в одной фазе.

5. Выходное напряжение силовой ячейки принимается равным $|U_{U(V,W)k}| = U_{DC_k}$, где $U_{U(V,W)k}$ – напряжение в фазе U , V , W для k силовой ячейки. Коммутационные потери в полупроводниковых ключах не учитываются.

6. Выходное напряжение фазы определяется как сумма выходных напряжений силовых ячеек в одной фазе.

Алгоритм решения задачи. На рисунке 1 приведены 2 состояния для каскадного инвертора напряжения.

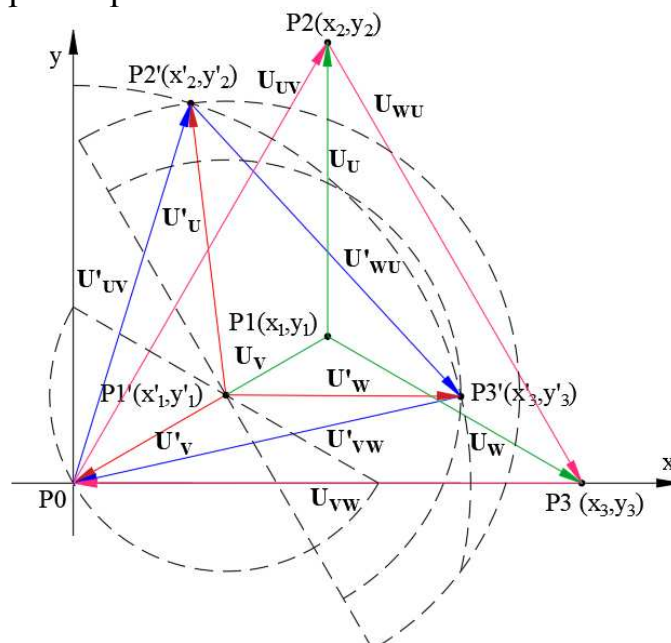


Рис. 1. Пояснение к выбору начала системы декартовой системы координат и выводу системы уравнений расчета системы векторов

Векторами U_{UV} , U_{WU} , U_{VW} , U_U , U_V , U_W обозначено состояние штатного режима работы, а U'_{UV} , U'_{WU} , U'_{VW} , U'_U , U'_V , U'_W аварийное состояние с $N_U = 5$, $N_V = 3$, $N_W = 4$ после выполнения алгоритма симметрирования линейных напряжений. Точкой $P0$ обозначено начало системы координат, точками $P2$ и $P2'$

– концы векторов фазы U , $P3$ и $P3'$ – концы векторов фазы W , $P1$ и $P1'$ – положение нейтральной точки системы векторов.

На основании принятых обозначений на рисунке 1 может быть составлена следующая система уравнений (1) и ограничений (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_2'^2 + y_2'^2 = x_3'^2 + y_3'^2; \\ x_1' = |U_V'| \cos(\pi / 6); \\ y_1' = |U_V'| \sin(\pi / 6); \\ (x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2 = |U_U'|^2; \\ (x_3' - x_1')^2 + (y_3' - y_1')^2 = |U_W'|^2; \\ \frac{x_3' \cdot x_2' + y_3' \cdot y_2'}{x_2'^2 + y_2'^2} = \cos(\frac{\pi}{3}); \\ \cos(\phi'_{UV}) = \frac{(x_2' - x_1') \cdot (0 - x_1') + (y_2' - y_1') \cdot (0 - y_1')}{\sqrt{(x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2} \cdot \sqrt{(0 - x_1')^2 + (0 - y_1')^2}}; \\ \cos(\phi'_{WU}) = \frac{(x_3' - x_1') \cdot (x_2' - x_1') + (y_3' - y_1') \cdot (y_2' - y_1')}{\sqrt{(x_3' - x_1')^2 + (y_3' - y_1')^2} \cdot \sqrt{(x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2}}; \\ \cos(\phi'_{VW}) = \frac{(x_3' - x_1') \cdot (0 - x_1') + (y_3' - y_1') \cdot (0 - y_1')}{\sqrt{(x_3' - x_1')^2 + (y_3' - y_1')^2} \cdot \sqrt{(0 - x_1')^2 + (0 - y_1')^2}}; \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi'_{UV} = \arccos(\cos(\phi'_{UV})) \text{ при } 0 \leq \phi'_{UV} \leq \pi; \\ \phi'_{WU} = \arccos(\cos(\phi'_{WU})) \text{ при } 0 \leq \phi'_{WU} \leq \pi; \\ \phi'_{VW} = \arccos(\cos(\phi'_{VW})) \text{ при } 0 \leq \phi'_{VW} \leq \pi; \\ x_3' > 0, \end{array} \right. \quad (2)$$

где $x_2, y_2, x_2', y_2', x_3, y_3, x_1, y_1$ – координаты точек $P2, P2', P3', P1'$ соответственно; $\phi'_{UV}, \phi'_{WU}, \phi'_{VW}$ – углы между векторами фазных напряжений в поврежденной системе.

Несимметрия фазных напряжений инвертора вызывает дополнительный угловой сдвиг между векторными системами напряжений преобразователя и двигателя. Данное положение иллюстрируется на рисунке 2. В дополнение к рисунку 1 на рисунке 2 введена симметричная система фазных токов I_U, I_V, I_W и симметричная система фазных напряжений обмотки статора ЭД $U_{Uд}, U_{Vд}, U_{Wд}$ с нейтральной точкой отмеченной $P4$.

Для расчета угловых положений следует воспользоваться системой уравнений (3) и (4). Для двигательного режима работы инвертора предлагается ввести ограничения на фазовые углы $\phi'_U, \phi'_V, \phi'_W$, используемые для расчета коэффициента мощности в каждой фазе, исходя из условия положительной активной мощности. Коэффициент мощности должен быть положительным, а угол сдвига фаз находится в пределах первого или четвертого квадрантов. Нарушение данного условия приводит к инверсии потока мощности и неконтролируемому

повышению напряжения ЗПТ силовых ячеек, что влечёт срабатывание программных и аппаратных защит.

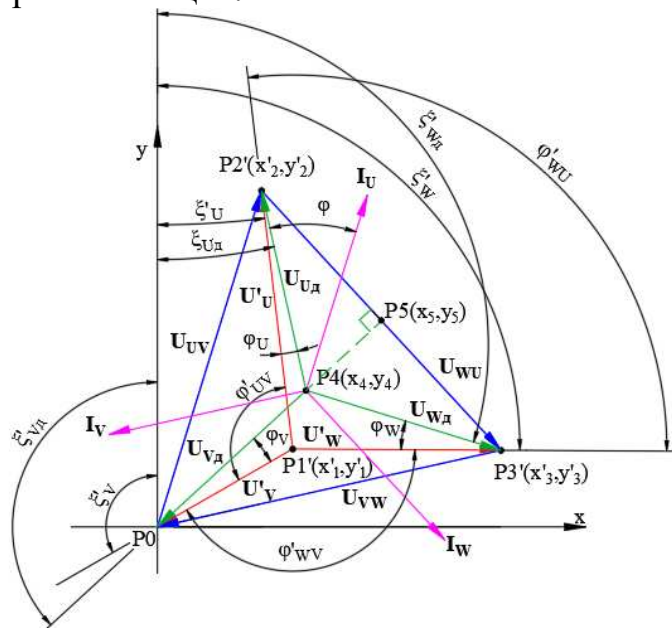


Рис. 2. Пояснения к расчету углов между фазными напряжениями и расчету углов между фазными напряжениями и осью y

$$\left\{ \begin{array}{l} x_5 = \frac{x'_2 + x'_3}{2}; \\ y_5 = \frac{y'_2 + y'_3}{2}; \\ k = \frac{y_5}{x_5}; \\ x_4 = \frac{|U'_{VW}|}{\sqrt{3(1+k^2)}}; \\ y_4 = \frac{|U'_{VW}| \cdot k}{\sqrt{3(1+k^2)}}; \\ \xi'_U = \text{atan } 2(x'_2 - x'_1, y'_2 - y'_1); \\ \xi'_V = \frac{2\pi}{3}; \\ \xi'_W = \text{atan } 2(x'_3 - x'_1, y'_3 - y'_1); \\ \xi_{Uд} = \text{atan } 2(x'_2 - x_4, y'_2 - y_4); \\ \xi_{Vд} = \text{atan } 2(x'_3 - x_4, y'_3 - y_4); \\ \xi_{Wд} = \text{atan } 2(0 - x_4, 0 - y_4). \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_{I_U} = \xi_{Uд} - \varphi; \\ \xi_{I_V} = \xi_{Vд} - \varphi; \\ \xi_{I_W} = \xi_{Wд} - \varphi; \\ \varphi_U = \xi_{Uд} - \xi'_U; \\ \varphi_V = \xi_{Vд} - \xi'_V; \\ \varphi_W = \xi_{Wд} - \xi'_W; \\ \varphi'_U = \xi_{I_U} - \xi'_U; \\ \varphi'_V = \xi_{I_V} - \xi'_V; \\ \varphi'_W = \xi_{I_W} - \xi'_W, \end{array} \right. \quad (4)$$

где x_4, y_4, x_5, y_5 – координаты точек P4 и P5 соответственно; $\varphi_U, \varphi_V, \varphi_W$ – углы сдвига фаз искаженной фазной системы инвертора, ξ'_U, ξ'_V, ξ'_W – угловое положение векторов искаженной системы фазных напряжений относительно оси y; $\xi_{Uд}, \xi_{Vд}, \xi_{Wд}$ – угловые положения симметричной системы фазных напряжений

двигателя относительно оси y ; ξ_{I_U} , ξ_{I_V} , ξ_{I_W} – угловое положение фазных токов относительно оси y ; Φ – угол сдвига фаз между напряжением и током ЭД, для расчёта коэффициента мощности; k – коэффициент наклона прямой P0P5.

Сдвиг фаз между током и напряжением определяется не только параметрами схемы замещения электродвигателя и моментом сопротивления на валу ЭД, но и дополнительным угловым сдвигом Φ_U , Φ_V , Φ_W , возникающим при реализации алгоритма симметрирования линейных напряжений.

На основании систем уравнений (1)-(4) разработана программа на языке MATLAB позволяющая находить возможные решения для любого N числа силовых ячеек в фазе. В общем случае решение может содержать N^3 комбинаций. Например, для 13-уровневого инвертора число комбинаций равно 216 из них 156 имеют решение, при этом только 118 решений позволяют работать в диапазоне $\cos(\varphi) \in [0.32, 1]$.

В таблицах 2 и 3 приведены решения для системы уравнений (1)-(4) до комбинации (4, 4, 4). А также $\cos(\varphi_{\min})$, где $\varphi_{\min}$ – минимально допустимое значение угла между фазным током и напряжением ЭД, при котором возможна работа инвертора в двигательном режиме, выход за пределы данного значения ведет к опрокидыванию инвертора и бесконтрольному заряду ЗПТ.

Табл. 2. Допустимые сочетания работоспособных силовых ячеек в фазе для инвертора с 6 ячейками на фазу, обеспечивающие симметрию выходных линейных напряжений

N_U , шт.	N_V , шт.	N_W , шт.	$\xi'_{U,^\circ}$	$\xi'_{V,^\circ}$	$\xi'_{W,^\circ}$	$\xi_{Uд,^\circ}$	$\xi_{Vд,^\circ}$	$\xi_{Wд,^\circ}$	$U_{\text{лин}},$ о.е.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	4	4	0	120	-120	0	120	-120	6,928
4	4	5	-102,636	120	8,682	-111,318	128,682	8,682	7,453
4	4	6	-82,819	120	18,59	-101,41	138,59	18,59	7,842
4	5	4	8,682	120	-128,682	0	120	-120	7,453
4	5	5	-113,578	120	12,844	-113,578	126,422	6,422	8,047
4	5	6	-97,181	120	18,59	-106,45	133,55	13,55	8,536
4	6	4	18,59	120	-138,59	0	120	-120	7,842
4	6	5	-124,229	120	18,59	-114,96	125,04	5,04	8,536
4	6	6	-109,471	120	21,058	-109,471	130,529	10,529	9,121
5	4	4	-128,682	120	-17,364	-128,682	111,318	-8,682	7,453
5	4	5	-6,422	120	-113,578	0	120	-120	8,047
5	4	6	-97,181	120	4,229	-110,731	129,269	9,269	8,536
5	5	4	-132,844	120	-6,422	-126,422	113,578	-6,422	8,047
5	5	5	0	120	-120	0	120	-120	8,66
5	5	6	-106,26	120	6,87	-113,13	126,87	6,87	9,196
5	6	4	-138,59	120	4,229	-125,04	114,96	-5,04	8,536
5	6	5	6,87	120	-126,87	0	120	-120	9,196
5	6	6	-114,624	120	10,751	-114,624	125,376	5,376	9,784
6	4	4	-138,59	120	-37,181	-138,59	101,41	-18,59	7,842
6	4	5	-124,229	120	-22,819	-129,269	110,731	-9,269	8,536
6	4	6	-10,529	120	-109,471	0	120	-120	9,121
6	5	4	-138,59	120	-22,819	-133,55	106,45	-13,55	8,536
6	5	5	-126,87	120	-13,74	-126,87	113,13	-6,87	9,196
6	5	6	-5,376	120	-114,624	0	120	-120	9,784
6	6	4	-141,058	120	-10,529	-130,529	109,471	-10,529	9,121
6	6	5	-130,751	120	-5,376	-125,376	114,624	-5,376	9,784
6	6	6	0	120	-120	0	120	-120	10,392

Табл. 3. Допустимые сочетания работоспособных силовых ячеек в фазе для инвертора с 6 ячейками на фазу, обеспечивающие симметрию выходных линейных напряжений

N_U , шт.	N_V , шт.	N_W , шт.	$\varphi_U, ^\circ$	$\varphi_V, ^\circ$	$\varphi_W, ^\circ$	$\varphi'_{UV}, ^\circ$	$\varphi'_{WU}, ^\circ$	$\varphi'_{VW}, ^\circ$	$\cos(\varphi_{\min})$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	4	4	0	0	0	120	120	120	0,01
4	4	5	-8,682	8,682	0	137,364	111,318	111,318	0,16
4	4	6	-18,59	18,59	0	157,181	101,41	101,41	0,32
4	5	4	-8,682	0	8,682	111,318	137,364	111,318	0,16
4	5	5	0	6,422	-6,422	126,422	126,422	107,156	0,12
4	5	6	-9,269	13,55	-5,04	142,819	115,771	101,41	0,17
4	6	4	-18,59	0	18,59	101,41	157,181	101,41	0,32
4	6	5	9,269	5,04	-13,55	115,771	142,819	101,41	0,24
4	6	6	0	10,529	-10,529	130,529	130,529	98,942	0,19
5	4	4	0	-8,682	8,682	111,318	111,318	137,364	0,16
5	4	5	6,422	0	-6,422	126,422	107,156	126,422	0,12
5	4	6	-13,55	9,269	5,04	142,819	101,41	115,771	0,24
5	5	4	6,422	-6,422	0	107,156	126,422	126,422	0,12
5	5	5	0	0	0	120	120	120	0,01
5	5	6	-6,87	6,87	0	133,74	113,13	113,13	0,12
5	6	4	13,55	-5,04	-9,269	101,41	142,819	115,771	0,17
5	6	5	-6,87	0	6,87	113,13	133,74	113,13	0,12
5	6	6	0	5,376	-5,376	125,376	125,376	109,249	0,1
6	4	4	0	-18,59	18,59	101,41	101,41	157,181	0,32
6	4	5	-5,04	-9,269	13,55	115,771	101,41	142,819	0,17
6	4	6	10,529	0	-10,529	130,529	98,942	130,529	0,19
6	5	4	5,04	-13,55	9,269	101,41	115,771	142,819	0,24
6	5	5	0	-6,87	6,87	113,13	113,13	133,74	0,12
6	5	6	5,376	0	-5,376	125,376	109,249	125,376	0,1
6	6	4	10,529	-10,529	0	98,942	130,529	130,529	0,19
6	6	5	5,376	-5,376	0	109,249	125,376	125,376	0,1
6	6	6	0	0	0	120	120	120	0,01

Закключение. В настоящей работе решена актуальная задача симметрирования линейных напряжений каскадных Н-мостовых инверторов при аварийном отключении силовых ячеек. Разработанный математический аппарат, основанный на управляемом смещении нейтральной точки инвертора, позволяет обеспечить отказоустойчивость высоковольтного частотно-регулируемого электропривода без введения аппаратной избыточности.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

Предложена и обоснована система уравнений (1-4), описывающая геометрические соотношения между векторами фазных и линейных напряжений в условиях асимметрии силовой части. Полученные аналитические зависимости позволяют для произвольного числа ячеек N на фазу определить допустимые комбинации работоспособных модулей и рассчитать необходимые угловые сдвиги и амплитудные коэффициенты искажённых фазных напряжений.

На основе разработанной модели создана универсальная вычислительная программа в среде MATLAB, обеспечивающая полный перебор всех возможных состояний системы.

Впервые систематизированы и представлены в форме детальных табличных данных (табл. 2, 3) все разрешимые комбинации для диапазона дисбаланса (4, 4, 4)-(6, 6, 6). Показано, что ограничение рабочей области комбинациями с дисбалансом

не более (4, 4, 4) является инженерно обоснованным компромиссом, обеспечивающим устойчивую работу привода без чрезмерного потребления реактивной мощности и без риска неконтролируемого заряда звена постоянного тока.

Выполнен анализ функциональных возможностей отечественных производителей ВПЧ (табл. 1), который показал, что алгоритм шунтирования с симметрированием линейных напряжений реализован лишь у части разработчиков, а алгоритмы реконфигурации силовой части с изменением алгоритма ШИМ отсутствуют полностью. Это подтверждает актуальность и своевременность представленного исследования.

Полученные табличные данные и программный инструментарий могут быть непосредственно использованы проектными организациями и предприятиями-разработчиками при создании систем управления отказоустойчивыми электроприводами большой мощности. Дальнейшие исследования целесообразно направить на интеграцию предложенного алгоритма с методами диагностирования силовых ячеек и разработку гибридных стратегий, сочетающих смещение нейтрали с локальным шунтированием для покрытия неразрешимых комбинаций.

Список литературы

1. Wu B. High-power converters and AC drives. – Chichester: John Wiley, 2006.
2. Hammond P.W. Enhancing the reliability of modular medium-voltage drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002, vol. 49, no. 5, pp. 948-954. DOI: 10.1109/TIE.2002.803172.
3. Нос О.В., Дыбко М.А., Нос Н.И. Алгоритмы управления многоуровневым инвертором напряжения с каскадным включением Н-мостов в аварийном режиме работы // Электротехника. – 2021. – №12. – С. 37-47.
4. Lezana P. Extended operation of cascade multicell converters under fault condition // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009, vol. 56, no. 7, pp. 2697-2703. DOI: 10.1109/TIE.2009.2019771.
5. Jeongwoo K., Younghoon C. Improved neutral shift method for fault tolerant operation of three phase MLCI // Journal of Power Electronics. 2020, vol. 20, no. 4, pp. 979-989. DOI: 10.1007/s43236-020-00161-0.
6. Сидоров Г.С., О.В. Управление многоуровневыми преобразователями частоты на базе каскадного включения Н-мостов в аварийных режимах работы высоковольтного электропривода // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 22-24 окт. 2025г. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2025. – С. 483-487.
7. Lakhdari M., Rabhi B., Benaissa A. A new structural reconfiguration for multilevel inverters with fault tolerance capability // Acta Polytechnica. 2024, vol. 64, no. 4, pp. 379-384.
8. Khomfoi S., Tolbert L. M. Fault Detection and Reconfiguration Technique for Cascaded H-bridge 11-level Inverter Drives Operating under Faulty Condition // 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. – Bangkok, Thailand: IEEE, 2007. – P. 1035-1042.
9. Jahan H.K. Reconfigurable Multilevel Inverter With Fault-Tolerant Ability // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018, vol. 33, no. 9, pp. 7880-7893.
10. Rodriguez J. Operation of a Medium-Voltage Drive Under Faulty Conditions // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005, vol. 52, no. 4, pp. 1080-1085. DOI: 10.1109/TIE.2005.851645.
11. Eaton D., Rama J., Hammond P. Neutral Shift: Five Years of Continuous Operation with Adjustable Frequency Drives // IEEE Industry Applications Magazine. 2003, vol. 9, no. 6, pp. 47-54.

Сведения об авторе:

Сидоров Георгий Сергеевич – аспирант, м.н.с.