

## ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КАСКАДНЫХ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

**Введение.** Для электропривода переменного тока большой мощности (0.3-10) МВт среднего напряжения (до 10 кВ) в настоящее время находят применение многоуровневые преобразователи частоты (МПЧ), напряжение которых в ступенчатом виде аппроксимирует синусоидальный закон. Наилучшие показатели вход-выход имеют каскадные МПЧ (КМПЧ). Их основной недостаток - сложность силовой схемы и, как следствие, высокая стоимость. Так МПЧ фирм ASIRobicon (серия «Perfect Harmoni», «New Baby Harmoni») и Toshiba Mitsubishi Electric («TМdrive – MV»), выпускаемые в классе напряжений 6 кВ, содержат, соответственно, 5 и 6 однофазных автономных инверторов напряжения (АИН) на фазу при общем количестве ключей 60 и 72.

Поэтому актуальной проблемой является минимизация силовых цепей КМПЧ, чему посвящено большое количество публикаций. При этом решение вопроса связывается с использованием гибридных схем, в частности, на базе многоуровневого источника постоянного напряжения с последующим инвертированием [1], несимметричных схем [2], несимметрии напряжений источников звена постоянного тока [2,3]. Наибольший эффект, в плане уменьшения количества ключей на уровень выходного напряжения, для разных схемных решений обеспечивается с использованием несимметрии напряжений. Вместе с тем, реализация принципа несимметрии предполагает ряд ограничений и имеет свои особенности.

**Постановка задач исследования.** Целью работы является исследование основных принципов реализации несимметричных КМПЧ с учетом обеспечения требуемых характеристик вход-выход.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- исследовать принципы формирования выходного напряжения с учетом загрузки и режимов работы источников постоянного тока (ИПТ) при различных соотношениях значений их напряжений;
- исследовать возможность формирования режимов работы ИПТ и определить структуру звена постоянного тока для обеспечения высокого качества входного тока КМПЧ;
- определить соответствующие алгоритмы управления.

**Материалы исследования.** В традиционных КМПЧ на фазу используется  $n$  последовательно соединенных АИН и, соответственно,  $n$  изолированных ИПТ с напряжением  $U$ . Напряжение каждого АИН принимает значения  $+U, 0, -U$ . Напряжения  $n$  инверторов суммируются, выходное напряжение фазы КМПЧ принимает значения  $U_{\text{вых}} = \{0; \pm U; \pm 2U; \dots; \pm nU\}$  с дискретностью изменения  $U$ , а общее количество уровней (включая нулевой)  $N = (2n+1)$ . Количество ключей на фазу  $k = 4n$ . Фазы МПЧ и двигателя соединены по схеме «Y».

Принцип несимметрии состоит в том, что для АИН используются различные напряжения, значения которых кратные минимальному значению  $U$  (в дальнейшем используем относительные единицы (о.е.), полагая  $U=1$ ). Комбинируя эти напряжения, можно обеспечить равноступенчатую аппроксимацию синусоиды с шагом  $U$ . Как результат, можно уменьшить количество АИН и ИПТ на фазу МПЧ при одновременном увеличении количества уровней. Как вариант, можно сохранить количество уровней выходного напряжения, сократив до 3 количество АИН. Естественно, что это возможно для различных соотношений напряжений.

Рассмотрим соотношение напряжений ИПТ  $U_1:U_2:U_3=1:3:9$ . Количество уровней при этом 13 и определяется рядом комбинаций: 1, (3-1), 3, (3+1), (9-3-1), (9-3), (9-3+1), (9-1), 9, (9+1), (9+3-1), (9+3), (9+3+1). Нетрудно заметить, что роль АИН различна. Формирующая роль отводится АИН1, который переключается на каждом шаге. В тоже время на АИН2 и АИН3 приходится минимум переключений и они могут быть выполнены на высоковольтных ключах с меньшим быстродействием. Для формирования выходного напряжения в данном случае целесообразно использовать амплитудное регулирование с квантованием синусоиды задания по уровню с усреднением [2]. Важная особенность соотношения - наличие операции вычитания, что может изменить режим работы соответствующего ИПТ. При использовании ИПТ с односторонней проводимостью это недопустимо.

Активная мощность  $P$ , потребляемая АИН от ИПТ, определяется первыми гармониками выходного напряжения и тока:  $P=U_{(1)}I_{(1)}\cos\phi$ . При практически синусоидальном токе мощность однозначно определяется амплитудой первой гармоники напряжения соответствующего АИН. В о.е. уровни квантования синусоиды с амплитудой  $A=0-13$ , составляют:  $U_{\text{КВ}i}=0.5; 1.5; 2.5; \dots; 12.5$ . Углы, соответствующие началу соответствующей ступени выходного напряжения,  $\theta_i = \arcsin \frac{U_{\text{КВ}i}}{A}$ , относительная длительность ступени  $\alpha_i = \frac{\pi - 2\theta_i}{\pi}$ .

Значения амплитуды первой гармоники выходного напряжения каждого из трех АИН:

$$U_{2m(1)} = \frac{12}{\pi} \left[ \sin\left(\alpha_2 \frac{\pi}{2}\right) - 2 \sin\left(\alpha_5 \frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\alpha_8 \frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\alpha_{11} \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad U_{3m(1)} = \frac{36}{\pi} \sin\left(\alpha_5 \frac{\pi}{2}\right),$$

$$U_{1m(l)} = \frac{4}{\pi} [\sin(\alpha_1 \frac{\pi}{2}) - 2 \sin(\alpha_2 \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_3 \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_4 \frac{\pi}{2}) - 2 \sin(\alpha_5 \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_6 \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_7 \frac{\pi}{2}) - 2 \sin(\alpha_8 \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_9 \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_{10} \frac{\pi}{2}) - 2 \sin(\alpha_{11} \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_{12} \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_{13} \frac{\pi}{2})]$$

Зависимости первых гармоник в функции от  $A$  приведены на рис.1. Нетрудно заметить, что для АИН1 и АИН2 в процессе регулирования амплитуды выходного напряжения направление передачи энергии периодически изменяется. Использование ИПТ с рекуперацией нецелесообразно, особенно для АИН2, так как на него приходится больше 20% мощности МПЧ.

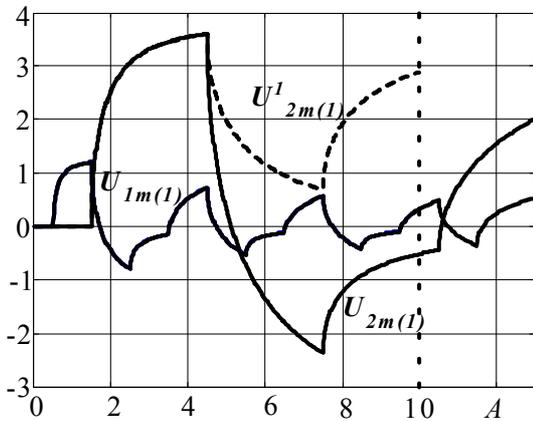


Рис.1. Зависимости  $U_{m(l)}=f(A)$

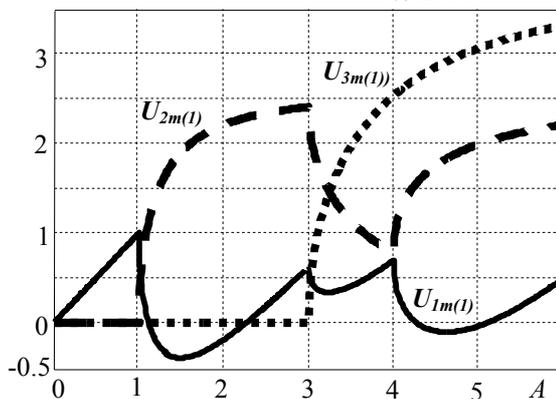


Рис.2. Зависимости  $U_{m(l)}=f(A)$

Проблема может быть решена, если ограничиться соотношением  $U_1:U_2:U_3=1:3:6$ , когда источник  $U_2$  работает только в выпрямительном режиме (соответствующая зависимость  $U_{2m(l)}$  на рис.1 показана пунктиром и ограничена  $A=10$ ). Как показали исследования, значение  $U_{1m(l)} \geq 0$  при  $A > 1.5$  можно обеспечить предварительной модуляцией задания третьей гармоникой, амплитуда которой изменяется в зависимости от  $A$ . Для улучшения гармонического состава на низких частотах выходного напряжения при  $A < 3$  целесообразно использовать многоуровневую ШИМ для АИН1 и АИН2.

Другой вариант – выбор соотношения напряжений, исходя из сохранения количества уровней ( $n=5$  или  $n=6$ ). Для  $n=6$  соотношение составит  $U_1:U_2:U_3=1:2:3$  (для  $n=5$ , соответственно,  $U_1:U_2:U_3=1:1:3$ ). В данном случае использование ШИМ не только возможно, но и необходимо, поскольку количество уровней уменьшается. Наиболее эффективным при этом является использование квантования по уровню с обработкой ошибки квантования методом ШИМ напряжения  $U_1$  [2]. Однако, и в данном случае (рис.2) имеет место изменение режима работы  $U_1$  ( $U_{1m(l)} < 0$ ). Как показали исследования, использованием предварительной модуляции задания третьей гармоникой и корректировкой уровней квантования можно обеспечить при  $A > 1.11$  поддержание положительного значения  $U_{1m(l)} \rightarrow 0$  при соответствующем перераспределении нагрузки ИПТ. Условие  $U_{1m(l)} \rightarrow 0$  и, соответственно,  $P_1 \rightarrow 0$  важно с позиции минимального искажения формы входного тока КМПЧ выпрямителем соответствующего уровня. Следует отметить, что при данном соотношении на-

пряжений целесообразно использовать 6 источников с напряжением  $U_1=U$ : два с последовательным соединением по 12ти-фазной схеме и три с последовательным соединением по 18ти-фазной схеме. При этом напряжения комплектов вторичных обмоток выпрямителей одинакового уровня в разных фазах МПЧ должны совпадать по фазе из условия подавления субгармоник во входном токе МПЧ. Аналогичная структура звена постоянного тока может использоваться и при соотношении  $U_1:U_2:U_3=1:3:6$  (источник  $U_2$  по составной 12-ти- фазной схеме, а источник  $U_3$  по 24- фазной). Для соотношения  $U_1:U_2:U_3=1:1:3$  ( $n=5$ ) целесообразно использовать один уровень квантования  $U_{KB}=2$ , когда включается третий источник. Ошибка квантования обрабатывается АИН1 и АИН2 с использованием мультиплексорной ШИМ, чем достигается идентичная загрузка их ИПТ и возможность использования для них эквивалентной 12ти-фазной схемы.

**Выводы.** При использовании в звене постоянного тока источников с односторонней проводимостью реализация несимметричных КМПЧ возможна только при определенных соотношениях напряжений ИПТ и при использовании специальных алгоритмов формирования выходного напряжения.

Для обеспечения высокого качества входного тока КМПЧ в качестве источников целесообразно использовать составные многофазные схемы выпрямления в соответствии с кратностью напряжений. При этом нагрузку источника с минимальным напряжением и бти- пульсным выпрямителем можно свести до минимума, используя соответствующую корректировку алгоритма управления с модуляцией задания третьей гармоникой.

#### Литература.

1. Gui-Jia Su, Donald J. Adams. Multilevel DC Link Inverters. IEEE IAS 2002, p.4.
2. Шавёлкин А.А. Минимизация силовых цепей многоуровневых преобразователей частоты для электроприводов среднего напряжения/ Техн. электродинамика. Темат. выпуск. “Силовая электроника та енергоефективність”, Частина 3.- К.2005. С.38-44.
3. J. Song-Manguelle, A.Rufer. Asymmetrical multilevel inverter for large induction machine drives. EDPE, 3-5 October 2001, pp.101-107.