

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ГИБРИДНЫЕ МНОГОУРОВНЕВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ НА БАЗЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время для электропривода переменного тока большой мощности (0.3-10) МВт среднего напряжения (до 10 кВ) находят применение многоуровневые преобразователи частоты (МПЧ). Качество выходного напряжения и входного тока МПЧ близкое к международным стандартам. Их основной недостаток - сложность силовой схемы и, как следствие, высокие стоимость и массогабаритные показатели.

Поэтому актуальной проблемой является минимизация силовых цепей МПЧ. Наибольший эффект, в плане уменьшения количества ключей инверторного блока каскадных МПЧ на уровень выходного напряжения, обеспечивается с использованием несимметрии напряжений звена постоянного тока [1]. Преимущество многоуровневых автономных инверторов (МАИН) – общий источник [1]. Перспективным решением является использование гибридных схем на базе МАИН [2,3] с каскадным включением в выходных фазах однофазных инверторов (ОИ). Причем ОИ может использоваться в процессе формирования напряжения МПЧ как реактивный элемент без источника [2,3]. Это позволяет минимизировать силовые цепи, как инверторного блока МПЧ, так и его звена постоянного тока при соответствующем снижении потерь в схеме. Реализация несимметричных гибридных МПЧ (ГМПЧ) имеет свои особенности, основные принципы ее рассмотрены в [2]. Однако, использование трехуровневого МАИН при 4 уровнях напряжения фазы ГМПЧ ограничивает качественные показатели, недостаточен и достигнутый диапазон регулирования напряжения.

Цель работы - исследование возможностей расширения диапазона регулирования выходного напряжения ГМПЧ и увеличения количества его уровней. При этом необходимо решить следующие задачи:

- исследовать возможность снижения минимального значения выходного напряжения при стабилизации напряжений в звене постоянного тока ГМПЧ;
- исследовать возможность и обосновать основные принципы использования пятиуровневого МАИН для увеличения количества уровней выходного напряжения ГМПЧ.

Схема силовых цепей фазы инверторного блока ГМПЧ на базе трехуровневого МАИН с дополнительным ОИ приведена на рис.1. Напряжения в звене постоянного тока МАИН и ОИ относятся как 3:1, что дает возможность получить на выходе 4 уровня напряжения ($u_{a0} = \{0; \pm U; \pm(3-1)U; \pm 3U; \pm(3+1)U\}$). Схема предполагает предварительный заряд конденсатора C_3 на входе ОИ и стабилизацию напряжения на нем в процессе работы. Заряд конденсаторов ОИ осуществляется через цепь нагрузки, стабилизация напряжения обеспечивается использованием замкнутой системы регулирования [2]. Диапазон регулирования в относительных единицах (1.5 – 3.54)U.

Принцип формирования выходного напряжения иллюстрирует рис.2. Однофазный инвертор обрабатывает методом однополярной ШИМ [1] напряжение u_1 , которое при $u_{3\Delta D} < 1$ принимает значение $u_1 = u_{3\Delta D}$, при $2 < u_{3\Delta D} < 3$ $u_1 = 3 - u_{3\Delta D}$, при $3 < u_{3\Delta D}$ $u_1 = u_{3\Delta D} - 3$. Напряжение ОИ при этом принимает значения +U, 0, -U. При $1 < u_{3\Delta D} < 2$ имеет место работа МАИН и ОИ методом ШИМ, причем для ОИ используется двухполярная ШИМ. Так, когда МАИН формирует напряжение +3U, для ОИ напряжение -U, когда на выходе МАИН 0 - для ОИ напряжение +U. При этом заданное напряжение сравнивается по уровню с модулирующим напряжением треугольной формы u_{TP1} и u_{TP2} .

Использование ОИ без источника питания постоянного тока предполагает отсутствие передачи активной мощности и, соответственно, первая гармоника напряжения ОИ $U_{1(0)} = 0$. Для обеспечения этого используется предварительная модуляция сигнала задания третьей к частоте основной гармоникой [2]:

$$u_{3\Delta D} = A \sin \theta + A_3 \sin 3\theta, \quad (1)$$

где: A, A_3 – амплитуда основной и третьей гармоник, $\theta = \omega t$, ω - угловая частота выходного напряжения ГМПЧ.

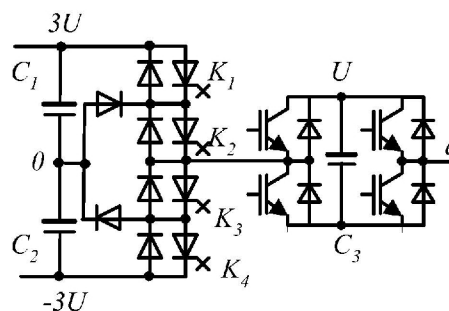


Рис.1 Фаза гибридного МПЧ на базе трехуровневого МАИН

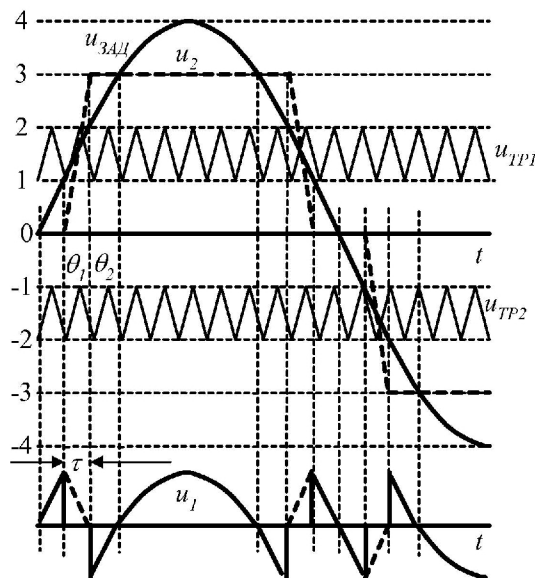


Рис.2 Формирование напряжения ГМПЧ

При $U_{1(1)}=0$ первая гармоника выходного напряжения фазы МАИН u_3 равна A . На интервале (θ_1, θ_2) при переходе к непрерывной функции (среднее на периоде модуляции значение) $u_3 = 3(A \sin \theta + A_3 \sin 3\theta - 1)$, при $\theta > \theta_2$ $u_3=3$. Тогда:

$$U_{3(1)} = \frac{6}{\pi} \left[\frac{A}{2}(\theta_2 - \theta_1) - \frac{A}{4}(\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) + \frac{A_3}{8}(2 \sin 2\theta_2 - 2 \sin 2\theta_1 - \sin 4\theta_2 + \sin 4\theta_1) + \cos \theta_2 - \cos \theta_1 + \cos \theta_2 \right] = A. \quad (2)$$

Углы θ_1, θ_2 (см. рис.2) находятся из условий: $1 = A \sin \theta_1 + A_3 \sin 3\theta_1$, $2 = A \sin \theta_2 + A_3 \sin 3\theta_2$.

Анализ возможных решений этих уравнений показывает, что если снять ограничение по амплитуде A_3 , т.е. допустить, что полярности основной гармоники и $u_{3\text{АД}}$ могут отличаться и $|u_1| \leq U$, то минимальное значение $A=0.5U$. Осциллограммы напряжения фазы МПЧ u_ϕ , напряжения $u_{\phi\text{П}}$ и тока i_Π на фазе нагрузки при $A=0.5$, $A_3=1.1$, выходной частоте $f=10$ Гц и частоте модуляции $f_M=1200$ Гц приведены на рис.3.

Нетрудно заметить искажения формы $u_{\phi\text{П}}$ в зоне значений близких к $T/6$ (на рис.3 выделено пунктиром). При этом амплитуда импульсов напряжения составляет U и $4U/3$. Обусловлено это изменением полярности $u_{3\text{АД}}$ по отношению к основной гармонике задания при переходе ее через 0, когда появляются соответствующие комбинации напряжений в фазах ГМПЧ. При этом заметного ухудшения гармонического состава $u_{\phi\text{П}}$ не выявлено. На указанных интервалах имеет место только увеличение амплитуды пульсаций тока (рис.3).

Одновременное переключение ключей МАИН и ОИ обуславливает возникновение на интервале переключения импульсных всплесков напряжения u_ϕ , которые не влияют на работу и легко фильтруются на нагрузке ($u_{\phi\text{П}}$) даже за счет сопротивлений выходного кабеля при достаточно большой его длине (порядка 80 – 100 м).

Увеличение количества уровней u_ϕ может быть достигнуто введением в фазу ГМПЧ дополнительного ОИ с изолированным источником или увеличением количества уровней МАИН. Введение дополнительного ОИ с использованием соотношения напряжений, например, 6:3:1 позволяет получить в полувольте напряжения ГМПЧ 10 уровней, но существенно усложняет структуру звена постоянного тока.

На рис.4 приведен вариант схемы фазы ГМПЧ на базе пятиуровневого МАИН при напряжении уровня $3U$, что эквивалентно соотношению 3:3:1 (напряжение фазы МАИН равно 0 при открытых K_3, K_4, K_5, K_6 ; $+3U$ при открытых K_2, K_3, K_4, K_5 ; $-3U$ при открытых K_4, K_5, K_6, K_7 ; $+6U$ при открытых K_1, K_2, K_3, K_4 ; $-6U$ при открытых K_5, K_6, K_7, K_8).

Вместе с тем, использование на входе МАИН емкостного делителя в чистом виде невозможно. Так, при напряжении МАИН $\pm 3U$ относительно среднего вывода 0, ток потребляемый от источника течет через C_1, C_4 , что приводит к их заряду (напряжения C_2, C_3 , соответственно, снижаются). Достичь балансировки (стабилизации) напряжений конденсаторов во всем диапазоне регулирования практически невозможно. Поэтому на рис.4 приведен вариант с использованием для C_1, C_4 отдельных источников постоянного тока (B1, B4). Выпрямители B1, B4 и B2, B3 попарно образуют 12ти-фазную схему выпрямления, чем обеспечивается эффективное подавление высших гармоник входного тока ГМПЧ при $A < 3.5U$, когда нагружены только B2 и B3 и при $A > 3.5U$, когда нагружены все источники. При $A > 3.5U$ для снижения потерь целесообразно перейти к квантованию по уровню [1] без ШИМ.

Литература

1. Перетворювальна техніка. Навчальний посібник / О.О.Шавьолькін, О.М.Наливайко. – Краматорськ, ДДМА, 2008.- 326с.
2. Шавелькин А.А., Уланов Р.В. Несимметричный гибридный многоуровневый преобразователь частоты для электропривода среднего напряжения // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. - Кременчук: КДПУ, 2008. - Вип.4/2008(51) Частина1, с.32-36.
3. Martin Veenstra, Alfred Rufer, Control of a Hybrid Asymmetric Multilevel Inverter for Competitive Medium-Voltage Industrial Drives. IEEE transactions on industry applications, vol. 41, NO. 2, March/April 2005. p.655- 664.

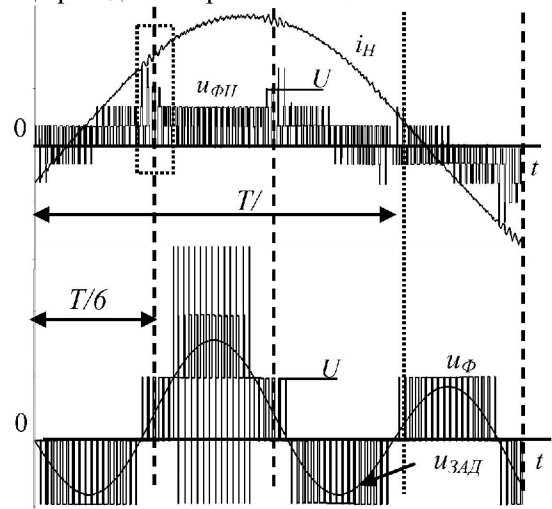


Рис.3 Напряжения и ток фазы МПЧ

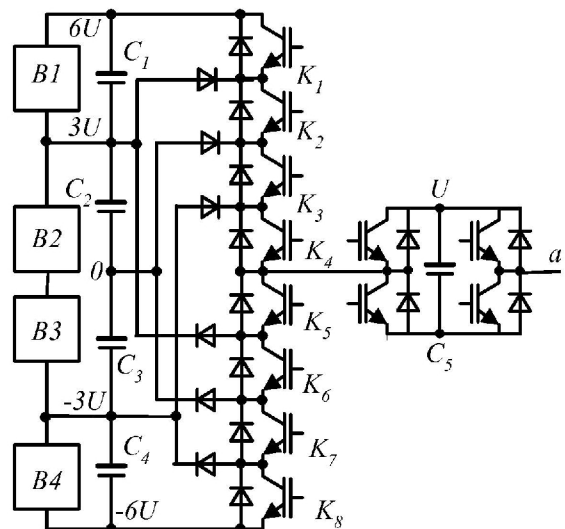


Рис.4 Фаза гибридного МПЧ на базе пятиуровневого МАИН