

А.А. ШАВЕЛКИН, д-р тех. наук, проф., ДонНТУ, Донецк

Д.Н. МИРОШНИК, асс., ДонНТУ, Донецк

В.В. ПИСАНИЮК, студент ДонНТУ, Донецк

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА ТОКА В РЕЖИМЕ ИСТОЧНИКА СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Principles of realization of the independent inverter of a current in a mode of a source of a sine wave voltage are presented. Formation of a output voltage in phases is considered at use of relay controllers. The algorithm of control is offered by switches of the inverter of a current, results of modeling on is active-inductive loading are presented.

Представлены принципы реализации автономного инвертора тока в режиме источника синусоидального напряжения. Рассмотрено формирование выходного напряжения на выходе инвертора тока при использовании релейных регуляторов напряжения в фазах. Предложен алгоритм управления ключами инвертора тока, представлены результаты моделирования на активно-индуктивную нагрузку.

Подано принципили реалізації автономного інвертору струму в режимі джерела синусоїдальної напруги. Розглянуто формування вихідної напруги у фазах при використанні релейних регуляторів. Запропонований алгоритм керування ключами інвертору струму, подані результати моделювання на активно-індуктивне навантаження.

Введение. Регулируемый электропривод (ЭП) является неотъемлемым элементом системы энергосбережения. В значительной степени это касается ЭП переменного тока большой мощности, где используются высоковольтные асинхронные двигатели. При этом на первый план выходят вопросы качества преобразования энергии и к преобразователю частоты (ПЧ) предъявляются повышенные требования. Для высоковольтного ЭП переменного тока "классическим" решением стало использование каскадных многоуровневых преобразователей частоты (МПЧ) типа "Perfect Harmony" [1, 2]. Более простое и перспективное решение возможно на базе автономного инвертора тока (АИТ) с выходным емкостным фильтром при использовании ШИМ [1-4]. Тем более что форма напряжения близкая к синусоидальной обеспечивается во всем диапазоне регулирования выходной частоты $f_{\text{вых}}$. Известны решения высоковольтных ПЧ (ВПЧ) на базе АИТ [2], которые доста-

точно успешно конкурируют с МПЧ, например, Power Flex 7000 (фирма "Rockwell Automation").

Известные решения применительно АИТ [1-4] ориентированы на формирование тока. Вместе с тем, вопрос использования АИТ в качестве источника синусоидального напряжения на данный момент времени изучен недостаточно. Проблема упрощения силовых цепей ВПЧ при соответствии показателей качества выходного напряжения и входного тока стандартам [5] на данное время остается актуальной. Ее решение будет способствовать расширению областей применения ВПЧ. Вместе с тем, перспективным является использование ПЧ на базе АИТ и в низковольтном электроприводе, где они вполне смогут конкурировать с "классическим" решением на базе двухуровневого инвертора с активным выпрямителем напряжения.

Цель работы – разработать принципы использования АИТ в режиме источника синусоидального напряжения.

Изложение основного материала. Схема трехфазного АИТ на запираемых по цепи управления ключах $K1-K6$ приведена на рис. 1. Независимо от используемого алгоритма АИТ формирует на выходе ток $i_{и}$ импульсной формы, который является суммой токов конденсатора i_c и нагрузки i_H ($i_{и}=i_c+i_H$). Выходное напряжение АИТ при этом имеет форму близкую к синусоидальной. При пульсирующем выходном токе АИТ емкостной фильтр существенно меняет его режим работы,

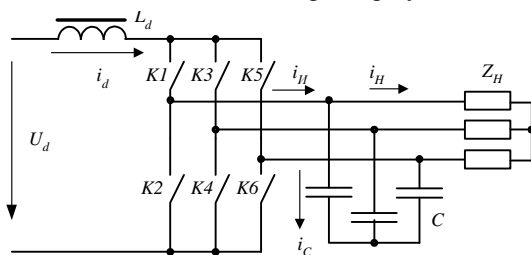


Рис.1. Структура силовых цепей АИТ.

что усложняет задачу получения синусоидального тока нагрузки. Предложен принцип управления АИТ в режиме источника синусоидального выходного напряжения. При этом в схеме используется три релейных регулятора

напряжения для каждой из выходных фаз АИТ, для которых задается отклонение δ выходного фазного напряжения u_{ϕ} относительно заданного значения $u_{3АД}$. Так для положительной полуволны u_{ϕ} , если $u_{\phi} < u_{3АД} + \delta$ формируется сигнал $P=1$ на включение ключа, обеспечивающего протекание в выходной фазе АИТ тока $i_{и}$ положительной полярности, в противном случае $P=0$. Для отрицательной полуволны u_{ϕ} аналогичным образом формируется сигнал N на включение ключа,

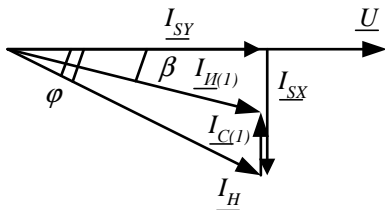


Рис. 2. Векторная диаграмма для выходной фазы АИТ.

обеспечивающего протекание в выходной фазе АИТ тока i_H отрицательной полярности. Формирование импульсов управления ключами АИТ осуществляется в соответствии с первой гармоникой тока i_H (рис. 2), которая отстает на угол β от напряжения u_ϕ . При этом: а) нельзя разрывать ток источника i_d – всегда должны проводить ключи в

двух или трех плечах моста; б) следует исключить к.з. нагрузки, когда замкнуты 3 ключа АИТ, подключающие выходы к одному зажиму источника; в) при использовании бестоковых пауз для регулирования выходного тока следует замыкать ключи одного плеча для протекания тока источника.

Период u_ϕ (рис. 3) разбит на шесть интервалов (τ_1 - τ_6). На интервале τ_1 токи в выходных фазах a и c положительны и формируются отпираанием ключей $K1$ и $K5$ соответствующими релейными регуляторами (P_a и P_c). Ток в фазе b при этом отрицательный и протекает через постоянно открытый ключ $K4$. При запираии $K1$ и $K5$ отпирается ключ $K3$ в фазе b , обеспечивая протекание I_d через ключи $K3$ и $K4$. Напряжения управления ключами:

$$\begin{aligned}
 K1 &= (Pa \wedge \tau_1) \vee \tau_2 \vee (Pa \wedge \tau_3) \vee \tau_5 \wedge (\overline{Pb \vee Pc}); \\
 K2 &= (Na \wedge \tau_4) \vee \tau_5 \vee (Na \wedge \tau_6) \vee \tau_2 \wedge (\overline{Nb \vee Nc}); \\
 K3 &= (Pb \wedge \tau_3) \vee \tau_4 \vee (Pb \wedge \tau_5) \vee \tau_1 \wedge (\overline{Pa \vee Pc}); \\
 K4 &= (Nb \wedge \tau_6) \vee \tau_1 \vee (Nb \wedge \tau_2) \vee \tau_4 \wedge (\overline{Na \vee Nc}); \\
 K5 &= (Pc \wedge \tau_5) \vee \tau_6 \vee (Pc \wedge \tau_1) \vee \tau_3 \wedge (\overline{Pa \vee Pb}); \\
 K6 &= (Nc \wedge \tau_2) \vee \tau_3 \vee (Nc \wedge \tau_4) \vee \tau_6 \wedge (\overline{Na \vee Nb}).
 \end{aligned}$$

Данный алгоритм предполагает минимальное количество переключений ключей, поскольку в течение $1/6$ периода выходной частоты переключения отсутствуют и ключ открыт постоянно.

Значение тока I_d на входе АИТ задается исходя из следующих соображений. Минимальное значение, при котором достигается отработка заданного значения выходного напряжения АИТ определяется первой гармоникой выходного тока $I_{d\min} = I_{um(1)}$. Это соответствует коэффициенту модуляции по амплитуде $\mu=1$ и минимальному количеству переключений ключей АИТ.

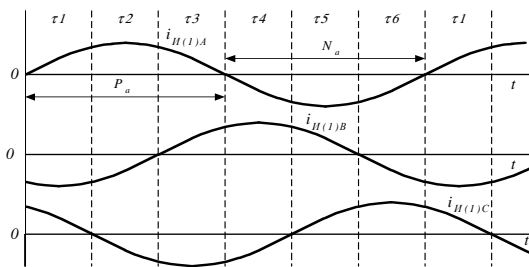


Рис. 3. Принцип формирования выходного напряжения АИТ.

$$P_d = U_d \cdot I_d = 3U_{\Phi} \cdot I_{И(1)} \cos \beta.$$

Значение $I_{И(1)} = \frac{I_{Иm(1)}}{\sqrt{2}} = \frac{I_d}{\sqrt{2}}.$

Отсюда $U_d = \frac{3}{\sqrt{2}} U_{\Phi} \cos \beta = 2.12 U_{\Phi} \cos \beta.$

Если на входе АИТ в качестве источника тока используется трехфазный мостовой выпрямитель, максимальное значение $U_d = 2.34 U_{\Phi c}$ ($U_{\Phi c}$ – фазное напряжение сети переменного тока). Таким образом, реализация преобразователя частоты на базе АИТ возможна при прямом подключении к сети без трансформатора и имеется возможность увеличения напряжения АИТ, например, при увеличении частоты выходного напряжения свыше 50 Гц.

При увеличении значения $I_d > I_{d\text{мин}}$ коэффициент модуляции μ уменьшается при неизменном значении $I_{Иm(1)}$. Таким образом, система адаптивна по заданию и не требует точного расчета значения тока I_d , как это осуществляется в известных системах с работой АИТ в режиме источника тока [3, 4]. Это же можно предположить и по отношению к значению угла β – система сохраняет работоспособность, разве что при некотором ухудшении формы напряжения. Вместе с тем, при снижении μ частота переключения ключей растет, что приводит к увеличению потерь энергии в них.

Частота переключения ключей АИТ (частота модуляции f_M) также определяется заданным значением отклонения δ и растет при его уменьшении. И здесь нужен разумный компромисс между достигаемым качеством выходного напряжения (достигается при уменьшении

При этом напряжении на входе АИТ U_d максимальное, его значение можно определить исходя из равенства активной мощности на входе и выходе АИТ (потерями в схеме АИТ пренебрегаем)

д), выбором значения I_d и частотой переключения ключей.

Скорость изменения выходного напряжения АИТ определяется емкостью конденсатора выходного фильтра. Естественным является желание ее уменьшить, но это опять, же приводит к увеличению частоты переключения ключей АИТ.

Применительно высоковольтных ПЧ при использовании ключей на высокие напряжения частота должна быть минимальной, для низковольтных ключей с малыми потерями переключения ограничения по частоте не являются определяющими.

Результаты моделирования при использовании программного пакета MATLAB подтверждают корректность принятых подходов и работоспособность предложенных решений. Рассматривалась отработка АИТ выходного напряжения при различных значениях параметров схемы и настройке релейного регулятора напряжения. В табл. 1 приведены показатели работы схемы АИТ при RL – нагрузке с $Z_H=10$ Ом, $\cos\varphi=0.8$, емкости фильтра $C=90$ мкФ и различных значениях тока I_d при частоте выходного напряжения $f_{\text{ВЫХ}}=50$ Гц.

Таблица 1 – Результаты моделирования

I_d , А	f_M , Гц	THD_U , %	THD_i , %	U_Φ/U_{3AD} , %
100	450	3.37	1.07	95
106	650	3.17	0.57	98
110	1100	1.92	0.37	99
140	1650	1.84	0.25	99.36

При этом значение угла $\beta=21.5^\circ$ (задавалось значение $\beta=\pi/8=22.5^\circ$). Заданное значение $U_m=1250$ В, $\delta=40$ В. Значение $I_{d\text{мин}}=106$ А. Коэффициент гармоник (THD) определялся для гармоник с порядком до 40. Для сравнения в [4] достигается коэффициент гармоник тока $THD_i=1.56\%$. Осциллограммы выходного напряжения АИТ (u_Φ), напряжения задания для ключа $K1$, выходного тока фазы инвертора i_H и тока фазы нагрузки i_H при $f_{\text{ВЫХ}}=50$ Гц приведены на рис. 5.

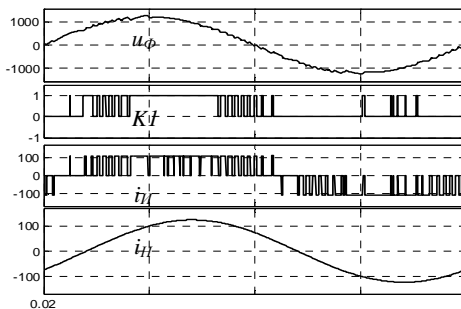


Рис. 5. Осциллограммы выходного напряжения, напряжения задания ключа Kf и токов АИТ при $f_{ВЫЛ}=50$ Гц.

Выводы. Предложенный принцип управления АИТ с формированием выходного напряжения обеспечивает работу АИТ в режиме источника синусоидального напряжения, гармонический состав которого соответствует стандарту [5] во всем диапазоне регулирования выходного напряжения и частоты. Предметом дальнейших исследований является разработка принципов реализации структур систем автоматического управления АИТ в режиме источника напряжения применительно асинхронного электропривода.

Список литературы: 1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты // Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с. 2. Лазарев Г. Преобразователи для частотно-регулируемого электропривода / Г. Лазарев // Силовая электроника. – 2008. – №8(132). – С. 14-23. 3. Волков А.В. Асинхронный электропривод на основе автономного инвертора тока с широтно-импульсной модуляцией / А.В. Волков, А.И. Косенко // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2008. – Тематичний. вип. – Ч. 1. – С. 81-86. 4. Волков А.В. Исследование энергетических показателей асинхронного электропривода на основе автономного инвертора тока / А.В. Волков, А.И. Косенко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К: Техніка. – 2011. – №(03) 79. – С. 40-41. 5. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

*Надійшла до редколегії 04.04.2012.
Рецензент д.т.н., проф. Луціков В.С.*