

УДК 621.314.26

А. А. ШАВЁЛКИН (д-р техн. наук, доц.)
Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»
sha@dgtu.donetsk.ua

АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР ТОКА В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Представлены принципы реализации автономного инвертора тока в режиме источника синусоидального напряжения. Предложено при формировании выходного напряжения инвертора использовать трехуровневые релейные регуляторы, разработан алгоритм управления ключами инвертора. Представлены результаты моделирования инвертора с активным выпрямителем тока на входе при активно-индуктивной нагрузке.

Ключевые слова: автономный инвертор тока, высоковольтный преобразователь частоты, источник напряжения, запираемые по цепи управления ключи, трехуровневый релейный регулятор, коэффициент гармоник.

В настоящее время в регулируемом электроприводе (ЭП) переменного тока «классическим» решением стало использование преобразователей частоты (ПЧ) на базе автономного инвертора напряжения (АИН). Это касается как низковольтного ЭП, где используется двухуровневый трехфазный мостовой АИН, так и высоковольтного ЭП, где используются многоуровневые АИН (МАИН) или многоуровневые ПЧ (МПЧ) с каскадным соединением АИН. Следует отметить, что в плане управляемости здесь достигнут очень высокий уровень. Однако в последнее время на первый план выходят вопросы качества преобразования энергии и к ПЧ предъявляются повышенные требования. Если исходить из современных стандартов [1] коэффициент синусоидальности кривой напряжения (коэффициент гармоник – THD) для сети 0.4 кВ составляет 8% (предельный 12%), для сети 6 кВ – 5% (предельный 8%). Перспективным в плане получения выходного синусоидального напряжения и тока представляется решение ПЧ на базе автономного инвертора тока (АИТ) с выходным емкостным фильтром при использовании ШИМ [2,3]. Тем более, что форма напряжения, близкая к синусоидальной обеспечивается во всем диапазоне регулирования выходной частоты. Известны решения высоковольтных ПЧ (ВПЧ) на базе трехфазного мостового АИТ [2], которые достаточно успешно конкурируют с МПЧ, например, Power Flex 7000 (фирма «Rockwell Automation»). При этом схема силовых цепей существенно проще, чем у МАИН и МПЧ.

Известные решения применительно АИТ [2 - 4] ориентированы на формирование тока с использованием методов ШИМ. При этом формируется выходной ток АИТ, а ток двигателя хотя и синусоидальный, но его амплитуда и фаза неизвестны. Данное обстоятельство усложняет использование АИТ в системе векторного управления асинхронным двигателем (АД). В [3] для формирования тока нагрузки предложено использование релейного регулятора тока. Однако гармонический состав тока при использовании регулятора с «токовой трубкой» ухудшается, что предполагает завышение частоты переключения ключей АИТ. Современные подходы к построению систем векторного управления АД ориентированы на использование ПЧ в качестве источника напряжения. В работе [5] на уровне идеи предложено использование АИТ в режиме источника напряжения с релейным регулятором напряжения на конденсаторах выходного фильтра АИТ, однако не учтены особенности работы схемы АИТ в сравнении с АИН. В [4] данный принцип получил развитие, но вводится угол сдвига фаз между током инвертора и выходным напряжением, что усложняет реализацию.

Таким образом, 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 [1] 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 АИН.

Цель работы. Совершенствование показателей АИТ в режиме источника синусоидального напряжения.

При этом следует решить следующие задачи:

- исключение использования значения фазы первой гармоники тока АИТ при релейном принципе формирования выходного напряжения, разработать соответствующий алгоритм управления;
- обеспечения устойчивой работы АИТ при питании от активного выпрямителя тока (АВТ);
- разработать математические модели и выполнить исследования предложенных решений.

Изложение основного материала. Схема трехфазного мостового АИТ на запираемых по цепи управления ключах с односторонней проводимостью (рис.1) содержит выходной емкостной фильтр высших гармоник. Независимо от используемого алгоритма АИТ формирует на выходе ток i_M импульсной формы, который является суммой токов конденсатора i_C и нагрузки i_H ($i_M = i_C + i_H$). В работе [4] рассмотрен принцип формирования напряжения с использованием трех релейных регуляторов напряжения (РРН), обеспечивающий высокое качество выходного напряжения АИТ при минимальном количестве переключений ключей схемы.

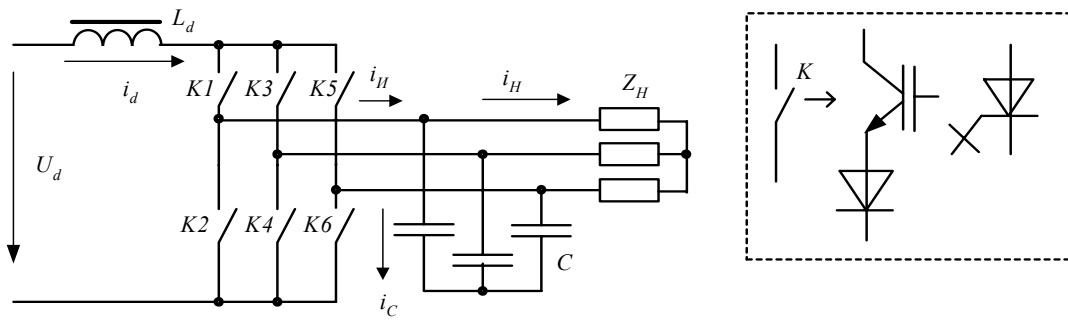


Рисунок 1 – Структура силовых цепей АИТ

При этом РРН формируют сигналы управления ключами в плече АИТ P и N , обеспечивающих протекание в выходной фазе АИТ импульсов тока положительной и отрицательной полярности. Распределение импульсов осуществляется в соответствии с тактом работы схемы. Такты (6 за период) определяются 1-й гармоникой тока i_H , которая отстает от напряжения на угол β . Необходимость определения β - недостаток данного решения.

Исключить привязку распределения импульсов управления к i_H позволяет предложенный принцип управления. Суть его состоит в следующем. Отпирание ключа в плече АИТ происходит: при наличии сигнала соответствующей полярности с выхода РРН данной фазы; при наличии сигналов с выходов РРН других фаз на отпирание в них ключей, обеспечивающих протекание тока противоположной полярности; при отсутствии сигналов управления с выходов РРН (замыкание цепи для протекания тока в звене постоянного тока). В любой момент времени ток протекает в двух выходных фазах, т.е. его формирование осуществляется одним из двух РРН этих фаз. В работе предложено выбор работающего регулятора (из двух регуляторов) осуществлять в соответствии с наибольшим значением отклонения напряжения фазы нагрузки $u_{\Phi H}$ от заданного значения ($u_{\text{Зад}}$) $\Delta = |u_{\text{Зад}} - u_{\Phi H}|$. При этом вводятся переменные Ka, Kb, Kc принимающие единичное значение, если для данной фазы $\Delta \geq (1.2 - 1.5)\delta$ (δ - заданное для релейного регулятора отклонение напряжения), в функции которых формируются сигналы разрешения a, b, c для регуляторов фаз АИТ.

Напряжения управления ключами фазы АИТ формируются в соответствии с уравнениями (для фазы А):

$$K1 = a(Pa \vee Nb \wedge \bar{Pc} \vee Nc \wedge \bar{Pb} \vee (Pb \vee Pc \vee Nb \vee Nc)),$$

$$K2 = a(Na \vee Pb \wedge \bar{Nc} \vee Pc \wedge \bar{Nb} \vee (Pb \vee Pc \vee Nb \vee Nc)).$$

При использовании алгоритма [4] с заданной фазой тока, формируемого АИТ, количество переключений ключей минимально, поскольку известно какой ключ может включаться на данном интервале времени. Так при формировании положительной полуволны тока фазы включается верхний ключ моста, а нижний только для замыкания тока дросселя. Кроме того, на одном из тактов (1/6 периода) ключ постоянно замкнут.

В данном случае количество переключений увеличивается, поскольку для увеличения напряжения включается один ключ плеча, для уменьшения - другой (т.е. $P=1$, затем $N=1$). Напряжение на отключенной фазе нагрузки за счет конденсатора выходного фильтра не может измениться мгновенно и, в ряде случаев, его изменения «вписываются» в коридор значений обрабатываемых РРН данной фазы. Предложено использовать РРН с тремя уровнями выходного напряжения $P=1$ ($N=0$), $P=N=0$ и $N=1$ ($P=0$). Так при увеличении напряжения ($P=1$), при достижении заданного значения отклонения регулятор переключается в нулевое состояние (ключ отключается). Если через определенное время снижение напряжения не произошло, регулятор переключается в состояние $N=1$ (включается другой ключ плеча моста). Это позволит избежать лишних переключений ключей.

Также для ограничения частоты переключения ключей $f_H < f_{ГР}$ на интервалах, где изменение напряжения фазы АИТ происходит в зоне значений близких к заданному уровню Δ минимальная длительность переменных Ka, Kb, Kc ограничивается и не может быть меньше $1/f_{ГР}$ ($f_{ГР}$ - предельная частота переключения ключей).

В [4] показано, что АИТ с РРН не критичен к значению тока I_d . Его значение может быть любым при условии $I_d > I_{\text{дмин}}$ ($I_{\text{дмин}}$ - минимальное значение тока, при котором возможна обработка заданного значения выходного напряжения). При неизменной нагрузке и увеличении значения I_d увеличивается частота переключений ключей в плечах АИТ и длительность «нулевых» состояний для поддержания постоянным амплитуды 1-й гармоники i_H . В «нулевых» состояниях, когда нагрузка отключена от источника, ток дросселя I_d замыкается через ключи одного из плеч АИТ. В случае использования реального источника тока (с конечным значением выходного сопротивления и напряжения на входе) ток I_d в «нулевых» состояниях возрастает, что приводит к увеличению длительности «нулевых» состояний. Таким образом, система является неустойчивой при неконтролируемом увеличении тока I_d . Задача стабилизации тока I_d не может быть решена использованием внешнего регулятора для источника питания. Стабилизация возможна, если при увеличении тока в «нулевом» состоянии увеличивать продолжительность «ненулевых» состояний, компенсирующих это увеличение тока. Предложено использовать коррекцию по заданию для АИТ в функции мгновенного значения тока i_d .

Важным достоинством использования релейного принципа формирования напряжения АИТ является то, что качество обработки напряжения практически не зависит от пульсаций тока i_d . Это позволяет уменьшить индуктивность сглаживающего дросселя L_d . Однако в схеме управления АВТ желательно использовать астатическую по среднему значению i_d систему регулирования (САР).

Значение емкости С выходного фильтра АИТ. Чем больше С, тем меньше скорость изменения напряжения и ниже частота переключения ключей АИТ. Однако предельное значение С определяется исходя из ограниченных возможностей АИТ по выходному напряжению. В реальной схеме ПЧ с АВТ и АИТ при непосредственном питании от сети (без трансформатора) необходимо обеспечить запас по выходному напряжению с учетом падения напряжения в силовых цепях и возможного снижения напряжения сети на 5-10%. При этом реактивная мощность фильтра Q_C в номинальном режиме не превышает 60-65% от реактивной мощности двигателя.

Моделирование предложенных решений выполнено при использовании программного пакета MATLAB. Структура разработанной модели АИТ с АВТ на входе включает в себя: источник переменного напряжения ($U_{\text{фн}}=311$ В), фильтр на входе АВТ, систему управления АВТ и АИТ, САР АВТ с ПИ- регулятором тока, блок коррекции задания АИТ, активно-индуктивную нагрузку $Z_H=10$ Ом, $\cos\varphi=0.8$. Емкость конденсаторов выходного фильтра $C=115$ мкФ ($Q_C=0.6Q_L$), $L_d=20$ мГн. Отклонение (delta) для РРН $\delta=5\%$ от заданного значения амплитуды напряжения фазы нагрузки. Осциллограммы выходного напряжения АИТ u_a , тока i_d , выходного тока фазы АИТ i_H , тока фазы нагрузки i_a , а также напряжение для ключа К1 приведены на рис.2 при

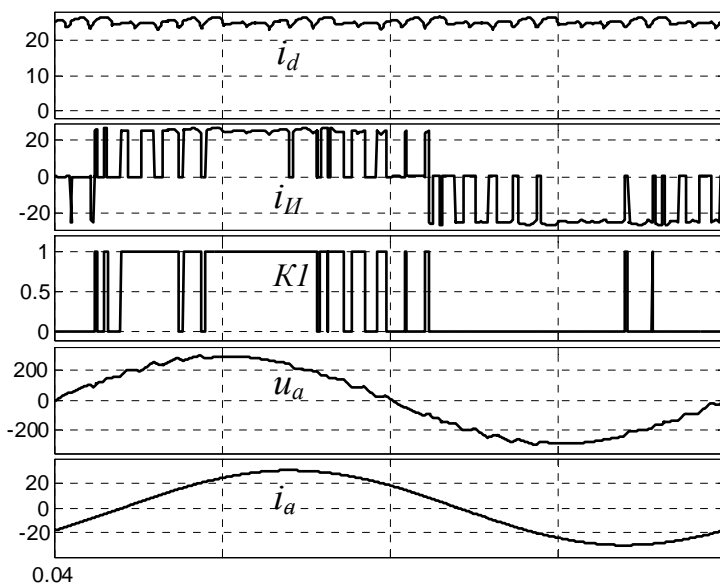


Рисунок 2 - Осциллограммы выходного напряжения и токов АИТ

$f_2=50$ Гц. При задании значения $I_d=(1-1.25)I_{d\text{мин}}$ коэффициент гармоник (THD) напряжения АИТ (при учете гармоник с порядком до 40) $THD=3.06-3.57\%$, частота переключений ключа АИТ $f_H=650-1300$ Гц. При том же токе нагрузки и $f_2=25$ Гц (снижении вдвое напряжения ($U/f=const$) и $Z_H=5$ Ом, $\cos\varphi=0.8$) для $\delta=5\%$ $THD=3.39-4.18\%$. Значение частоты переключения увеличилось $f_H=1300-1600$ Гц. Значение f_H можно уменьшить, если увеличить δ вдвое (до 10%) - в этом случае $f_H=650-1200$ Гц, но несколько увеличивается $THD=7.01-6.5\%$.

Выводы. Подтверждено возможность применения АИТ в режиме источника синусоидального напряжения при использовании релейного принципа регулирования выходного напряжения и одной заданной величины – фазного напряжения нагрузки. Предметом дальнейших исследований является разработка структуры САР применительно асинхронного ЭП с векторным управлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97.
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 // Техн. электродинамика. - 2008. - Тематичний. вип., Ч.1. - С. 81-86.
4. Шавёлкин А.А. Преобразователь частоты на базе автономного инвертора тока / А.А. Шавёлкин // Техн. электродинамика. - 2012. - Тематичний вип., Ч. 4. - С. 75-80.
5. Мещеряков В.Н. Система управления преобразователем частоты с автономным инвертором тока и релейным формированием напряжения на конденсаторах выходного фильтра / В.Н. Мещеряков, Д.В. Пешков // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2009. - №1(15). - С. 7-10.

REFERENCES

1. GOST 13109-97. Norms of quality of electric energy in systems of electric supply of a general purpose.
2. Lazarev G. Converters for the frequency-adjustable electric drive. Silovaja Elektronika. 2008; 8(132): 14-23.
3. Volkov A.V., Kosenko A.I. Asynchronous electric drive on the basis of the independent inverter of a current with pulse-width modulation. Technicheskaja elektrodinamika. Kiev: IED NANU. 2008; Part 1: 81-86.
4. Shavelkin A. A. Converter of frequency on the basis of the independent inverter of a current. Technicheskaja elektrodinamika. Kiev: IED NANU. 2012; Part 4: 75-80.

5. Meshcherjakov V.N., Peshkov D.V. Control system the converter of frequency with the independent inverter of a current and relay formation of a voltage on condensers of the output filter. Vesti vysshich uchebnych zavedeniy Chernozemja. 2009; 1(15): 7-10.

Надійшла до редакції 20.03.2013

Рецензент: Є.Б. Ковальов

О. О. ШАВЬОЛКІН

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

Автономний інвертор струму як джерело синусоїдальної напруги. Подані принципи реалізації автономного інвертору струму в режимі джерела синусоїдальної напруги. Запропоновано при формуванні вихідної напруги інвертору використовувати трирівневі релейні регулятори, розроблено алгоритм керування ключами інвертору. Подані результати моделювання інвертору з активним випрямлячем струму на вході при активно-індуктивному навантаженні.

Ключові слова: автономний інвертор струму, високовольтний перетворювач частоти, джерело напруги, ключі що замикаються за колом керування, трирівневий релейний регулятор, коефіцієнт гармонік.

A. SHAVELKIN

State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"

The Independent Inverter of a Current as a Source of a Sine Wave Voltage. Principles of realization of a mode of a source of a sine wave voltage for the three-phase bridge independent inverter of a current are presented. The scheme of the inverter of a current is executed on gate turn-off switches with unilateral conductivity and output filter on capacitors. The principle of formation of an output voltage of the inverter with use of three-level relay controllers of a voltage is offered. The choice of a working controller is carried out according to the greatest value of a deviation of a voltage of a phase of load from a preset value. It is desirable to use system of control which is astatic for average value of an input current inverter. It is shown, that in view of losses of a voltage in power circuits and a possible voltage reduction of a power link AC the reactive power of the capacitor filter for a nominal mode is no more than 60-65 % from reactive power of the load. The mathematical model of the independent inverter with the active rectifier of a current on the input, which is realizing the offered principles of control, is made. Results of modeling for active-inductive load confirm working capacity of the offered decisions. Value of total harmonic distortion of a voltage is equal (3 - 4) % for frequency of an output voltage of the inverter 50 Hz and for deviation of a voltage from a preset value of 5% is achieve at frequency of switching of switches of the inverter (600 - 1500 Hz). It is shown, that quality of a voltage practically does not depend on value of pulsations of an input current of inverter. It allows reducing inductance of a smoothing reactor in DC link of inverter. Subject of the further researches is development of structure of system of automatic control for the asynchronous electric drive with vector control.

Key words: independent inverter of a current, high-voltage converter of frequency, source of the voltage, gate turn-off switches, three-level relay controller, total harmonic distortion.