УДК 621.314

Ю.А. Шурыгин, Т.Н. Зайченко, А.В. Аристов

Время-импульсный способ управления однофазным полумостовым инвертором при формировании тока нагрузки гармонической формы

Рассмотрены способы формирования тока гармонической формы в преобразователях постоянного тока в переменный. Предлагается время-импульсный способ управления ключами полумостового инвертора при формировании тока нагрузки гармонической формы в широком диапазоне регулирования амплитуды и частоты выходного тока.

Ключевые слова: инвертор, управление, формирование формы тока, гармоническая форма.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-4-99-102

При реализации различных технологических процессов требуется обеспечение определенного закона изменения тока нагрузки. При этом регулирование должно осуществляться при высоких энергетических показателях. В ряде случаев, например в системах электропривода, форма тока должна быть гармонической, причем ток может меняться в широком диапазоне как по величине, так и по частоте. В настоящей работе рассматривается способ формирования тока гармонической формы для однофазных потребителей.

Способы получения тока гармонической формы

Синусоидальность формы выходного тока может быть получена с помощью инверторов, которые по характеристике электромагнитных процессов могут быть разделены на инверторы тока, резонансные инверторы и инверторы напряжения.

В инверторе тока, как правило, установлены дроссель в цепи постоянного тока для обеспечения близкой к синусоидальной форме выходного тока и конденсаторы в цепи переменного тока для обмена энергией между инвертором и нагрузкой. Причем конденсаторы могут быть включены последовательно, параллельно или параллельно-последовательно нагрузке [1]. Для инверторов тока характерно: запирающие вентили за счет отпирающего очередного (одноступенчатая коммутация) или вспомогательного (двухступенчатая коммутация) вентиля; наличие на стороне переменного тока конденсаторов, которые необходимы для коммутации вентилей и обмена энергией между инвертором и нагрузкой; непрерывный и неизменный входной ток, что обеспечивается дросселем в цепи постоянного тока.

Достоинством инверторов тока являются: близкая к синусоиде форма выходного напряжения, малые пульсации входного тока. К недостаткам относятся: мягкая внешняя характеристика; неспособность на холостом ходу, обусловленная затрудненным перезарядом конденсатора, возможность «опрокидывания» инвертора при перегрузках, довольно низкие массогабаритные показатели, так как преобразование осуществляется на низкой частоте выходного напряжения.

Для резонансных инверторов характерно запирающие вентили за счет спада анодного тока, имеющего колебательный характер, благодаря резонансным свойствам цепи. Наличие в инверторе специально введенных накопителей энергии – конденсаторов и дросселей, образующих колебательный LC-контур с резонансом напряжения, в который входят и вентили, обеспечивает спад к нулю их анодного тока через полпериода собственной частоты контура после их отпирающего. Также для резонансных инверторов характерно превышение собственной частоты LC-контура над рабочей частотой инвертора или в предельном случае – равенство этих частот.

Достоинствами резонансных инверторов являются: близкое к синусоидальной форме напряжение и ток в нагрузке; плавное нарастание и спад тока через вентили, что предопределяет малые коммутационные потери мощности, в связи с чем целесообразно использование этих инверторов на повышенных частотах. К недостаткам относятся: зависимость величины и формы тока и напряжения от параметров контура коммутации, включая цепь нагрузки; увеличение напряжения на вентилеях и элементах контура коммутации с возрастанием тока нагрузки; срыв инвертирования на холостом ходу [1].

На практике существует множество способов управления динамическими свойствами преобразователей. Так, схема силовой части преобразователя с инвертором тока состоит из дросселя и встречно-параллельных тиристоров [1]. В этой схеме для получения выходного напряжения, близкого к синусоидальному, и малых пульсаций потребляемого тока инвертор синхронизируется от выходного напряжения, а тиристоры – от задающего генератора. К недостаткам следует отнести плохие пусковые характеристики, приводящие в ряде случаев к «опрокидыванию» инвертора, и необходимость в специальной пусковой схеме.

При амплитудно-импульсной модуляции на выходе формируется ступенчатая форма, приближающаяся к синусоидальной форме выходного напряжения путем суммирования прямоугольных напряжений одинаковой частоты, различной частоты или скважности либо переключением вторичных обмо-

ток. Для получения ступенчатого напряжения вводится транзисторный демодулятор. Эти схемы ведут к увеличению количества ступеней, что ведет к усложнению схемы силовой части и схемы управления этого устройства. Надежность устройства, в конечном счете, снижается [1].

В этой связи актуальной является задача обеспечения требуемого оптимального коэффициента искажения синусоидальности выходного напряжения путем формирования синусоидальной формы выходного тока в широком диапазоне изменения амплитуды и частоты выходного тока. Решить поставленную задачу возможно путем обеспечения время-импульсной модуляции длительности импульсов выходного тока инвертора путем введения сигнала обратной связи пропорционально формируемому амплитудному значению синусоидального выходного тока и воздействия с помощью управляющих сигналов на силовые транзисторы инвертора.

В работе [2] приведены результаты исследования электромагнитных процессов в автономном инверторе напряжения с принудительным формированием синусоидальной формы тока. Получены выражения, позволяющие определить частоту коммутации ключей инвертора, установившееся и переходное значения тока при активно-индуктивной нагрузке. В настоящей работе представлена практическая реализация предложенного способа формирования тока для однофазного инвертора.

Однофазный полумостовой инвертор с время-импульсным управлением ключами

На рис. 1 представлена схема полумостового инвертора, выполненного на IGBT-транзисторах VT1, VT2 с обратными диодами VD1, VD2 и конденсаторами C1, C2. Выход инвертора соединен с нагрузкой Z_n через индуктивность L. Для измерения тока используются две пары трансформаторов тока T1, T2 и T3, T4. Первичные обмотки первой пары трансформаторов включены в цепи эмиттеров транзисторов, а первичные обмотки второй пары трансформаторов тока включены в цепи анодов обратных диодов.

Система управления включает следующие элементы: эталонный кварцевый генератор Г, устройство синхронизации УС, устройство формирования эталонного сигнала, сравнивающее устройство и широтно-импульсное устройство ШИУ. Сравнивающее устройство состоит из двух компараторов K1 и K2, устройство формирования эталонного сигнала состоит из двух формирователей эталонных сигналов синусоидальной формы тока Ф1 и Ф2.

Одни концы вторичных обмоток в каждой паре трансформаторов T1, T2 и T3, T4 соединены последовательно, а вторые концы указанных обмоток объединены и подключены к инверсным входам соответствующих компараторов. Прямые входы указанных компараторов соединены с выходами соответствующих формирователей эталонных сигналов синусоидальной формы.

Один из формирователей эталонных сигналов синусоидальной формы является формирователем эталонных сигналов синусоидальной формы тока $i_{\max}(t) = I_m \sin(\omega t) + 0,5\Delta I$, а второй – формирователем эталонных сигналов синусоидальной формы тока $i_{\min}(t) = I_m \sin(\omega t) - 0,5\Delta I$, где I_m – амплитуда синусоидального тока на выходе инвертора; ω – угловая частота; t – время; ΔI – отклонения воспроизведения синусоидальной формы выходного тока.

Рис. 1. Полумостовой инвертор со схемой управления

В режиме формирования синусоидальной формы выходного тока инвертор работает следующим образом.

Ток на выходе инвертора колеблется между двумя заданными синусоидами: верхней $i_{\max}(t)$ и нижней $i_{\min}(t)$, соответствующими выходному напряжению $u_m(t)$, проходя через ноль в моменты $\omega t = 0$ и $\omega t = \pi$.

На рис. 2 показана синусоидальная форма выходного напряжения за один период. Здесь $u_1(t)$, $u_3(t)$ – выходное напряжение, соответствующее эталонным сигналам выходного тока $i_{\max}(t)$, $i_{\min}(t)$, $i_3(t) = I_m \sin(\omega t)$; $u_5(t)$ – оптимальный вариант синусоидальной формы выходного напряжения, соответствующий эталонному сигналу выходного тока $i(t) = I_m \sin(\omega t)$.

На неинвертирующий вход компаратора K1 подается сигнал U_1 , пропорциональный эталонному сигналу выходного напряжения $u_1(t)$, соответствующий

ющий выходному току $i_{\max}(t)$. На инвертирующий вход К1 поступает сигнал обратной связи U_{oc1} с вторичных обмоток трансформаторов Т1, Т2. Сигнал обратной связи U_{oc1} пропорционален мгновенному значению активной составляющей тока, поступающей с датчика нарастания тока.

Рис. 2. Ток и напряжение инвертора

На неинвертирующий вход компаратора К2 подается сигнал U_2 , пропорциональный эталонному сигналу выходного напряжения $u_3(t)$, соответствующий выходному току $i_{\min}(t)$. На инвертирующий вход К2 поступает сигнал обратной связи U_{oc2} с вторичных обмоток трансформаторов Т3, Т4. Сигнал обратной связи U_{oc2} пропорционален реактивной составляющей тока нагрузки (спаду тока).

При подаче постоянного напряжения происходит заряд конденсаторов С1, С2, запуск эталонного кварцевого генератора Г и устройства синхронизации УС. При подаче импульсов управления на базу транзистора VT1 происходит включение этого транзистора и разряд конденсатора С1 по цепи: $+C1 - VT1 - L - Z_n - -C1$. Ток возрастает в цепи эмиттера транзистора VT1, и напряжение, трансформированное с вторичной обмотки трансформатора Т1, подается на инверсный вход компаратора К1, на прямой вход которого подается эталонный сигнал синусоидальной формы $i_{\max}(t)$.

При достижении на инверсном входе сигнала величины эталонного сигнала происходит «опрокидывание» компаратора К1. Компаратор К1 выключается и через широтно-импульсное устройство ШИУ на базу транзистора VT1 подается запирающий сигнал. Транзистор VT1 выключается, а ток в нагрузке в силу индуктивного характера нагрузки Z_n и индуктивности L продолжает протекать по цепи: $-C2 - VD2 - L - Z_n - +C2$. Напряжение на нагрузке меняет знак, а ток уменьшается по величине. При достижении напряжением на инверсном входе компаратора К2 величины, соответствующей эталонному сигналу, срабатывает компаратор К2, и сигнал через широтно-импульсное устройство ШИУ подается на включение транзистора VT1. При включении транзистора VT1 ток через него начинает возрастать, и картина процессов повторяется. При переходе тока через 0 в моменты, когда $\omega t = 0$ и $\omega t = \pi$, устрой-

ством синхронизации УС меняется направление управляющих сигналов: вместо транзистора VT1 управляющий сигнал подается на транзистор VT2, и происходит формирование отрицательной полуволны выходного тока. Так, при включении транзистора VT2 происходит разряд конденсатора С2 по цепи: $+C2 - Z_n - L - VT2 - -C2$. При этом формируется отрицательная полуволна выходного тока и соответственно отрицательная полуволна напряжения на нагрузке. При выключении транзистора VT2 ток в нагрузке продолжает протекать в том же направлении, уменьшаясь по величине, по цепи: $+L - VD3 - C1 - Z_n - -L$. Напряжение на нагрузке меняет свой знак, как показано на рис. 2. Следует отметить, что при индуктивном характере нагрузки Z_n исчезает необходимость в наличии индуктивности L .

Как следует из принципа работы, частота воспроизведенного выходного напряжения определяется частотой коммутации силовых транзисторов, которая, в свою очередь, зависит от величины индуктивности в цепи нагрузки, погрешности воспроизведения формы выходного напряжения, величины управляющего сигнала. Таким образом, устройство позволяет обеспечить синусоидальную форму выходного тока в широком диапазоне регулирования амплитуды и частоты выходного тока.

Сравнительный анализ с аналогом

Наиболее близким техническим решением к предлагаемой схеме является схема основного инвертора с системой управления, применяющаяся в источниках бесперебойного электропитания с дельта-преобразованием фирмы APC Silcon (схема управляющих контуров 12.2 [4]). Система управления также включает последовательно соединенные эталонный кварцевый генератор, устройство синхронизации, устройство формирования эталонного сигнала, сравнивающее устройство и широтно-импульсное устройство, управляющее транзисторами. В данном инверторе обеспечивается на выходе регулируемое выходное напряжение, причем чистой синусоиды, и единичный выходной коэффициент мощности. К недостаткам устройства следует отнести постоянство частоты коммутации силовых транзисторов на выходе инвертора, ведущее к изменению гармонического состава, и изменение коэффициента искажения синусоидальности выходного напряжения при грубом регулировании амплитуды и частоты выходного напряжения.

Устройство, предлагаемое в настоящей работе, отличается схемой управления: дополнительно содержит две пары трансформаторов тока Т1, Т2 и Т3, Т4, сравнивающее устройство выполнено из двух компараторов, устройство формирования эталонного сигнала состоит из двух формирователей эталонных сигналов синусоидальной формы тока.

Литература

1. Королев С.И. Проектирование устройств электропитания средств вычислительной техники / С.И. Королев, Г.И. Цветков, Ю.А. Шурыгин. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 206 с.

2. Шурыгин Ю.А. Инвертор напряжения с принудительным формированием заданной формы тока / Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2 (24), ч. 1. – С. 310–313.

3. Пат. на полезную модель 92578 РФ, МПК Н 02 J 3/01, H02M. Устройство для формирования синусоидальной формы выходного тока / Ю.А. Шурыгин (РФ). – № 2009113759/22; заявл. 13.04.2009 г.; опубл. 20.03.2010 г., Бюл. № 8. – 3 с.

4. Технология дельта-преобразования APC Silicon. – URL: www.mt.-810.narod.ru/telecom.html (дата обращения: 01.09.2020).

Шурыгин Юрий Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (383-2) 51-05-30
Эл. почта: office@tusur.ru

Зайченко Татьяна Николаевна

Д-р техн. наук, профессор каф. КСУП ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: ztntomsk@rambler.ru

Аристов Анатолий Владимирович

Д-р техн. наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического ун-та (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-850-16-27
Эл. почта: parist@sibmail.com

Shurygin Yu.A., Zaichenko T.N., Aristov A.V.

Time-pulse method of single-phase half-bridge inverter control in formation of the harmonic load current

The paper discusses the methods for harmonic current formation in DC to AC converters. The authors propose a time-pulse method for control of switches in a half-bridge inverter for formation of the harmonic load current in a wide range of amplitude and output current frequency adjustment.

Keywords: inverter, control, current waveform formation, harmonic form.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-4-99-102

References

1. Korolyov S.I., Tsvetkov G.I., Shurygin Yu.A. *Proektirovaniye ustroystv elektropitaniya sredstv vychislitel'noy tekhniki* [Design of power supply devices for computer equipment]. Tomsk, Tomsk Univ. Publ., 1990, 206 p. (in Russ.)

2. Shurygin Yu.A., Shinyakov Yu.A. Invertor napryazheniya s prinuditel'nym formirovaniyev zadannoy formy toka [Voltage inverter with forced formation of a specific current waveform]. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, no. 2 (24), vol. 1, pp. 310–313 (in Russ.)

3. Korolyov S.I., Shurygin Yu.A., Ilchenko V.P., Kotov A.A., Korolyov E.S. *Ustroystvo dlya formirovaniya sinusoidal'noy formy vykhodnogo toka* [Device for sinusoidal waveform of current output]. Patent RF, no. 2009113759/22; 2009.

4. Tekhnologiya delta-preobrazovaniya APC Silicon [APC Silicon delta conversion technology]. Available at: www.mt.-810.narod.ru/telecom.html (Accessed: September 1, 2020) (in Russ.)

Yury A. Shurygin

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of Department of Computer Control
and Design Systems, Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 51-05-30
Email: office@tusur.ru

Tatyana N. Zaichenko

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Department of Computer Control and Design Systems
TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-47-17
Email: ztntomsk@rambler.ru

Anatoliy V. Aristov

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Division for Power and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University (NI TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-850-16-27
Email: parist@sibmail.com