

УДК 621.314

Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков

Инвертор напряжения с принудительным формированием заданной формы тока

Приведены результаты исследования электромагнитных процессов в автономном инверторе напряжения с принудительным формированием синусоидальной формы тока. Получены выражения, позволяющие определить частоту коммутаций ключей инвертора, установившееся и переходное значения тока при активно-индуктивной нагрузке. Рассмотрены случаи симметричного и несимметричного формирования тока в m -фазной нагрузке.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, коммутационная функция, многофазный (m -фазный) инвертор, активно-индуктивная нагрузка, погрешность воспроизведения формы тока, дискретное преобразование Лапласа, широтно-импульсная модуляция.

Регулирование параметров электрической энергии с помощью известных устройств преобразовательной техники приводит к искажению синусоидальной формы напряжения (тока) и дополнительным импульсным помехам. Это неприемлемо для большинства промышленных установок, спроектированных на потребление синусоидальной формы напряжения (тока), поэтому для процессов преобразования и регулирования электрической энергии задача улучшения формы напряжения (тока) остается актуальной.

Центральным звеном многих преобразователей электрической энергии является автономный инвертор напряжения (АИН), который на основе модуляционных методов регулирования выходного напряжения обеспечивает хорошие перспективы улучшения качества электрической энергии. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) при большом диапазоне применения выходной частоты (1:10000 и более) не может обеспечить постоянный коэффициент гармоник по току при неизменном соотношении выходной и модулирующей частоты. Переход к большему соотношению на низких частотах связан со значительным усложнением схемы управления и может привести к появлению субгармоник. Решить этот вопрос позволяет инвертор напряжения с принудительным формированием тока [1, 2]. Формирование тока нагрузки производится слежением за заданным значением тока с известной, заранее заданной погрешностью. Достигается это многократным переключением ключей инвертора в течение периода основной частоты. Мгновенное значение тока нагрузки следует за заданным прерывисто, схема нечувствительна к отклонению тока в зоне заданного допуска. При превышении этой зоны появляется сигнал рассогласования, и схема управления переключает напряжение инвертора в сторону уменьшения этого рассогласования.

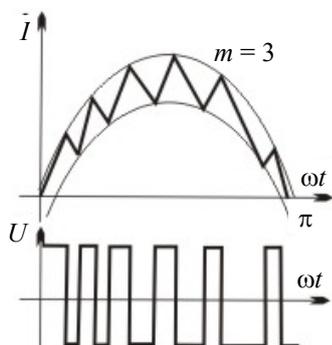


Рис. 1. Формирование тока в однофазном инверторе

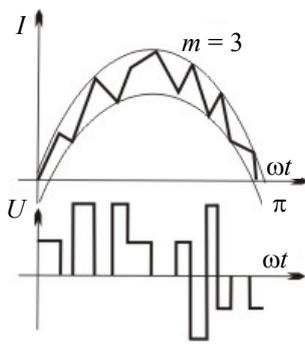


Рис. 2. Формирование тока в трехфазном инверторе

Формирование тока осуществляется с помощью двухзонного регулятора, при этом ток нагрузки пульсирует в зоне (рис. 1, 2), именуемой в дальнейшем погрешностью воспроизведения тока (ΔI).

При формировании синусоидальной формы ток нагрузки $i_H(t)$ пульсирует между двумя заданными синусоидальными сигналами $i_1(t)$ и $i_2(t)$, которые могут быть заданы следующими значениями:

$$\text{I. } \begin{aligned} i_1(t) &= I_m \sin \omega t + 0,5\Delta I_1; \\ i_2(t) &= I_m \sin \omega t - 0,5\Delta I_1. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{II. } \begin{aligned} i_1(t) &= (I_m + 0,5\Delta I_2) \sin \omega t; \\ i_2(t) &= (I_m - 0,5\Delta I_2) \sin \omega t. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{III. } \begin{aligned} i_1(t) &= (I_m + 0,5\Delta I_2) \sin \omega t + 0,5\Delta I_1; \\ i_2(t) &= (I_m - 0,5\Delta I_2) \sin \omega t - 0,5\Delta I_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Из приведенных вариантов второй не получил распространения ввиду недопустимо большой частоты коммутации ключей инвертора при переходе задающих сигналов через 0. Кроме указанных выше, возможен однопозиционный способ формирования тока, когда включение ключей обеспечивается на основе ШИМ, а выключение – на основе слежения за током.

Теоретически в m -фазной системе возможны два способа формирования тока: независимое, когда ток в каждой фазе формируется отдельно, независимо от состояния ключей других фаз (см. рис. 1), и зависимое, когда формирование тока в отдельной фазе зависит от состояния ключей во всех фазах (рис. 2). В первом случае для формирования m -фазного тока требуется m однофазных инверторов и фазы нагрузки должны быть гальванически развязаны. Но и в этом случае нельзя в чистом виде получить независимое формирование, т.к. всегда имеется взаимное влияние фаз через общее магнитное поле. Поэтому на практике чаще приходится иметь дело с зависимым формированием, когда для формирования m -фазного тока достаточно одного m -фазного инвертора.

Для определения динамических потерь в системе «АИН – двигатель переменного тока» (наиболее распространенная нагрузка для m -фазного АИН – это двигатель переменного тока), используя графоаналитический метод определения точки встречи кривой тока и кривых, ограничивающих зону пульсации тока, получено выражение (4) для определения средней частоты коммутации ключей инвертора [1]:

$$f_k = \frac{1}{2\pi} \omega \operatorname{ctg} \varphi \frac{1,43}{K_u^2 \sqrt{K_i}} \sqrt{\frac{4K_u^2 - 1}{3}} \cdot \operatorname{tg} \varphi + \omega \operatorname{ctg} \varphi \frac{4K_u - 3 \operatorname{tg}^2 \varphi - 1}{8K_u \cdot K_i}, \quad (4)$$

где $K_u = \frac{E_{\Pi}}{R \cdot I_m}$ – коэффициент использования напряжения источника питания; E_{Π} – напряжение питания; R – активное сопротивление нагрузки; I_m – максимальное значение тока нагрузки; $K_i = \frac{\Delta I}{I_m}$ – коэффициент погрешности воспроизведения формы тока; φ – параметр нагрузки, определяющей соотношение активной и реактивной составляющей.

С целью оптимизации потерь в системе «полупроводниковый преобразователь – асинхронный двигатель» проведено исследование влияния погрешности воспроизведения тока на качественные характеристики (пульсации электромагнитного момента, скорости) и потери в системе. Исследования показали, что оптимальное значение K_i лежит в пределах 20–25%. Однако поскольку более важной задачей является минимизация потерь в двигателе, которые уменьшаются с уменьшением K_i , а значит, с увеличением частоты коммутации, режим работы всей системы следует выбирать из максимально допустимых потерь в преобразователе.

При проектировании электромеханических систем с принудительным формированием тока возникают трудности анализа электромагнитных процессов из-за неопределенности моментов коммутации ключей АИН. Применение метода, основанного на использовании коммутационных функций и дискретного преобразования Лапласа, не позволяет провести анализ в обобщенном виде. Поэтому токи в инверторе определяются поинтервально, руководствуясь логикой работы ключей и известными значениями переменных предыдущих состояний. Коммутация ключей (смена знака коммутационной функции по периоду и по фазам) является сложной функцией, зависящей от симметрии параметров схемы управления, нагрузки по фазам и по полупериодам. При анализе электромагнитных процессов наряду с симметричными режимами следует рассматривать влияние несимметрии на качество работы системы.

При симметричном формировании выходное напряжение m -фазного инвертора представляется через напряжение источника питания и коммутационные функции [2, 3]:

$$\begin{aligned} U_{ij}(\varepsilon) &= 0,5 E_{\Pi}(\varepsilon) [F_i(\varepsilon) - F_j(\varepsilon)] = 0,5 E_{\Pi}(\varepsilon) \cdot F_{ij}(\varepsilon); \\ U_i(\varepsilon) &= 0,5 E_{\Pi}(\varepsilon) [F_i(\varepsilon) - F_{cp}(\varepsilon)] = 0,5 E_{\Pi}(\varepsilon) \cdot F_{i\text{cp}}(\varepsilon), \end{aligned} \quad (5)$$

где $F_{cp}(\varepsilon) = \frac{1}{m} \sum_{l=0}^{m-1} F_l(\varepsilon)$ – среднее значение всех коммутационных функций; $F_{ij}(\varepsilon)$ и $F_i(\varepsilon)$ – коммутационные функции линий ij и фазы i ; $l = i - 1$; $\varepsilon = \frac{t}{T}$; T – период основной частоты; E_{Π} – напряжение источника питания.

Уравнение (5) само не определяет состояние схемы, его необходимо дополнить логическими условиями формирования тока i -й линии, которое в относительных единицах имеет вид

$$\begin{aligned}
 [i_i(\varepsilon) < \sin(2\pi\varepsilon - l\frac{2\pi}{m}) + 0,5K_i] &\supset [F_i(\varepsilon) \equiv 1]; \\
 [i_i(\varepsilon) > \sin(2\pi\varepsilon - l\frac{2\pi}{m}) - 0,5K_i] &\supset [F_i(\varepsilon) \equiv 1].
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Из уравнения (6) можно определить условия переключения коммутационной функции:

$$F_i(\varepsilon)[i_i(\varepsilon) - \sin(2\pi\varepsilon - l\frac{2\pi}{m})] - 0,5K_i = 0. \tag{7}$$

Напряжение и ток в i -й линии при активно-индуктивной нагрузке связаны между собой выражением (8), записанным в операторной форме:

$$[i_i(p) - i_0(0)]Z(p) = K_{F_i} \cdot K_U, \tag{8}$$

где $K_{F_i} = 0,5(F_i - F_0)$; $F_0 = \frac{1}{m} \sum_{l=0}^{m-1} F_l$; $Z(p)$ – полное сопротивление.

Для любого момента времени, характеризуемого устойчивым состоянием K_{F_i} и i_0 , можно записать уравнение для вычисления тока

$$i_i(\varepsilon) = K_{F_i} \cdot K_U [1 - e^{-2\pi\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_{0i})}] + i_{0i} \cdot e^{-2\pi\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_{0i})}, \tag{9}$$

где $\beta_1 = \frac{1}{\text{tg}\varphi} = \frac{R}{\omega L}$.

При симметричной m -фазной нагрузке вычисление текущих значений токов каждой фазе нецелесообразно. В этом случае проще произвести определение обобщенного вектора тока:

$$\bar{I}(\varepsilon) = 0,5K_U \bar{F}(1 - e^{-\text{ctg}\varphi(\varepsilon - \varepsilon_0)}) + \bar{I}_0 e^{-\text{ctg}\varphi(\varepsilon - \varepsilon_0)}, \tag{10}$$

где $\bar{F} = \frac{2}{m} \sum_{l=0}^{m-1} a^{-l} F$; $\bar{I}_0 = \frac{2}{m} \sum_{l=0}^{m-1} i_{0l} \cdot a^{-l}$,

а токи отдельных фаз определяются как

$$i_l(\varepsilon) = \text{Re}(a^{-l} \bar{I}(\varepsilon)). \tag{11}$$

Используя приведенные выше выражения, была разработана программа анализа электромагнитных процессов. Фрагменты, иллюстрирующие результаты анализа, представлены на рис. 3, а, б.

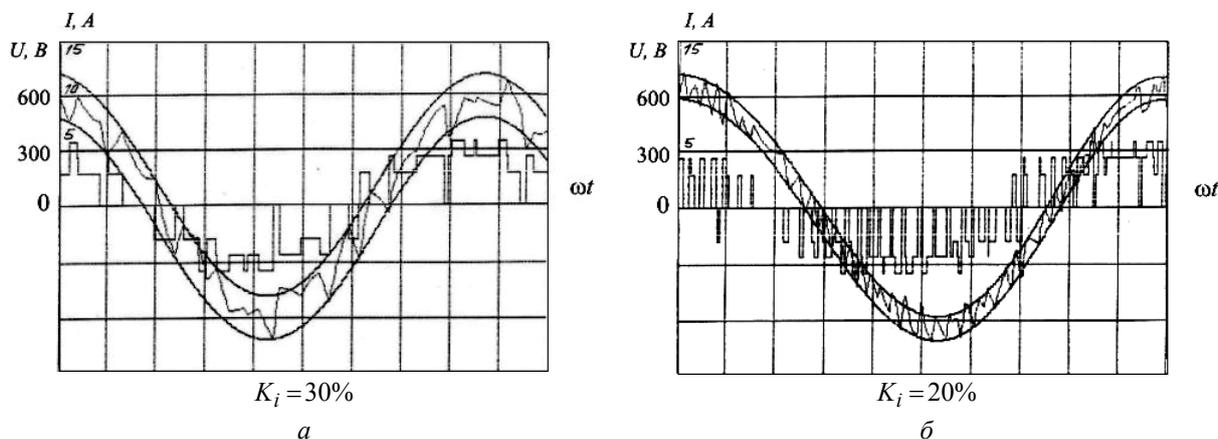


Рис. 3. Принудительное формирование тока

Зависимое формирование тока при симметричном режиме предпочтительнее в связи с более эффективной загрузкой ключей инвертора по току. Частота коммутации силовых ключей зависит от числа фаз и при прочих равных условиях является минимальной для трехфазного инвертора ($f_{k\min}$) и максимальной для однофазного ($f_{k\max}$). Осциллограмма (рис. 4), полученная на реальном изделии, имеет небольшие всплески при четном числе фаз. Основной величиной, влияющей на коэффициент нелинейных искажений по току при замкнутом формировании, является погрешность воспроизведения тока K_i . Параметр нагрузки $\text{tg}\varphi$ и коэффициент использования напряжения K_U влияют на форму тока меньше.

Несимметричные режимы [4] в инверторах с принудительным формированием тока обусловлены неидентичностью схемы управления по фазам и несимметрией нагрузки. Наиболее характерные из них следующие:

- несимметрия K_i по фазам и по полупериодам;
- несимметрия задающего сигнала по фазам и по полупериодам;
- несимметрия сдвига между фазами;
- несимметрия параметров нагрузки по фазам.

В качестве примера можно привести влияние несимметрии K_i по фазам. Так, несимметрия по фазам в 5% приводит к тому, что частота коммутации в фазе с большей величиной K_i уменьшается на 50%, а в фазе с меньшей величиной K_i – увеличивается на 30% относительно режима с симметричными параметрами. Наихудшим видом является несимметрия по фазе в сочетании с несимметрией по амплитуде.

Результаты исследований показали, что при проектировании автономных инверторов напряжения с принудительным формированием тока необходимо использовать задающий генератор синусоидального сигнала, обеспечивающий высокую стабильность во всем диапазоне изменения частоты.

Литература

1. Формирование тока в инверторах напряжения / В.И. Иванчура, И.Ф. Калинин, Б.П. Соустин, Ю.А. Шурыгин // *Электричество*. – 1972. – № 6. – С. 24–27.
2. Иванчура В.И. Исследование формирования многофазного синусоидального тока / В.И. Иванчура, Б.П. Соустин, Ю.А. Шурыгин // *Современные задачи преобразовательной техники*. – Киев: Наукова думка, 1975. – С. 42–48.
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. Несимметричные режимы принудительного формирования тока / Б.П. Соустин, Ю.А. Шурыгин // *Современные задачи преобразовательной техники*. – Киев: Наукова думка, 1975. – С. 105–106.

Шурыгин Юрий Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор, ректор ТУСУРа
Тел.: 8 (383-2) 51-05-30
Эл. почта: office@tusur.ru

Шиняков Юрий Александрович

Д-р техн. наук, директор НИИ космических технологий ТУСУРа
Тел.: 8 (383-2) 90-01-62
Эл. почта: shua@main.tusur.ru

Shurygin Yu.A., Shinyakov Yu.A.

The voltage inverter with forced formation of the requested form of a current

Results of research of electromagnetic processes in the independent voltage inverter with compulsory formation of the sinusoidal current form are resulted. The expressions, allowing defining commutation frequency of the inverter keys, the established and transitive values of a current at is active-inductive loading are received. Cases of symmetric and asymmetrical formation of a current in m-phase loading are considered.

Keywords: independent voltage inverter, switching function, multiphase (m-phase) inverter, is active-inductive loading, error of reproduction of the current form, discrete transformation of Laplace, pulse-width modulation.

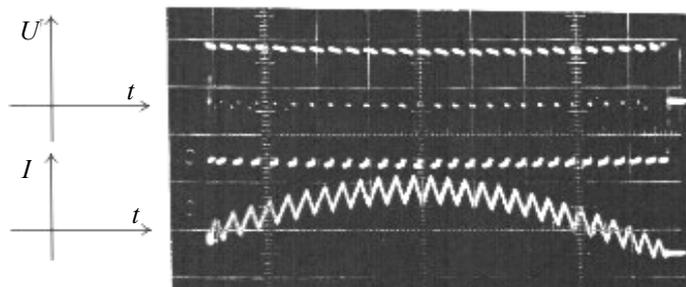


Рис. 4. Принудительное формирование тока
 $f=100$ Гц, $K_i=0,25$, $\text{tg}\varphi_H=0,6$