

Модификация алгоритма векторной широтно-импульсной модуляции для трехфазного инвертора с использованием косоугольной системы координат

С. Ал Мустафа¹, Б. Ахмед¹, Б. С. Бала¹, А. В. Домнин¹, П. Н. Примаченко¹, А. Н. Прокшин^{1,2,3}

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²Санкт-Петербургский государственный университет

³Университет Иннополис, Республика Татарстан

E-mail:anprokshin@etu.ru

Аннотация. В системах управления трехфазными электрическими машинами используется декартова система координат для изображающих векторов тока, напряжения, потокосцепления. В данной работе вектора рассматриваются в косоугольной системе координат с осями, совпадающими с физическими осями фаз и с углом между осями 120 градусов. В данной системе координат скалярное произведение, и соответственно, выражения для мощности, отношения перпендикулярности, выражаются проще чем в декартовой системе. Измеренные значения фазных токов и линейных напряжений в косоугольной системе координат имеют очевидный смысл – это проекции на сопряженные (дуальные) оси. Это рассмотрение согласуется с методом определения мощности трехфазной сети с помощью двух ваттметров. Наличие простого физического смысла при рассмотрении электрических машин в косоугольной системе координат повлекло пересмотр алгоритмов в системах управления трехфазными инверторами. В работе рассмотрен финальный шаг генерации векторного ШИМ (svpwm) и предложен алгоритм для получения значений коэффициентов заполнения ключей полумостов в фазах. Произведено сравнение данного алгоритма с алгоритмами, предложенными Texas Instruments, STMicroelectronics, НПФ Мехатроника-Про, Русским Электротехническим обществом и показаны преимущества данного алгоритма.

Ключевые слова: векторная широтно-импульсная модуляция; косоугольная система координат; преобразования Парка-Горева

I. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ В КОСУГОЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Рассматривается инвертор рис. 1, соединенный с трехфазной электрической машиной, например синхронным или асинхронным мотором, либо инвертор, ведомый промышленной трехфазной сетью.

Схема подключения датчиков напряжения и тока, используемых для управления трехфазным инвертором напряжения, ведомого промышленной сетью, представлена на рис. 1.

Измерения мгновенных значений линейных напряжений есть перпендикулярные проекции изображающего вектора напряжения \vec{u} на оси U_{AC} и U_{BC} и измерения мгновенных значений фазных токов есть перпендикулярные проекции изображающего вектора

тока i на оси I^A , I^B . Изображающий вектор и его проекции представлены на рис. 2.

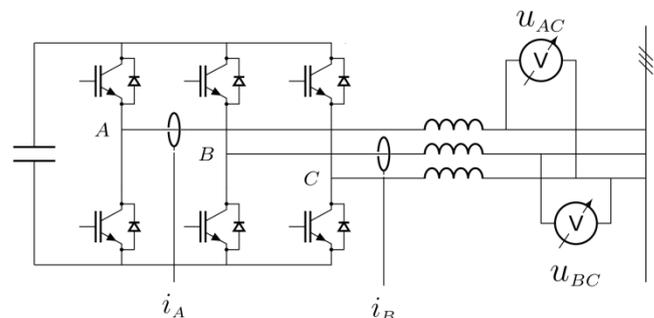


Рис. 1. Схема измерений токов и напряжений в трехфазном инверторе

В косоугольной системе координат перпендикулярные проекции вектора называются ковариантными проекциями и обозначаются индексами, расположенными снизу. Контравариантные координаты, являющиеся разложением вектора по правилу параллелограмма по косоугольным базовым векторам, называются контравариантными и обозначаются индексами, расположенными сверху [1].

Выбор направления осей I^A , I^B и осей U_{AC} и U_{BC} продиктован тем, чтобы направления осей совпадали с общепринятыми направлениями пар сопряженных или двойственных осей, которые вводятся при рассмотрении координат в косоугольных системах координат. Двойственный базис вводится таким образом, чтобы угол между базовой и сопряженной осью к этой базовой был острым.

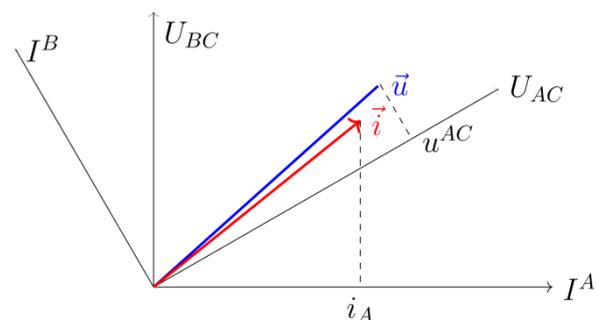


Рис. 2. Изображающий вектор и его проекции

При этом перпендикулярные проекции вектора на ось оказываются пропорциональными контравариантным координатам по сопряженным осям. Перпендикулярные проекции вектора напряжения на ось U_{AC} пропорциональны контравариантной координате по оси I^A .

Выбор единиц измерения по сопряженным осям фазного тока и линейного напряжения сделан таким образом, что коэффициент пропорциональности оказывается равным 1 [2].

Скалярное произведение двух произвольных векторов

$$(\vec{x}, \vec{y}) = x_1 y^1 + x_2 y^2 = y_1 x^1 + y_2 x^2.$$

В нашей системе координат мгновенная мощность:

$$P = (i \cdot u) = i_A u^{AC} + i_B u^{BC}$$

Учитывая $i_A + i_B + i_C = 0$, вводя «нулевой»

потенциал u_0 фазного напряжения («нулевой» потенциал может быть функцией от времени) получаем:

$$P = i_A (u_A - u_C - u_0 + u_0) + i_B (u_B - u_C - u_0 + u_0) = i_A u_A + i_B u_B - u_C (i_A + i_B) = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C$$

что является суммой мощностей фаз [3]. Вывод формулы мощности из линейных напряжений и фазных токов с использованием косоугольной системы координат в данной схеме подключения измерительных приборов совпадает с определением мощности по методу двух ваттметров Аарона.

Наличие простого физического смысла в формулах, получаемых в косоугольной системе координат, побудило переписать алгоритмы для систем управления в косоугольной системе координат.

II. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ

Типичный алгоритм в системах управления инверторами напряжения представлен на рис. 3.

Нашей задачей было рассмотрение алгоритмов широтно-импульсной модуляции в терминах линейных напряжений и фазных токов, а именно: обратное преобразование Парка–Горева, обратное преобразование Кларка и алгоритм задания коэффициентов заполнения (duty cycles) ключей полумостов фаз T_A, T_B, T_C . Обычно обратное преобразование Кларка и задание коэффициентов заполнения сводят в единый алгоритм. Эти блоки выделены на рисунке красным, рис. 3.

A. Преобразование обратного преобразования Парка–Горева

Изменим обратное преобразование Парка–Горева при переходе из вращающейся системы координат в стационарную систему координат.

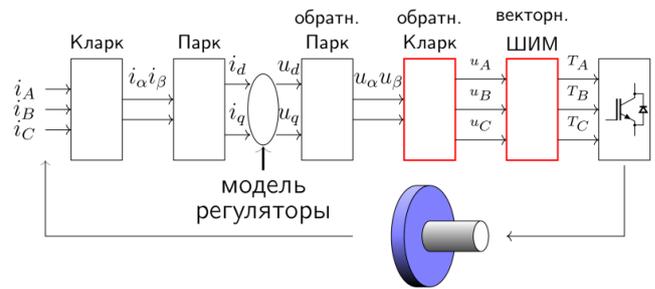


Рис. 3. Типовая схема управления инвертором напряжения

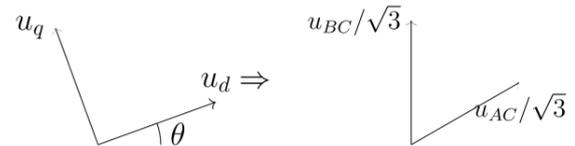


Рис. 4. Переход из вращающейся системы координат в стационарную систему координат

$$\begin{pmatrix} \frac{u_{AC}}{\sqrt{3}} \\ \frac{u_{BC}}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}$$

Вместо преобразования к стационарной декартовой системе с осями α и β перейдем в косоугольную стационарную систему линейных напряжений u_{AC} и u_{BC} на рис. 4. Здесь u_d и u_q координаты изображающего вектора напряжения во вращающейся системе координат, θ – угол между вращающейся и стационарными системами координат.

B. Вывод алгоритма для коэффициентов заполнения

Найдем координаты вектора как центр тяжести весов m_1, m_2, m_3 в секторе I. Максимальная амплитуда вектора линейного напряжения выбрана равной $u_{ac\max} = 1$, $u_{bc\max} = 1$. Ось для линейного напряжения U_{BC} выбрана как показано на рис. 5 от точки O' к O'' . Веса расставлены, как показано на рис. 5.

$$\begin{cases} u_{ac} m_1 = (u_{ac\max} - u_{ac}) \cdot (m_2 + m_3) \\ u_{bc} (m_1 + m_2) = (u_{ac\max} - u_{bc}) \cdot m_3 \\ m_1 + m_2 + m_3 = 1 \end{cases}$$

Настройка таймеров представлена на рис. 6. Найдем коэффициенты заполнения T_A, T_B, T_C включения ключей, где T_i изменяется от 0 до 1.

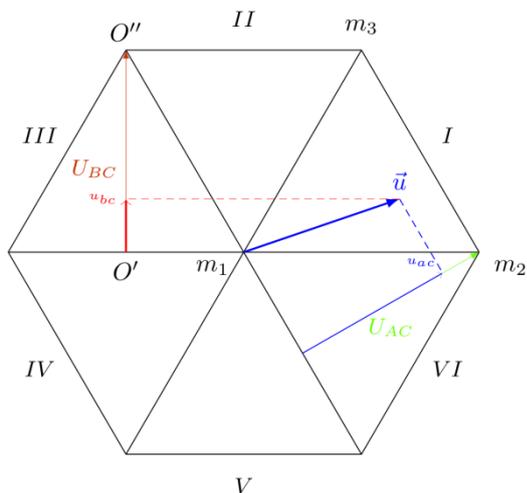


Рис. 5. Изображающий вектор напряжения в секторе I

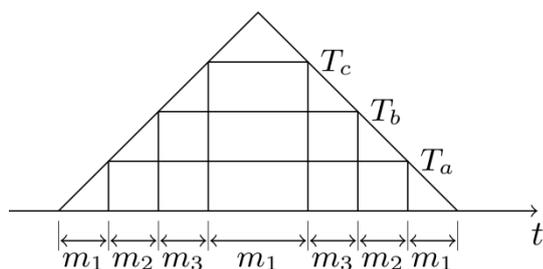


Рис. 6. Настройка таймеров

$$\begin{cases} 1 - T_a + T_c = 1 - (m_2 + m_3) \\ T_a - T_b = m_2 \\ T_a - T_b = m_3 \end{cases}$$

Первое уравнение в системе линейно-зависимое. Вместо него вставим уравнение, которое выражает, что часть нулевого вектора, когда все ключи подключены к положительной шине равно времени когда все ключи на отрицательной шине.

$$1 - T_a = T_c$$

Получим систему уравнений в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_a \\ T_b \\ T_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_2 \\ m_3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Введем переменные для скважностей ШИМ, где T_i' изменяется от -1 до 1 когда T_i изменяется от 0 до 1:

$$T_i' = 2T_i - 1$$

Решая последовательно системы получаем:

$$\begin{aligned} T_a' &= u_{ac} \\ T_b' &= -u_{ac} + 2u_{bc} \\ T_c' &= -u_{ac} \end{aligned}$$

Получены простые формулы для T_a , T_b , T_c через u_{ac} и u_{bc} . Аналогично получают коэффициенты заполнения для секторов II-IV. Графики коэффициентов заполнения представлены на рис. 7. Из графика видно, что пики, формирующие коэффициенты заполнения лежат на кривых для линейных напряжений u_{ac} и u_{bc} .

III. СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМА С АЛГОРИТМАМИ TEXAS INSTRUMENTS, STMicroelectronics, НПФ МЕХАТРОНИКА-ПРО, РУССКОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

Представленный алгоритм сравнивался с алгоритмами, предложенными Texas Instruments [4], STMicroelectronics [5], НПФ Мехатроника-Про [6], Русским Электротехническим обществом, и показал точное совпадение кривых для коэффициентов заполнения. В системе управления инвертором, управляющим синхронным двигателем, алгоритм показал на шаге генерации коэффициентов заполнения 20-процентное увеличение производительности по сравнению с алгоритмами, предложенными указанными фирмами. По оценке авторов, алгоритм должен давать двукратное увеличение производительности на шаге генерации коэффициентов заполнения, однако определение сектора одинаково во всех реализациях алгоритма. Поэтому не удастся добиться 50 % увеличения производительности.

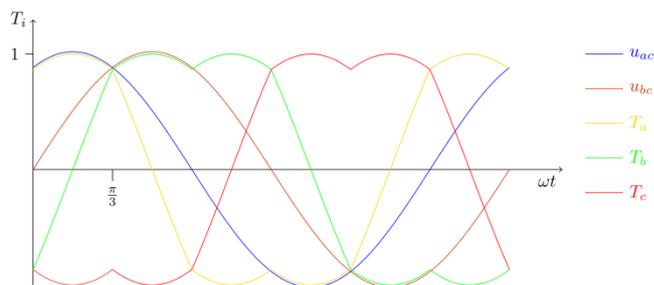


Рис. 7. Графики коэффициентов заполнения

Алгоритм тестировался в системе управления инвертором с синхронным двигателем FL57BL01 и асинхронным двигателем УАД-12 на микроконтроллерах nucleo-f302r8 и stm32f103c8t6.

Эффективность алгоритма в том что в отличие от общепринятой практики, где происходит переход в декартову систему координат, а затем из декартовой в косоугольную систему координат, в данном алгоритме нет переходов в декартову систему и обратно. Вычисления производятся в косоугольной системе координат.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение данного алгоритма с алгоритмами, предложенными Texas Instruments, STMicroelectronics, НПФ Мехатроника-Про, Российским Электротехническим обществом показало: оригинальность алгоритма, алгоритм базируется на измеряемых физических величинах, предложенный алгоритм имеет в два раза меньше операций без учета алгоритма определения сектора.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность Генеральному директору Ильинцеву Александру Николаевичу, Обществу с ограниченной ответственностью «Русское Электротехническое Общество» ООО «РЭО» за оказанную помощь при проведении данного исследования.

Выражаем благодарность студентам групп 0421 и 8400 СПбГЭТУ «ЛЭТИ» за проверку и апробирование алгоритма на микроконтроллере с программой управления инвертором с асинхронным двигателем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия, Методы и приложения 2-е изд., перераб. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 760 с.
- [2] Борисенко А.И., Тарапов И.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. М. «Высшая школа», 1966. 252 с.
- [3] Али Альмушреки О.А., Обама Н.С., Прокшин А.Н., Татаринцев Н.И., Трофимов А.В. Измерение тока и напряжения в косоугольных координатах в трехфазной обобщенной электрической машине /XXIV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2021). Сборник докладов. Санкт-Петербург. 26 – 28 мая 2021 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 351 с.
- [4] The Digital Motor Control Software Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ug/spru485a/spru485a.pdf> – (дата обращения: 21.03.2032).
- [5] Генератор пространственного вектора ШИМ [Электронный ресурс] / «НПФ Мехатроника-Про» – Режим доступа: http://mechatronica-pro.com/sites/default/files/content/product/35/iqsvgen_dq_rus.pdf – (дата обращения: 21.03.2032).
- [6] STM32 Motor Control Software Development Kit Rev 5 [Электронный ресурс] / STMicroelectronics, 2019 файл `pwm_curr_fdbk.c`