Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

П. Ю. Грачев, Использование тригонометрических и экспоненциальных функций дискретного аргумента для математического моделирования электромеханических и электромагнитных систем с несколькими вентильными преобразователями, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2004, выпуск 30, 197–201

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu326>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.85.183.62

26 апреля 2023 г., 14:14:26

Р и с. 1. Зависимости погрешности вычисления декремента колебаний от периода дискретизации

Р и с. 2. Зависимости погрешности вычисления декремента колебаний от объема выборки

Очевидно, что применение предлагаемого метода позволяет существенно, в несколько десятков раз уменьшить погрешность вычисления динамических характеристик диссипативных систем с турбулентным трением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зотеев В.Е. Разработка и исследование линейных дискретных моделей колебаний диссипативных систем // Вестник СамГТУ. Серия: Физ.-мат. науки. Вып. 7. 1999. № 7. С. 170-177.
2. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1987. 362 с.
3. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. М.: Мир, 1980. 320 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Ученого совета СамГТУ

Поступила 5.09.2004 г.

УДК 621.313

П.Ю. Грачев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ДИСКРЕТНОГО АРГУМЕНТА ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С НЕСКОЛЬКИМИ ВЕНТИЛЬНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Рассмотрены особенности математического моделирования асинхронных машин с вентильным возбуждением и выпрямителем в цепи ротора, а также многообмоточных электрических машин и трансформаторов при питании первичных обмоток от нескольких вентильных преобразователей.

В малой энергетике и на транспорте используются электромеханические преобразователи – электродвигатели и генераторы, обмотки которых подключены, с целью управления или преобразования электроэнергии, к вентильным преобразователям – выпрямителям и инверторам, включающим диоды, тиристорные или транзисторные ключи [1,2,3]. Кроме того, в таких электротехнических автономных системах применяют электромагнитные преобразователи – трансформаторы с пульсирующим или вращающимся магнитным полем [4,5], первичные обмотки которых подключены к нескольким вентильным преобразователям с несинусоидальной, в большинстве случаев ступенчатой, формой выходного напряжения.

Свойства таких систем существенно отличаются от свойств систем с одним вентильным преобразователем. Например, возникает естественная ШИМ тока ротора в асинхронных машинах с выпрямителем в цепи фазного ротора [6], появляются существенно несинусоидальные уравнивающие токи.

Особенностью математического моделирования таких систем является невозможность, или существенные погрешности, при прямом применении метода первой гармонической составляющей, из-за проявления описанных выше свойств этих систем. Моделирование с помощью пакета Matlab, широко применяемое в последнее время для исследования машинно-вентильных систем, не всегда выявляет особенности протекания электромагнитных процессов в системах с несколькими вентильными преобразователями. В настоящей работе показана целесообразность математического моделирования для выявления специфических свойств рассмотренных систем на основе аналитических выражений, включающих функции дискретного аргумента.

Рассмотрим несколько частных случаев, отражающих особенности работы и моделирования таких систем.

1. Моделирование автономных систем, включающих асинхронные машины с выпрямителем в цепи фазного ротора. Выпрямитель в цепи фазного ротора находит широкое применение в промышленности – это основная часть асинхронных вентильных, вентильно-машинных электрических и электромеханических каскадов, а также асинхронных машин с импульсным регулированием тока в цепи ротора [7].

Наиболее распространен для автономных систем случай, когда трехфазная обмотка статора АМ подключена к вентильному источнику реактивной мощности (ИРМ), выполненному по схеме автономного инвертора напряжения (АИН) со 180 градусным законом управления вентилями, а после выпрямителя ротора включен индуктивный фильтр. Автором в работе [6] показано, что в таких системах роторный диодный выпрямитель при частотах вращения ротора, отличных от нуля, работает в режиме широтно-импульсного модулятора тока ротора с несущей частотой, определяемой переключениями вентилей в цепи статора, и частотой модуляции, равной частоте скольжения. Это связано с тем, что ЭДС фаз ротора существенно отличаются от синусоидальных.

При математическом моделировании электромагнитных процессов в роторе мгновенные значения ЭДС фаз ротора могут быть представлены в виде алгебраической суммы синусоидальной ЭДС вращения ($e_{\text{вр}}^R$) и несинусоидальной трансформаторной ЭДС ($e_{\text{мп}}^R$):

$$e_{\text{ф}}^R = e_{\text{мп}}^R + e_{\text{вр}}^R. \quad (1)$$

Достаточно простые выражения для ЭДС ротора можно получить, если пренебречь падениями напряжений в активных сопротивлениях и индуктивных сопротивлениях рассеяния обмотки статора АМ, к которой подключен ИРМ. Для трехфазной асинхронной машины с мостовым трехфазным ИРМ при этих допущениях получаем следующие выражения для ЭДС фаз ротора, записанные с использованием тригонометрических функций дискретного аргумента:

$$\begin{aligned} e_a^R &= 2/3 u_{\text{ИРМ}} \cos[\pi n/3 - (1-s)\omega_1 t - v_0^R] - 2/\pi (1-s) u_{\text{ИРМ}} \cos[s\omega_1 t - \pi/6 - v_0^R]; \\ e_b^R &= 2/3 u_{\text{ИРМ}} \cos[\pi n/3 - (1-s)\omega_1 t - v_0^R - \alpha] - 2/\pi (1-s) u_{\text{ИРМ}} \cos[s\omega_1 t - \pi/6 - v_0^R - \alpha]; \\ e_c^R &= 2/3 u_{\text{ИРМ}} \cos[\pi n/3 - (1-s)\omega_1 t - v_0^R + \alpha] - 2/\pi (1-s) u_{\text{ИРМ}} \cos[s\omega_1 t - \pi/6 - v_0^R + \alpha], \end{aligned} \quad (2)$$

где: $n = \text{integer}[\omega_1 t / (\pi/3)]$ - целочисленная функция, определяемая моментами скачкообразного напряжения статора АМ; v_0^R - сдвиг фазы обмотки ротора, относительно одноименной фазы обмотки статора при $\omega_1 t = 0$, или, - в установившемся режиме, - в момент скачкообразного изменения напряжения статора АМ; $u_{\text{ИРМ}}$ - напряжение постоянного тока ИРМ; s - скольжение асинхронной машины.

Из уравнений (2) следует, что форма ЭДС ротора зависит не только от скольжения асинхронной машины, но и от положения фаз обмотки ротора v_0^R . Фазные токи ротора, без учета коммутационных процессов в роторном выпрямителе, можно описать следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} i_a^R &= i_D^R / 2 [\text{Sign } e_{ab}^R - \text{Sign } e_{ca}^R]; \\ i_b^R &= i_D^R / 2 [\text{Sign } e_{bc}^R - \text{Sign } e_{ab}^R]; \\ i_c^R &= i_D^R / 2 [\text{Sign } e_{ca}^R - \text{Sign } e_{bc}^R], \end{aligned} \quad (3)$$

где i_D^R - мгновенное значение тока на выходе выпрямителя;

$$\text{Sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x > 0; \\ -1, & \text{при } x < 0; \\ 0, & \text{при } x = 0. \end{cases}$$

Следовательно, форма тока ротора также зависит от положения фаз обмотки ротора v^R_{θ} .

На рис. 1 приведены соответствующие выражениям (2) и (3) формы токов и ЭДС. Описанная математическая модель дает хорошее качественное совпадение форм ЭДС и токов ротора с экспериментальными данными [6].

Коммутационные процессы в выпрямителе ротора удобно учитывать введением усредненного коммутационного сопротивления, учитывающего трех - (κ_1) и четырех - (κ_2) вентильную коммутацию:

$$R_{KCP} = (\kappa_1 + 2\kappa_2) X_K / 2\pi, \quad (4)$$

В отличие от систем с синусоидальным напряжением на статоре АМ это коммутационное сопротивление увеличивается с уменьшением модуля скольжения. Выпрямленная ЭДС ротора e^R_D , в отличие от АМ с синусоидальным напряжением на статоре, не пропорциональна скольжению.

Описанная естественная ШИМ тока ротора приводит к увеличению потерь в цепи ротора при уменьшении модуля скольжения. Для устранения этого недостатка предложен способ управления роторным выпрямителем [8], когда переключение вентиля происходит 6 раз за период первой гармонической составляющей ЭДС ротора. Возможно также улучшить коэффициент мощности такой системы. Для этого необходимо производить переключения управляемых вентилях в цепи ротора с опережающими углами, что возможно из-за несинусоидальной формы ЭДС ротора. Этот способ дополняет перечень способов улучшения коэффициента мощности, описанных в [9], и не требует специальной конструкции асинхронной машины или применения дополнительных электромеханических компенсаторов.

2. Моделирование систем с многообмоточными асинхронными машинами с короткозамкнутым ротором. Под многообмоточными машинами будем понимать машины, имеющие несколько трехфазных обмоток на статоре. К двум или более обмоткам таких машин могут быть подключены вентильные преобразователи со ступенчатой формой напряжения.

Если трехфазные обмотки имеют сдвиг в пространстве и соответствующий временной сдвиг ступенчатых трехфазных напряжений, - уменьшается пульсация электромагнитного момента в двигательном режиме, а с помощью дополнительной трехфазной обмотки, расположенной несоосно упомянутым обмоткам, можно получить напряжение в генераторном режиме со значительным числом ступеней, близкое к синусоидальному [10].

Управление такими машинами в двигательном и генераторном режимах, при накоплении кинетической энергии, описано в [3,11].

Основной особенностью работы таких систем с многообмоточными машинами является возникновение уравнивающего тока в фазах обмоток, связанное с существенным различием фазных ЭДС, наведенных результирующим основным магнитным потоком, и ступенчатых фазных напряжений, формируемых вентильными преобразователями. Уравнивающие токи загружают фазы обмотки статора и полупроводниковые ключи вентильных преобразователей, создают дополнительные потери в системе.

Выражения для уравнивающего тока фазы статора с m обмотками можно записать в виде уравнения, включающего кусочно-экспоненциальные функции:

Р и с. 1

$$i_{y(K+1)} = \frac{\Delta U_{(K+1)}}{R^S} \left(1 - e^{-\vartheta_d / \omega_1 \tau} \right) + \frac{1 - e^{-T_d / \omega_1 \tau}}{1 - e^{-NT_d / \omega_1 \tau}} \left(\frac{\Delta U_K}{R^S} - \sum_{L=1}^{N-1} \frac{\Delta U_{(K+1)}}{R^S} e^{(-T_d / \omega_1 \tau)(N-L)} \right) e^{-\vartheta_d / \omega_1 \tau}; \quad (5)$$

$$v_d = \omega_1 [t - T_d (n_1 + n_2 + \dots + n_m)]. \quad (6)$$

Здесь: v_d – дискретный аргумент, преобразующий экспоненциальную функцию в кусочно-экспоненциальную; $n_1, n_2, \dots, n_m$ – целочисленные функции, используемые для описания ступенчатых напряжений вентильных преобразователей; K – номер интервала дискретности; N – число интервалов дискретности за период фазного напряжения вентильного преобразователя; L – текущий интервал дискретности; T_d – длительность интервала дискретности преобразователя; ΔU – разность одноименных фазных напряжений обмотки статора в единой системе координат; R^S – активное сопротивление фазы обмотки статора машины; τ – постоянная времени цепи статора.

В частности, для электрической машины переменного тока с двумя трехфазными обмотками, сдвинутыми на 30 электрических градусов, и двумя мостовыми вентильными преобразователями типа «Автономный инвертор напряжения», ΔU в тригонометрических функциях дискретного аргумента имеет $n_1 = \text{integer } 3\omega_1 t / \pi$ и $n_2 = \text{integer } 3(\omega_1 t + \pi/6) / \pi$.

При этом напряжение может быть записано в следующем виде:

$$\Delta U = U_D / 3 [\cos \pi n_1 / 3 - \cos (\pi n_1 / 3 - \pi / 6)], \quad (7)$$

где: U_D – напряжение постоянного тока вентильных преобразователей.

Форма уравнивающих токов для этого случая при ненасыщенной магнитной цепи электрической машины представлена на рис.2. Максимальные значения токов, как следует из (5), определяются соотношением активного и индуктивного сопротивлений фаз статора машины, а также максимальными значениями ΔU .

С целью уменьшения этих токов предложен способ управления вентильной электрической машиной [12], который предлагает производить дополнительные выключения элементов вентильных преобразователей, соединенных с трехфазными обмотками статора электрической машины.

Р и с. 2

3. Моделирование систем с многообмоточными трансформаторами с вращающимся магнитным полем. Трансформаторы с вращающимся магнитным полем представляют собой АМ с фазным заторможенным ротором. Такие трансформаторы позволяют достичь значительной экономии электротехнической стали [4] и повысить качество электроэнергии [5].

Рассмотрим систему с трансформатором, две трехфазные первичные обмотки статора которого питаются от двух трехфазных мостовых инверторов напряжения, а вторичная трехфазная обмотка, расположенная на заторможенном роторе, может сдвигаться в пространстве относительно первичных обмоток, при этом взаимное расположение первичных обмоток также может изменяться.

Применяя координатное преобразование тригонометрических функций дискретного аргумента, с помощью которых описаны ступенчатые напряжения инверторов, удалось показать, что форма фазных и линейных напряжений вторичной обмотки трансформатора зависит от числа ступеней напряжения статорных обмоток, пространственного сдвига этих обмоток и положения выходной обмотки. Доказано, что волна ЭДС выходной обмотки симметрична, если сдвиг этой обмотки в электрических градусах относительно одной из первичных обмоток кратен четверти интервала дискретности фазных напряжений автономных инверторов.

Наименьший коэффициент гармоник выходного напряжения трансформатора (на холостом ходу - 0.78) достигается при двенадцатиступенчатой форме фазных напряжений инверторов. При этом сдвиг первичных обмоток - 15 электрических градусов, сдвиг вторичной обмотки - 37,5 электрических градусов относительно первой первичной обмотки. Напряжение этой первичной обмотки опережает на 15 градусов напряжение второй первичной обмотки. Под нагрузкой коэффициент гармоник выходного напряжения уменьшается, - выходное напряжение

трансформатора приближается к синусоидальному. На рис.3 приведены экспериментальные осциллограммы фазного (U_ϕ) и линейного (U_L) напряжений вторичной обмотки трансформатора мощностью 4 кВА, использующего статор асинхронной машины 4А90Л2У3, при работе под нагрузкой, близкой к половине номинальной.

Таким образом, математическое моделирование электромеханических и электромагнитных систем с несколькими вентильными преобразователями с использованием тригонометрических и экспоненциальных функций дискретного аргумента позволяют получить аналитические зависимости, вскрывающие специфические особенности работы таких систем.

Р и с. 3

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Загорский А.Е., Шакарян Ю.Г. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока. М.: Энергоатомиздат, 1986. 176 с.
2. Грачев П.Ю., Дружков А.А., Мягков Ф.Н. Перспективы применения многообмоточных асинхронных генераторов в ветроэнергетике и на малых ГЭС // Использование возобновляемых источников энергии в практике народного хозяйства: Тез. докл. республиканской научно-практической конф. Фрунзе, 1988. С.147-148.
3. Патент №2173020 Российской Федерации. МКИ Н 02 Р 9/44, F 02 N 11/04. Электрическая система с асинхронным стартер-генератором / В.М. Анисимов, П.Ю. Грачев, А.И. Скороспешкин, В.Н. Кудояров. // Самарский государственный технический университет / 27. 08. 2001, Бюл. №24.
4. Кузнецов Н.Е. Машинно-вентильные комплексы // Тезисы докладов науч.-техн. конференции Электротехнические комплексы автономных объектов (ЭКАО – 97), Москва 14-15 октября 1997 г. С 21-22.
5. А.с. 1741242 Способ формирования квазикругового магнитного поля / П.Ю. Грачев, М.Л. Костырев, И.И. Токкарь и др. Оpubл. 1992, Бюл. №22.
6. Костырев М.Л., Скороспешкин А.И., Грачев П.Ю. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах с выпрямителем при ступенчатом напряжении на статоре // Электротехника, 1982, №7. С 18 – 21.
7. Довганюк И.Я., Лабунец И.А., Плотникова Т.В. Асинхронный вентильный каскад с улучшенными характеристиками // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы, ч.1 / Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. С. 239-242.
8. А.с. 610277 СССР, Н 02 Р 7/42. Способ управления автономным асинхронным генератором / П.Ю.Грачев, М.Л.Костырев, А.И.Скороспешкин. Оpubл. 1978, Бюл. №21.
9. Беспалов В.Я. Методы компенсации реактивной мощности в асинхронных двигателях// Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. Ч.2 / Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. С. 9-11.
10. А.с. 1821884 СССР, МКИ Н02 М 7/72. Способ формирования выходного напряжения преобразователя электро-энергии / П.Ю. Грачев, М.Л. Костырев, Ф.Н. Мягков и др. Оpubл. 1993, Бюл. №22.
11. Anisimov V.M., Grachev P.Y., Kudoyarov V.N. Starter – generators system with accumulation of kinetic energy. Proc. Of the 4-th Intern. Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems UEES'99. St. Petersburg, Russia, 21-24 June 1999, pp. 289-294.
12. А.с. 1568192 СССР, МКИ Н02 Р 6/02. Способ управления вентильной электрической машиной / П.Ю. Грачев, М.Л. Костырев, Ф.Н. Мягков. Оpubл. 1990, Бюл. №20.

Поступила 4.10.2004 г.