Ушков В.А., Лологаев М.-Б.С.

Векторное управление вентильным двигателем постоянного тока

Уфимский государственный авиационный технический университет
(Россия, Уфа)

doi: 10.18411/sr-10-06-2019-23

idsp: sciencerussia-10-06-2019-23

Аннотация

Рассмотрено понятие векторного управления и его применение к вентильному двигателю, координатные преобразования Кларка-Парка математическая модель вентильного двигателя.

Ключевые слова: вентильный двигатель постоянного тока, векторное управление.

Введение

Векторное управление – это метод управления синхронными и асинхронными двигателями, при котором формируются не только гармонические токи и напряжения фаз, но и обеспечивается управление магнитным потоком ротора, а именно, моментом на валу электродвигателя. Представляет собой метод управления преобразователем частоты, в котором токи статора трехфазного электродвигателя переменного тока идентифицируются как два ортогональных компонента, которые можно визуализировать с помощью вектора. Один из этих компонентов определяет магнитный поток двигателя, другой – крутящий момент.

Основной причиной появления векторного управления является то что асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) – самый массовый и дешевый в производстве двигатель, который применялся в нефтедобывающей отрасли, надежный и наименее требовательный в эксплуатации плохо поддается регулированию скорости. А в бурении нефтяных скважин требуется стабильно поддерживать определенную скорость. Регулирование скоростью осуществлялось ступенчато (от 2 до 5 ступеней) и требовало специальной системы управления, но их стоимость была гораздо выше. В связи с этим встал вопрос замены АДКЗ на более перспективные двигатели. Одним из таких двигателей является вентильный двигатель постоянного тока (ВДПТ). Но до недавнего времени применение данного типа двигателей было невозможным в нефтедобычи. С развитием технологий силовой электроники, теории управления двигателями, материалов с постоянными магнитами, интеллектуальных технологий управления и особенно технологий силовых переключателей дало возможность внедрения ВДПТ в различные отрасли производства в том числе и нефтедобыча. ВДПТ (англ. BLDC – Brushless Direct Current motor или PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor) широко используется в области станков с ЧПУ, роботов, сервоуправления и т.д.

Начиная с 2009 года крупные нефтяные компании стали экспериментально внедрять установки с вентильными электродвигателями в составе установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Одним из примеров таких компаний является ПАО «Газпром нефть».

В связи с этим сегодня актуальным вопросом является углубленный анализ эффективности применения вентильных двигателей, а также разработка принципов, методов, инженерных методик, алгоритмов и программ управления вентильными двигателями. Наиболее перспективным методом управления является векторное управление. Рассмотрим его поподробнее.

Векторное управление

Векторное управление (англ. FOC – Field-oriented control) – метод управления синхронными и асинхронными двигателями, при котором формируются не только гармонические токи (напряжения) фаз, но и обеспечивается управление магнитным потоком ротора, а именно, моментом на валу электродвигателя. Представляет собой метод управления преобразователем частоты, в котором токи статора трехфазного электродвигателя переменного тока идентифицируются как два ортогональных компонента, которые можно визуализировать с помощью вектора. Один из этих компонентов определяет магнитный поток двигателя, другой – крутящий момент. Система управления привода рассчитывает соответствующие эталонные составляющие тока из эталонных значений магнитного потока и крутящего момента. Обычно для поддержания измеренных компонентов тока на их эталонных значениях используются пропорционально – интегральные (PI) контроллеры. Векторное управление применяется в случае, когда в процессе эксплуатации нагрузка может меняться на одной и той же частоте, т.е. нет четкой зависимости между моментом нагрузки и скоростью вращения, а также в случаях, когда необходимо получить расширенный диапазон регулирования частоты при номинальных моментах.

Суть векторного управления в построении точной математической модели электродвигателя и управление ею – подачей частотно-модулируемого напряжения одновременно на все фазы двигателя, такой частоты и величины (для каждой из фаз эти параметры будут индивидуальны в каждый момент времени), чтобы создаваемый в обмотках статора синусоидальный ток обеспечивал вращение ротора в наиболее благоприятных с электрической точки зрения условиях: сдвиг фаз магнитных потоков ротора и статора близок к 90 градусам. Метод позволяет очень точно управлять электродвигателем

Системы векторного управления разделяются на два класса – это бездатчиковые и с обратной связью (с применением датчиков Холла). Область применения позволяет определить применение определенного метода. Применение бездатчиковых систем возможно, когда скорость изменяется не больше чем 1:100, а точность поддержания составляет не больше чем $\pm 0,5\%$. Когда требуется более широкий диапазон изменения скорости 1:1000 и большая точность $\pm 0,01\%$ соответственно принято использовать системы с обратной связью, то есть с применением датчиков положения ротора.

Векторное управление характеризуется высокой точностью, быстрым динамическим откликом и широким диапазоном скоростей, а в области малых частот вращение двигателя характеризуется плавностью, отсутствием рывков. Внимание привлекает обеспечение на валу при условии нулевой скорости номинального момента, если имеется датчик скорости. Регулировка скорости выполняется при достижении высокой точности. Все эти преимущества становятся важными на практике. **Координатные преобразования**

В процессе управления вентильным двигателем фактическим током в роторе является трехфазный переменный ток i_A , i_B , i_C , поэтому необходимо выполнить определенное преобразование, чтобы получить компоненты на оси d и q. Первым является преобразование из трехфазной стационарной координаты в двухфазную стационарную координату, а именно преобразование Кларка.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

Затем выполняется преобразование двухфазной стационарной координаты в синхронную вращающуюся координату, а именно преобразование Парка.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Математическая модель вентильного двигателя (ВД)

Математическая модель PMSM в dq системе координат, то есть в роторной системе координат.

Рисунок 1 – Структурная диаграмма векторного управления ВД

Уравнения напряжения:

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q + R_1 i_d \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} - \omega\psi_d + R_1 i_q \end{cases}$$

Уравнения потока ротора:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + L_{md} i_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases}$$

Уравнения электромагнитного момента:

$$T_{em} = p[L_{md} i_f i_q + (L_d - L_q) * i_d i_q]$$

Уравнение механического движения:

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} = T_{em} - T_L$$

В приведенных выше формулах u_d и u_q это компоненты напряжения статора на оси dq; i_d и i_q – составляющие тока статора на оси dq; ψ_d и ψ_q – компоненты потока ротора на оси dq; L_d и L_q – индуктивности обмотки статора на оси dq; R_1 – сопротивление статора; L_{md} – взаимная индуктивность между статором и ротором по оси d; i_f – эквивалентный ток возбуждения постоянного магнита; T_{em} – электромагнитный момент двигателя; T_L – момент нагрузки; J – момент инерции; p – количество пар полюсов ротора; ω – это электрическая угловая скорость ротора.

***

1. Скалярное и векторное управление в частотных преобразователях
http://tehpromcomplex.ru/metody_upravleniya_v_chastotnikax
2. Ю.Н. Калачев Векторное регулирование – заметки практика «ЭФО» 2013 –72 с.
3. Энергоэффективные УЭЦН с вентильными электродвигателями
<http://glavteh.ru/энергоэффективные-уэцн-вентильный/>

4. Синхронный двигатель с постоянными магнитами <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>
  5. Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Utilizing D-Q Transformation <http://scholarworks.csun.edu/bitstream/handle/10211.3/205143/Kadnekar-Vinayak-thesis-2018.pdf?sequence=1>
-