**Анализ систем векторного управления асинхронным двигателем**

Капустин Владимир Николаевич

Загурская Ирина Вячеславовна

Зелинский Виталий Евгеньевич

Институт сферы обслуживания и предпринимательства

(филиал) ДГТУ в г. Шахты

**Аннотация:** В статье приведен анализ современных систем векторного управления асинхронным двигателем; произведен анализ наблюдателей параметров привода для бездатчикового режима.

Из-за нелинейной и сложной математической модели асинхронного двигателя, он требует более сложных методов управления по сравнению с двигателями постоянного тока. Скалярный метод «V/f» способен обеспечивать управление скоростью, но этот метод не может обеспечить управление в реальном времени. Другими словами, реакция системы удовлетворительна только в устойчивом состоянии, а не во время переходных процессов. Динамические характеристики этого типа методов управления неудовлетворительны из-за эффекта насыщения и изменения электрических параметров электродвигателя с изменением температуры. Это приводит к чрезмерному потребляемому току и, как следствие, перегреву, что обуславливает необходимость увеличения габаритных размеров привода. Этот чрезмерный дизайн больше не делает двигатель экономичным из-за высокой стоимости производства [1].

Недавние разработки, связанные с уменьшением потерь и увеличением скорости переключениями полупроводниковых силовых ключей, внедрении быстрых и мощных цифровых сигнальных процессоров в программируемых логических контроллерах сделали передовые методы управления приводами индукционных машин доступными и реализуемыми. Благодаря схемам управления полем (FOC) [2, 3] асинхронные двигатели могут работать в режимах, аналогичных режимам двигателей постоянного тока с независимым возбуждением.

В принципе, управление полем (FOC) - это метод, основанный на векторных координатах. Термин «вектор» относится к методу управления, который управляет как амплитудой переменного тока, так и фазой напряжения возбуждения. Векторное управление используется для контроллеров, которые поддерживают 90-градусную пространственную ориентацию между двумя компонентами поля, которые являются векторами d и q системы координат с инвариантом во времени.

В асинхронном электродвигателе в случае FOC поток поля и магнитодвижущая сила генерируются и управляются отдельно на основе векторных преобразований координат. Этот подход приводит к структуре управления, аналогичной структуре управления приводом постоянного тока.

Управление полем используется в большинстве вариаций привода асинхронного двигателя. Оно позволяет получить высокие управляющие характеристики, но для этого требуется информация о положении ротора двигателя (угол поворота) и используется напряжение возбуждения переменного тока для текущего регулирования. Текущее регулирование обеспечивается передовыми методами управления с обратной связью, основанными на текущих измерениях напряжений возбуждения, подаваемых от инвертора источника напряжения (VSI). Угол поворота ротора можно измерить, используя датчик поворота вала (энкодер). Эта информация используется блоком управления полем. Однако, как было сказано выше, бездатчиковые алгоритмы управления устраняют необходимость в датчике положения вала.

Драйвера вентильно-индукторных приводов без датчика скорости являются привлекательными из-за низкой стоимости и высокой надежности. Поэтому методы оценки потока и скорости стали особенно актуальными для управления полем в последние годы. Основными преимуществами бездатчиковых асинхронных электродвигателей являются низкая стоимость, уменьшенные габаритные размеры, отсутствие проводного датчика и повышенная надежность.

Как было сказано, для осуществления векторного управления требуется определение положения потока ротора. Развились два основных подхода к определению угла положения потока ротора. Одним из них является прямая ориентация поля, которая зависит от прямого измерения или оценки величины и угла потока ротора. С точки зрения осуществимости, реализация прямого метода затруднена. Другая - ориентация косвенного поля, которая использует отношение скольжения при вычислении угла потока ротора относительно оси ротора.

Положение потока ротора можно оценить из конечных величин (напряжения и токи статора). Этот метод требует знания сопротивления статора наряду с утечкой статора, индуктивностью утечки ротора и индуктивностью намагничивания. Наблюдение потока через прямое включение напряжения статора называется Voltage Model Flux Observer (VMFO) и использует измеренное напряжение и ток статора. Прямая интеграция приводит к ошибкам из-за падения напряжения сопротивления статора и смещения интегратора. Поскольку падение напряжения на сопротивлении статора на высоких скоростях менее значимо по сравнению с падением напряжения статора при более низких скоростях, преобладает ошибка на низких скоростях. Кроме того, индуктивность утечки может существенно повлиять на производительность системы с точки зрения стабильности и динамического отклика.



Рисунок 1 - Входы и выходы наблюдателя потока модели напряжения (VMFO)

Текущая модель наблюдателя потока Flux Observer (CMFO) вводится в качестве альтернативного подхода для преодоления проблем, вызванных изменениями индуктивности утечки и сопротивления статора на низкой скорости. Текущие наблюдатели на основе модели используют измеренные токи статора и скорость ротора. Скоростная зависимость текущей модели является недостатком, поскольку это означает, что, хотя использование оцененного потока устраняет датчик потока, датчик положения по-прежнему используется.



Рисунок 2 - Входы и выходы наблюдателя потока

Существует несколько методов, обеспечивающих плавный переход между моделями наблюдателей потока и тока. Они объединяют две модели потока статора через сеть суммирования первого порядка [4]. Гладкий переход между моделями тока и напряжения регулируется регулятором потока ротора, который использует высокоскоростную CMFO на низких скоростях и VMFO.

Структуры наблюдателей VMFO и CMFO представляют собой схемы с разомкнутым контуром, основанные на модели индукционной машины, и они не используют обратной связи для коррекции выходов. Поэтому они довольно чувствительны к вариациям параметров.

Также возможна оценка потока через наблюдателей состояния с обратной связью. Устойчивость к несоответствиям параметров и шуму сигнала может быть улучшена за счет использования замкнутых наблюдателей для оценки переменных состояния. Тип наблюдателя зависит от модели асинхронной машины и ее параметров. В основном наблюдаемые состояния представляют собой поток ротора, токи статора и скорость вращения ротора. Полные наблюдатели состояния могут быть реализованы с использованием адаптивных методов оценки, которые значительно улучшают точность.

Наблюдатель скорости адаптивного потока представляет собой наблюдатель потока с замкнутым контуром, который вводится Kubota Corporation [5]. Добавление компенсатора ошибок к модели устанавливает наблюдателя с замкнутым контуром. Ошибка для тока модели асинхронного двигателя и измеренного тока используется для генерации корректирующих входов для динамической подсистемы статора и ротора.

Скорость вращения ротора также требуется для адаптивного наблюдателя; скорость ротора достигается через ПИ-регулятор, в первую очередь от текущей ошибки.



Рисунок 3 - Входы и выходы адаптивного наблюдателя скорости потока

Методы фильтрации Калмана с замкнутым контуром могут основываться на полной модели машины. Скорость вращения ротора рассматривается как переменная состояния, а модель асинхронного двигателя становится нелинейной, поэтому должен применяться расширенный фильтр Калмана. Корректирующие входы в динамические подсистемы статора, ротора и механической модели производятся так, что функция ошибки минимизируется. Функция ошибки оценивается на основе прогнозируемых переменных состояния, принимая во внимание шум в измеренных сигналах и отклонениях параметров. Статистический подход снижает чувствительность к ошибкам наблюдателя.

Для реализации векторного управления требуется определение положения потока ротора. Скорость вращения или положение ротора можно измерить с помощью датчика вала. Кроме того, положение ротора можно было бы определить, измеряя поток воздушного зазора с катушками, чувствительными к потоку.

Основными недостатками использования датчика скорости/положения являются высокая стоимость, сниженная надежность системы и особое внимание к шуму. Такие проблемы делают бездатчиковые драйвера достаточно популярными, хоть и сложными в реализации. Недавним трендом в управлении полем является отказ от использования датчиков скорости и использование алгоритмов на основе конечных автоматов для оценки потоков. В последние несколько лет были предложены различные решения для бездатчиковых приводов.

Основанный на знаниях или высокочастотный сигнал является одним из методов оценки потока и скорости. Способ, включающий модуляцию слотов ротора [6] приводит к заметному ротору, и значимость может быть отслежена путем введения сбалансированного трехфазного высокочастотного набора гармоник от инвертора. Альтернативным методом является использование выделения, вызванного магнитным насыщением [7]. Похожий метод представлен в [8]. Основное преимущество методов в [6], [7] и [8] заключается в том, что можно определить абсолютное положение ротора. Преимущество метода специализации заключается в том, что значимость не чувствительна к фактическим параметрам двигателя. Методы из [6], [7] и [8] работают также при нулевой скорости ротора. Однако требуется дополнительное аппаратное обеспечение, и вставка высокочастотного сигнала может вызвать крутящий момент, вибрацию и слышимый шум [9].

Скорость ротора можно оценить с помощью нелинейных наблюдателей. Альтернативно, скорость ротора можно рассматривать как параметр и оценивать с использованием рекурсивной идентификации, например [5]. Последний метод также может быть дополнен, чтобы включить оценку параметров машины (индуктивность, сопротивление и временные константы). Этим методам не нужно полагаться на гармоники или значимость, а требования к оборудованию такие же, как для цифровой реализации векторного управления, учитывая, что алгоритм оценки не слишком сложный. Их недостатком является то, что оценка скорости ротора будет неточной, если неизвестные параметры машины останутся неизвестными.

1. S. Campbell, H. A. Toliyat “DSP-based electromechanical motion control”, CRC Press, 2004
2. F. Blaschke, Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Drehfeldmachine. PhD thesis, TU Braunsdcweiq, 1974
3. K. Hasse, Zur Dynamik Drehzahlgeregelter Antriebe mit Stromrichtergespeisten Asynchron-Kurzschlusslaufermachinen. PhD thesis, TH Darmstadt, 1969.
4. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново,2008. – 297 с.
5. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями: учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла. – СПб., 2002.
6. PLC – это просто!! Векторное управление. – URL: <http://plc24.ru/vektornoe-upravlenie/> (дата обращения: 12.05.2018).
7. Ruaut Скалярное и векторное управление асинхронными двигателями, URL-http://ruaut.ru/content/publikacii/electro/skalyarnoe-i-vektornoe-upravlenie-asinkhronnymi-dvigatelyami.html/ (дата обращения: 05.05.2018).
8. Уланов Р.В., Шумяцкий В.М., Способы формирования напряжения в непосредственных преобразователях частоты
9. Зюзев А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В. Программно-аппаратный симулятор электропривода//Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS- технологии в энергетике .– Пермь :Изд -во Перм . нац . исслед . политехн . ун - та , 2013. – № 1. – С . 116–123.