

АНАЛИЗ СХЕМ ПИТАНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Инж. АЛЕКСАНДРОВСКИЙ С. В., канд. техн. наук, доц. ПЕТРЕНКО Ю. Н.

Белорусский национальный технический университет

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) являются надежными, простыми по конструкции и недорогими электрическими машинами, которые могут наравне конкурировать с асинхронными двигателями и синхронными двигателями с постоянными магнитами. К настоящему моменту в мировой практике накоплен большой опыт проектирования и применения ВИД мощностью от десятков ватт до 1000 кВт. ВИД находят все более широкое применение в опытном и серийном производстве благодаря повышенной надежности, простоте конструкции и технологичности. ВИД превосходит асинхронный электропривод по трудоемкости изготовления в 1,5–2,0 раза; имеет более высокое значение КПД (на 2–6 %).

При отсутствии постоянных магнитов в конструкции ротора питание фазных обмоток ВИД производится однополярными импульсами, что позволяет использовать более дешевые и надежные преобразователи, чем инверторы для машин переменного тока. Однако есть ряд специфических областей, где к электроприводу, и преобразователю в частности, предъявляются высокие требования. Эти требования приводят к усложнению схем преобразователей и как следствие – к увеличению стоимости всего электропривода в целом [1].

Каждый преобразователь для питания ВИД должен обеспечить три этапа цикла коммутации обмотки двигателя. На первом этапе к обмотке прикладывается максимальное напряжение для быстрого увеличения магнитного потока. На втором этапе происходит регулирование напряжения питания с целью поддержания магнитного потока (тока) на заданном уровне. На третьем этапе производится отключение обмотки с быстрым гашением магнитного поля во избежание возникновения тормозных моментов [2].

Несмотря на сходство в конструкции шаговые и вентильно-индукторные двигатели имеют некоторые различия. Использование традиционных методов анализа и синтеза, основанных на математическом аппарате структурных схем, применительно к вентильно-индукторному двигателю невозможно в связи с существенной нелинейностью магнитной цепи и тем, что противо-ЭДС является функцией не только скорости вращения ротора, но и функцией тока в обмотках статора. В связи с этим актуальна разработка математической модели, по которой можно производить расчеты электромагнитных процессов.

Вместе с тем, вентильно-индукторный привод имеет и ряд специфических особенностей, наиболее характерные из которых следующие:

- питание фазных обмоток однополярными импульсами;
- дискретный характер управления;
- изменение в широком диапазоне состояния магнитной системы;
- двусторонняя зубчатость магнитной системы двигателя.

В основу математического описания вентильно-индукторного двигателя могут быть положены уравнения электрического равновесия фаз двигателя и электромагнитного момента.

Уравнение электрических цепей, отражающее преобразование электрической энергии в магнитную, имеет вид

$$U_k = i_k R_k + \frac{d\Psi_k}{dt}, \quad (1)$$

где U_k – напряжение питания k -й фазной обмотки двигателя; i_k – ток k -й фазной обмотки; R_k – активное сопротивление k -й фазной обмотки; Ψ_k – потокосцепление k -й фазной обмотки.

Потокосцепление фазы является нелинейной функцией как тока фазы, так и углового положения ротора относительно статора, и определяется конфигурацией двигателя.

Энергия магнитного поля в вентильно-индукторном двигателе при отсутствии ее преобразования в механическую энергию (угол поворота ротора $\theta = \text{const}$) находится интегрированием

$$W_M = \int_0^{\Psi} i d\Psi. \quad (2)$$

Преобразование магнитной энергии в механическую без обмена энергией с источником питания происходит при постоянстве потокосцепления ($d\Psi/dt = 0$) и связано с изменением магнитной проводимости воздушного зазора в функции угла поворота ротора θ . Исходя из этого рассчитаем электромагнитный момент каждой фазы

$$M_k = - \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta W_{Mk}}{\Delta\theta} \right) = - \left. \frac{\partial W_{Mk}}{\partial\theta} \right|_{\Psi_k = \text{const}}. \quad (3)$$

Мгновенный электромагнитный момент вентильного индукторного привода определяется суммой моментов отдельных фаз, находящихся одновременно под током.

В настоящее время для коммутации обмоток ВИД разработано и применяется большое количество преобразователей. Многообразие решений по топологии схем питания обмоток ВИД объясняется двумя факторами:

- 1) стремлением улучшить электромагнитные процессы с целью получения требуемых электромеханических характеристик;
- 2) минимизацией затрат на компоненты схем (в основном транзисторы, диоды и конденсаторы).

Силовые преобразователи можно классифицировать на несколько групп. Среди них можно выделить четыре основные группы.

К первой группе относятся «классическая» полумостовая схема и ее модификации (рис. 1а). Классическая схема представляет собой полумостовой преобразователь с двумя транзисторами и двумя диодами, включенными по диагонали. В такой схеме при подаче управляющих импульсов на оба транзистора к обмотке прикладывается полное напряжение питания (режим P1), что позволяет увеличить величину тока и соответственно маг-

нитного потока. При подаче управляющего импульса на один из транзисторов обмотка оказывается замкнутой накоротко через ключ и обратный диод (режим P2). Чередование режимов P1 и P2 на втором этапе работы фазы позволяет поддерживать величину магнитного потока обмотки на заданном уровне с относительно небольшой частотой переключения ключей. При отсутствии управляющих импульсов на транзисторах к обмотке через обратные диоды прикладывается отрицательное напряжение (при условии, что до этого по обмотке протекал ток), что приводит к быстрому гашению магнитного поля [3].

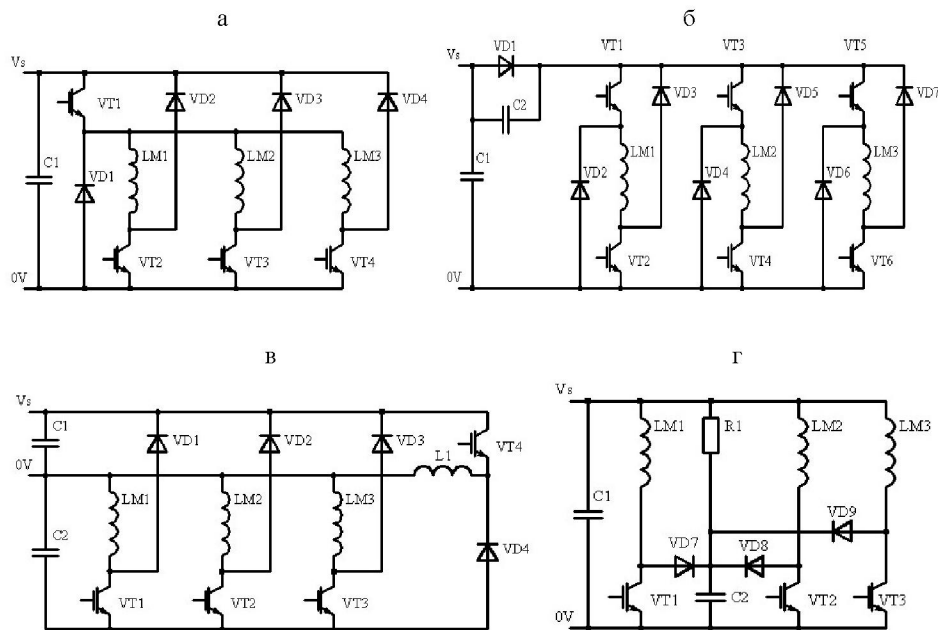


Рис. 1. Схемы питания обмоток вентильно-индукторного двигателя

В модификациях классической схемы один из ключей подключает две и более фаз, что уменьшает общее количество силовых транзисторов в преобразователе. Регулирование напряжения на обмотках производится за счет управления транзистором соответствующей обмотки. Так как в схеме питания имеется общий ключ на несколько фаз, то в некоторых конфигурациях ВИД, например 6/4, режим P2 не выполняется. Применение таких схем целесообразно в ВИД с числом фаз $m \geq 4$.

Ко второй группе относятся преобразователи с накоплением энергии. В данную группу входят преобразователи с магнитным и емкостным накоплением энергии (рис. 1б). В первом случае энергия поля обмотки фазы при отключении ее от источника в виде магнитного поля другой катушки магнитносвязанной с первой. Для этих целей в конструкции ВИД предусматривают наличие бифилярных или аксиальных обмоток. Наличие дополнительных обмоток приводит к усложнению конструкции двигателя и увеличению его стоимости. Поэтому такие электромеханические преобразователи не нашли широкого применения.

В преобразователях второй подгруппы энергия магнитного поля отключаемой обмотки накапливается в виде электрической энергии в дополнительных конденсаторах и используется в дальнейшем для быстрого уве-

личения тока включаемой обмотки. Это позволяет значительно улучшить электромагнитные переходные процессы, протекающие в ВИД. Отдача магнитной энергии в конденсаторы приводит к значительному повышению напряжения, что требует применения полупроводниковых приборов более высокого класса по напряжению. Различают схемы с параллельным и последовательным включением конденсаторов.

К третьей группе относятся преобразователи с дополнительным звеном постоянного тока, в качестве которого используются повышающие преобразователи напряжения (рис. 1в). Такие преобразователи позволяют регулировать величину напряжения в звене постоянного тока и обеспечивать оптимальные электромагнитные переходные процессы во всем диапазоне регулирования скорости ВИП при изменяющихся нагрузках на валу двигателя. Такие преобразователи находят применение в высокоскоростном электроприводе.

К четвертой группе относятся преобразователи, в которых энергия магнитного поля отключаемой фазы не возвращается в источник, а рассеивается в виде теплоты на гасящем сопротивлении и/или обмотке (рис. 1г). Эти схемы являются самыми простыми и дешевыми. Но вместе с этим они обладают и самым низким значением КПД.

На основании выражений (1)–(3), уравнения движения электропривода и схем преобразователей (рис. 1) разработана имитационная модель вентильно-индукторного электропривода [4, 5]. По полученной модели произведены расчеты переходных процессов тока и момента при работе привода с максимально допустимой нагрузкой с номинальной частотой вращения. В этом случае время коммутации фазы сопоставимо с электромагнитной постоянной времени, что важно при формировании импульса тока фазы. Результат расчета в виде графиков тока и момента для схемы, изображенной на рис. 1а, представлен на рис. 2.

При анализе работы схем питания в качестве эталона примем график тока «классического» преобразователя (рис. 2).

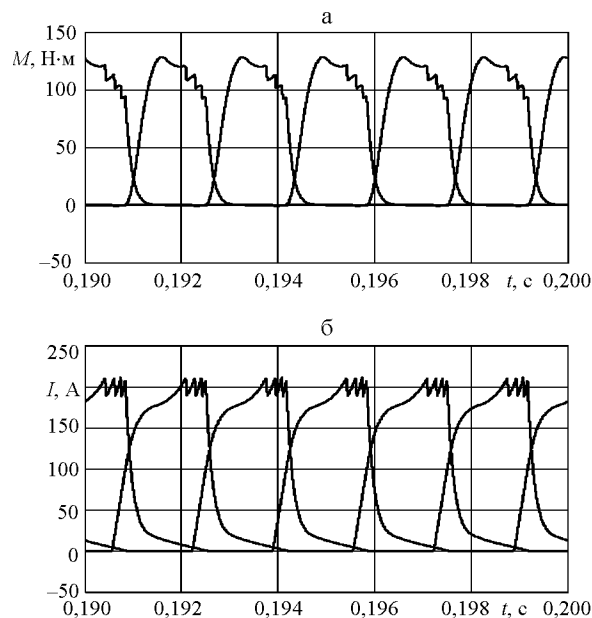


Рис. 2. Графики электромагнитных процессов в обмотке ВИД:
а – электромагнитный момент; б – ток

Наличие дополнительного конденсатора в цепи постоянного тока существенного прироста скорости нарастания тока и момента не дает. В то же время и значительного повышения напряжения в звене постоянного тока также не наблюдается. Так, в схеме с последовательным включением конденсаторов увеличение напряжения по сравнению с номинальным значением составило 10–15 %, а с параллельным – 6–12 %. Такая ситуация может быть обусловлена тем, что энергия отключаемой фазы передается как в накопительный конденсатор, так и в обмотку включаемой фазы.

При повышении напряжения постоянного тока на 20 %, как и следовало ожидать, ток достигает заданного значения значительно раньше, чем в эталонной модели. Исходя из этого можно заключить, что схемы с повышающим преобразователем напряжения целесообразно применять в тех случаях, когда требуется регулирование скорости вверх от номинальной.

Применение гасящего сопротивления приводит к тому, что ток отключаемой фазы не спадает до нуля. Это приводит к наличию небольшого тормозного момента, который уменьшает общий момент двигателя. При этом чем меньше величина сопротивления реостата, тем больший ток протекает по обмотке.

ВЫВОД

Выбор конкретного типа преобразователя для питания ВИД производится в результате комплексного подхода в зависимости от параметров двигателя (число фаз, номинальная скорость и мощность) и условий эксплуатации электропривода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stefanovic, V. R. SRM inverter topologies: A comparative evaluation / V. R. Stefanovic, S. Vukosavic // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1991. – Vol. 27, No. 6. – P. 1034–1047.
2. Бычков, М. Г. Оптимизация режимов вентильно-индукторного электропривода средствами управления / М. Г. Бычков // Вестник МЭИ. – 1998. – № 6. – С. 73–81.
3. Остриров, В. Н. Сравнительный анализ схем силовых преобразователей для вентильно-индукторного электропривода массового применения / В. Н. Остриров, С. Ю. Уткин // Приводная техника. – 2000. – № 4. – С. 44–50.
4. Александровский, С. В. Формирование электромагнитных процессов в вентильно-индукторном электроприводе / С. В. Александровский, Ю. Н. Петренко // Современные методы проектирования машин: в 7 т. – Т. 6: Автоматизация проектирования и информационные технологии. – Минск, 2004. – Вып. 2. – С. 145–148.
5. Александровский, С. В. Математическое моделирование вентильно-индукторного привода / С. В. Александровский, Ю. Н. Петренко // Информационные технологии в промышленности: тез. докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–24 окт. 2008 г.: ОИПИ НАН Беларуси; редкол.: Е. В. Владимиров [и др.]. – Минск, 2008. – С. 93–94.

Представлена кафедрой
электропривода и автоматизации
промышленных установок
и технологических комплексов

Поступила 20.05.2010