

А.В. ТАРНЕЦКАЯ, аспирант (КузГТУ)
И.Ю. СЕМЫКИНА, д.т.н., доцент (КузГТУ)
г. Кемерово

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПУСКА СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Многие научно-практические исследования синхронных машин с постоянными магнитами (СДМП) свидетельствуют о том, что СДМП в сравнении с высокоэффективными асинхронными машинами при тех же или даже малых размерах в среднем имеет больший на 2-3% КПД. Поскольку магнитная проницаемость стали ротора гораздо выше, чем магнитная проницаемость постоянных магнитов, можно считать, что насыщение машины зависит только от постоянных магнитов. На рисунке 1 изображены результаты расчет магнитного поля четырехполюсного СДМП с номинальным моментом $M_n = 170$ Н·м при нагрузке и на холостом ходу [1], из которых видно, что насыщение практически не зависит от режима работы, магнитный поток машины является постоянным, и его конфигурация определяется воздушным зазором, вследствие чего можно пренебречь нелинейностью магнитной цепи, так как индуктивности статорных обмоток не зависят от величины и знака, протекающего в них тока. Потери на насыщение также не учитываются.

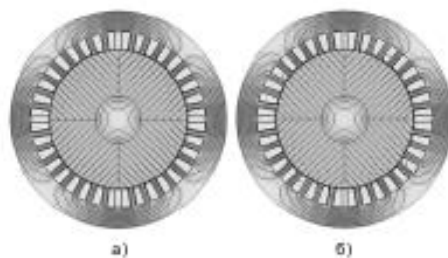


Рис. 1. Магнитное поле СДМП при нагрузке (а)
и на холостом ходу (б)

Основная проблема компьютерного моделирования СДМП заключается в моделировании процессов пуска двигателя, во-первых, из-за реальных трудностей с реализацией пуска синхронных машин (в последнее время эта проблема решается наличием частотных преобразователей, способных осуществить плавный разгон синхронной машины без установки на вал дополнительного двигателя), а, во-вторых, из-за наличия постоянных магнитов. Из-за насыщения и высокой коэрцитивной силы постоянных

магнитов СДМП обладает большой ЭДС остаточной намагниченности электрической машины E_0 , поэтому при пуске и коротком замыкании возникает большой пусковой ток якоря I_a , который рассчитывается следующим образом:

$$I_a = \frac{U + E_0}{x_d},$$

где U – напряжение сети; x_d – собственная индуктивность СДМП вдоль поперечной оси статора.

Большие значения пусковых токов не только приводят к существенному нагреву машины и вероятности аварийного режима при эксплуатации; другим следствием является значительная реакция якоря, обладающая таким размагничивающим действием, что при пуске СДМП постоянные магниты могут практически полностью потерять свои магнитные свойства. Максимальное размагничивание имеет место тогда, когда ротор, вращаясь со скоростью близкой к синхронной, находится под углом относительно статора, равным $\theta = 180^\circ$. Реакцию якоря СДМП при пуске компенсируют с помощью уменьшения расстояния между наконечниками полюсов ротора – таким образом, магнитный поток реакции якоря замыкается не через постоянные магниты, а через полюсные наконечники. Также для осуществления пуска на полюса устанавливаются демпферные обмотки в виде короткозамкнутых «беличьих клеток» на полюсные наконечники [3].

Из-за неодинаковости магнитного сопротивления постоянных магнитов при их различном положении относительного обмоток статора, на низких скоростях и при разгоне СДМП возникает дополнительный реактивный тормозной момент M_T , что является причиной неравномерного вращения вала, повышенного момента «трогания» при пуске. При разгоне СДМП поток постоянных магнитов наводит в обмотке статора ЭДС с частотой $f = f_1(1 - s)$, которая индуцирует токи, замыкающиеся через сети и создающие потери. Эти потери покрываются механической мощностью P_T , подводимой к ротору двигателя, а сам реактивный тормозной момент при скорости вращения ротора ω_1 рассчитывается следующим образом:

$$M_T = \frac{P_T}{\omega_1(1 - s)}.$$

Полезный пусковой момент M_{Π} СДМП вычисляется как:

$$M_{\Pi} = M - M_T,$$

где M – асинхронный момент машины.

При угле поворота ротора $0^\circ < \theta < 90^\circ$ реактивная составляющая тормозного момента уменьшает полезный пусковой момент, а при значении угла $90^\circ < \theta < 180^\circ$ – увеличивает, что приводит к эффекту «залипания» ротора в магнитном поле и ухудшении пусковых процессов [4].

Таким образом, в СДМП индуктивности и потокосцепления зависят не от электрических величин, а являются функциями от θ , с определением которого связаны определенные трудности при работе СДМП (наличие энкодера/датчика положения и специального микроконтроллера) и при пуске, поскольку пусковые характеристики напрямую зависят от положения ротора в пространстве.

Непостоянство и нелинейность индуктивностей СДМП, а также сложность в их идентификации создает определенные сложности при моделировании динамических режимов синхронного двигателя.

Из-за отсутствия на роторе синхронного двигателя обмоток возбуждения невозможно осуществить его асинхронный пуск, поэтому единственный возможный вариант – это частотный пуск СДМП с помощью автономного инвертора и плавного нарастания частоты. Необходимо тщательно проработать задание частоты, поскольку при повышенной частоте СДМП будет выпадать из синхронизма, а слишком медленное повышение приведет к «залипанию» ротора и снижению быстродействия электропривода в целом. Также из-за отсутствия обмотки на роторе управление СДМП с помощью регулирования угловой скорости ротора и угла поворота ротора не представляется возможным, поэтому в настоящее время рассматриваются различные варианты частотного пуска без их контроля, что значительно усложняет математическую модель и требует высокой точности в определении всех остальных параметров машины, а также тщательного исследования критериев устойчивости.

Так, например, в [2] рассмотрен равноускоренный частотный пуск СДМП, где в качестве контролируемого параметра выступает разница между углом поворота ротора и вращающимся полем статора. При этом крайне важным является начальное положение ротора и угол отставания ротора от поля статора. Математическая модель при равноускоренном пуске выглядит следующим образом:

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = M_m \sin(p(\theta - \varphi)) - M_n,$$

где J – момент инерции СДМП; M_m – максимальный синхронизирующий момент двигателя; M_n – момент нагрузки; p – число пар полюсов явнополюсной машины; φ – угол поворота вращающегося поля статора.

Для равноускоренного разгона необходимо обеспечить постоянную составляющую синхронизирующего момента двигателя, для чего нужно

обеспечить постоянный угол отставания между углом поворота ротора и углом поворота поля статора.

Очевидно, что при большом угле отставания между θ и φ решение уравнения выше становится приближенным, и точность моделирования затрудняется. При пуске системы, когда поле статора начинает вращаться, угол отставания и скорость его изменения увеличиваются до тех пор, пока частота инвертора не достигает максимального заданного значения. В момент равенства скоростей вращения ротора и поля статора угол отставания перестает расти и начинает уменьшаться. Разгон СДМП сопровождается постоянными колебаниями ускорения, которые являются причиной собственных физических колебаний двигателя и накладываются на синхронизирующий момент. Для компенсации этих колебаний необходимо создать небольшой начальный угол опережения поля статора.

При большом начальном опережении угла поворота ротора поля статора пуск СДМП становится невозможен. Это объясняется тем, что начальное вращение ротора направление в противоположную сторону вращению поля статора, и угол отставания увеличивается еще быстрее, т.о. $\sin(p(\theta - \varphi))$ стремится к нулю.

В итоге, моделирование пуска СДМП затрудняется тем, что управляющая обмотка на роторе отсутствует, что делает невозможным контроль угловой скорости и угла поворота ротора. Из-за высокой коэрцитивной силы магнитов при разгоне на малых скоростях возникает реактивный тормозной момент и эффект «залипания» ротора в поле статора, что приводит к дополнительным колебаниям и выходу системы СДМП из устойчивого состояния. Также пуск двигателя зависит от начальных условий и угла отставания ротора относительно поля статора, и плавного нарастания частоты.

Чтобы адекватно промоделировать пуск СДМП необходимо учесть следующие факторы:

- начальное положение ротора в зависимости от пуска под нагрузкой или на холостом ходу;
- зависимость индуктивностей от положения ротора в поле статора;
- значительную реакцию якоря и наличие тормозящего реактивного момента.

Список литературы:

1. Мартынов, В.А. Математическое моделирование режимов работы многофазных синхронных двигателей с постоянными магнитами: Руководство для практических расчетов / В.А. Мартынов, А.Н. Голубев, А.В. Алейников// Вестник ИГЭУ, 2013. – №2.

2. Коршунов, А.И. Равноускоренный частотный пуск синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе / А.И. Коршунов // Силовая электроника, 2007. – №1.

3. Вольдек, А.И. Электрические машины. Машины переменного тока / А.И. Вольдек, В.В. Попов // Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2008. – 350 с.:

4. Журавлев, С.В. Линейные синхронные двигатели с редкоземельными постоянными магнитами : Дис. д-ра тех.наук / С.В. Журавлев. – М.: Мос. авиа. институт, 2005.