

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Митрофанов С.В., Веремеев А.А.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

При выполнении проектирования, исследования и эксплуатации электрических двигателей зачастую встает вопрос о расчетах переходных процессов. Возможность прогнозирования процессов в асинхронных двигателях при пуске, при неодновременном включении фаз двигателей под напряжением сети, быстром переключении питания и реверсе, и ряд других показателей имеют большое практическое значение, так как эти машины широко распространены и применимы в промышленности. Повседневное использование и огромный спрос двигателей в системах автоматики также требует серьезного внимания к их динамическим характеристикам[1].

На сегодняшний день расчету и моделированию асинхронных машин в фазных системах координатах уделено недостаточно много внимания. Развитие компьютерной техники дало возможность рассчитывать переходные процессы в естественной системе координат. На более ранних этапах из-за большого числа решаемых дифференциальных уравнений и из-за появления периодических коэффициентов в уравнениях связи осуществляли переход от естественной системы координат к преобразованным системам координат (координаты (α, β) , координаты (x, y) координаты (d, q) , координаты (u, v)). Преимущество преобразованных координат заключалось не только в уменьшении числа дифференциальных уравнений, в упрощении уравнений связи между потокосцеплениями и токами, но и в упрощении уравнения электромагнитного момента. Проблемой моделирования уравнения движения в фазной системе координат является число слагаемых в уравнении для электромагнитного момента, которое равно числу решаемых дифференциальных уравнений. Каждое слагаемое – это произведение соответствующих токов на соответствующие потокосцепления. Это усложняет моделирование АМ в фазной системе координат. Эту трудность можно преодолеть, используя мощную адаптированную к таким задачам компьютерную технику.

На сегодняшний день программное обеспечение, которое могло бы помочь для реализации данной задачи можно разделить на два типа:

- специализированное ПО основанное на преобразованных системах координат для асинхронных машин с короткозамкнутым ротором и для асинхронных машин с фазным ротором (например MatLab Simulink);
- специализированное ПО основанное на методах конечных элементов (Femm, ELCUT, Ansys, Femlab Matlab, Flux 2D, Maxwell);
- специализированное ПО для разнообразных инженерных расчетов (MathCad);
- алгоритмические языки объектно-ориентированного программирования (Delphi).

Для решения наших задач можно воспользоваться всеми этими видами ПО. Для начала, при решении поставленного вопроса, необходимо решить задачу аналитическим и численным методами. Затем сравним результаты расчета, уточним математическую модель аналитического расчета и проверим её сходимость с численным методом. После этого можно провести эксперимент на физическом объекте.

Планируется для решения задачи расчета переходного процесса, возникающего в асинхронной машине воспользоваться системой MathCad и его мощным инструментом символьной математики Symbolics. Инструмент символьной математики будут применяться для вывода и упрощения формулы электромагнитного момента.

После решения системы дифференциальных уравнений эту же задачу планируется решить, используя пакет программного обеспечения MatLab Simulink. Для оценки полученных результатов и их достоверности и правдивости, необходимо будет сравнить, результаты рассчитанной математической модели.

Для начала анализа моделирования фазной системы координат рассмотрим дифференциальные уравнения для асинхронных машин с фазным ротором. С точки зрения теории асинхронных машин с фазным ротором проще моделируется, чем асинхронные машины с короткозамкнутым ротором. Число решаемых дифференциальных уравнений равно $m_s + m_r + 1$. Где m_s - число фаз статора, m_r - число фаз ротора. Кроме дифференциальных уравнений для фаз статора и ротора решается дифференциальное уравнение движения. Сложность моделирования уравнения движения заключается в записи уравнения для электромагнитного момента. Число слагаемых в уравнении для электромагнитного момента на первый взгляд будет равно $m_s + m_r$ (позже мы докажем, что это не так!!!!). При этом каждое слагаемое будет представлять собой произведение соответствующих токов на соответствующие потокосцепления. Число дифференциальных уравнений АМ с короткозамкнутым ротором равно $m_s + Z_r + 1$. Соответственно число слагаемых в уравнении для электромагнитного момента будет равно $m_s + Z_r$ [2].

Возможно представить систему дифференциальных уравнений однофазного асинхронного двигателя с общей несимметрией статора в системе координат в системе координат α, β и в относительных единицах следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{\alpha}}{dr} = u_{\alpha} \cdot \sin(\tau + \varphi_0) - r_{\alpha} \cdot i_{\alpha} \\ \frac{d\psi_{\beta}}{dr} = u_{\beta} \cdot \sin(\tau + \varphi_0) - r_{\beta} \cdot i_{\beta} \\ \frac{d\psi_{\beta\alpha}}{dr} = u_{\beta\alpha} \cdot \sin(\tau + \varphi_0) - r_{\beta} \cdot i_{\beta\alpha} \\ \frac{d\psi_{\alpha\beta}}{dr} = u_{\alpha\beta} \cdot \sin(\tau + \varphi_0) - r_{\alpha} \cdot i_{\alpha\beta} \\ \frac{d\psi_{\beta}}{dr} = u_{\beta} \cdot \sin(\tau + \varphi_0) - r_{\beta} \cdot i_{\beta} \\ \frac{d\omega}{dr} = \frac{1}{H} \cdot (M_{\beta\alpha} - M_{\alpha\beta}) \end{cases}, \quad (1)$$

где

$$M_{\beta\alpha} = x_m \cdot [i_{\alpha} \cdot i_{\beta\alpha} + i_{\beta} \cdot (i_{\beta\alpha} \cdot \cos(\theta) - i_{\alpha\beta} \cdot \sin(\theta))], \quad (2)$$

Связь между токами обмоток и потокосцеплениями устанавливается уравнениями:

$$\begin{cases} \psi_{\alpha} = x_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + x_m \cdot i_{\beta\alpha} + x_m \cdot \cos(\theta) \cdot i_{\beta} \\ \psi_{\beta} = x_{\beta} \cdot i_{\beta} + x_m \cdot [i_{\alpha\beta} \cdot \cos(\theta) + i_{\beta\alpha} \cdot \sin(\theta) + x_m \cdot \cos(\theta) \cdot i_{\alpha}] \\ \psi_{\beta\alpha} = x_{\beta} \cdot i_{\beta\alpha} + x_m \cdot \cos(\theta) \cdot i_{\alpha} + x_m \cdot i_{\alpha} \\ \psi_{\alpha\beta} = x_{\alpha} \cdot i_{\alpha\beta} + x_m \cdot \sin(\theta) \cdot i_{\beta} \end{cases}, \quad (3)$$

Рассмотрим дифференциальные уравнения асинхронной машины с фазным ротором, у которой обмотка ротора приведена к обмотке статора. В этом случае индуктивность взаимной индукции между обмоткой статора и обмоткой ротора и взаимная индуктивность между обмоткой ротора и обмоткой статора будут равны ($M_{1,2} = M_{2,1} = M$). Можно рассмотреть дифференциальные уравнения асинхронной машины и с не приведенной обмоткой ротора.

Дифференциальные уравнения для обмотки статора:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1A} = r_{1A} \cdot i_{1A} + \frac{d\Psi_{1A}}{dt} \\ \dot{U}_{1B} = r_{1B} \cdot i_{1B} + \frac{d\Psi_{1B}}{dt} \\ U_{1C} = r_{1C} \cdot i_{1C} + \frac{d\Psi_{1C}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

где $\dot{U}_{1A}, \dot{U}_{1B}, \dot{U}_{1C}$ - фазные напряжения, подаваемые на зажимы обмотки;

$r'_{1A}, r'_{1B}, r'_{1C}$ - активные сопротивления обмоток статора;

i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} - токи в фазах обмотки статора;

$\Psi_{1A}, \Psi_{1B}, \Psi_{1C}$ - полные потокосцепления фаз обмотки статора.

Дифференциальные уравнения для обмотки ротора:

$$\begin{cases} 0 = -(r'_{2a} + R'_{2a}) \cdot i'_{2a} + \frac{d\Psi_{2a}}{dt} \\ 0 = -(r'_{2b} + R'_{2b}) \cdot i'_{2b} + \frac{d\Psi_{2b}}{dt} \\ 0 = -(r'_{2c} + R'_{2c}) \cdot i'_{2c} + \frac{d\Psi_{2c}}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

$r'_{2a}, r'_{2b}, r'_{2c}$ - приведенные к обмотке статора активные сопротивления обмоток ротора;

$R'_{2a}, R'_{2b}, R'_{2c}$ - приведенные к обмотке статора пусковые активные сопротивления, включаемые в фазы обмотки ротора;

$i'_{2a}, i'_{2b}, i'_{2c}$ - токи в фазах обмотки ротора;

$\Psi_{2a}, \Psi_{2b}, \Psi_{2c}$ - полные потокосцепления фаз обмотки ротора.

Уравнения связи между токами и потокосцеплениями можно записать:

$$\begin{cases} \Psi_{1A} = \Psi_{AA} + \Psi_{AB} + \Psi_{AC} + \Psi_{Aa} + \Psi_{Ab} + \Psi_{Ac} \\ \Psi_{1B} = \Psi_{BA} + \Psi_{BB} + \Psi_{BC} + \Psi_{Ba} + \Psi_{Bb} + \Psi_{Bc} \\ \Psi_{1C} = \Psi_{CA} + \Psi_{CB} + \Psi_{CC} + \Psi_{Ca} + \Psi_{Cb} + \Psi_{Cc} \\ \Psi_{2a} = \Psi_{aA} + \Psi_{aB} + \Psi_{aC} + \Psi_{aa} + \Psi_{ab} + \Psi_{ac} \\ \Psi_{2b} = \Psi_{bA} + \Psi_{bB} + \Psi_{bC} + \Psi_{ba} + \Psi_{bb} + \Psi_{bc} \\ \Psi_{2c} = \Psi_{cA} + \Psi_{cB} + \Psi_{cC} + \Psi_{ca} + \Psi_{cb} + \Psi_{cc} \end{cases} \quad (6)$$

где Ψ_{AA} - собственное потокосцепление фазы А статора;

Ψ_{AB} - взаимное потокосцепление между фазой А статора и фазой В статора;

Ψ_{AC} - взаимное потокосцепление между фазой А статора и фазой С статора;

Ψ_{Aa} - взаимное потокосцепление между фазой А статора и фазой а ротора;

Ψ_{Ab} - взаимное потокосцепление между фазой А статора и фазой b ротора;

Ψ_{Ac} - взаимное потокосцепление между фазой А статора и фазой с ротора.

Аналогично могут быть представлены и остальные потокосцепления в системе уравнений (6).

Приведем подробно расчетные формулы для потокосцеплений в уравнении (6).

Учет насыщения магнитопровода статора и ротора при пуске можно учесть через ток намагничивания в уравнениях связи токов и потокосцеплений. Насыщение путей потоков рассеяния и эффект вытеснения токов в стержнях ротора можно учесть через активное сопротивление ротора и индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, так как в дифференциальных уравнениях они будут записаны независимо. В преобразованных координатах это сделать проблематично.

Достоинством моделирования АМ с короткозамкнутым ротором в фазной системе координат заключается в том, что с помощью данной системы координат можно рассмотреть несимметричные и неисправные АМ работающие в переходных режимах. В известных статьях по проблемам моделирования переходных процессов в преобразованных системах координат попытки учесть электрическую несимметрию приводило к возрастанию числа решаемых дифференциальных уравнений, сравнимого с числом дифференциальных уравнений в фазной системе координат. При этом для перехода к преобразованным системам координат вводятся допущения, которые приводят к большим погрешностям в расчетах.

К рассмотрению принимаются дифференциальные уравнения асинхронной машины с фазным ротором

Для построения и расчета математической модели несимметричных асинхронных двигателей (АД) в качестве наиболее удобного примера, который возможно использовать для рассмотрения общего случая рассмотрим однофазный асинхронный двигатель (ОАД) с общей несимметрией статора, которая отображается, как не в несимметрия или неравенство параметров фаз статора, в отличии от угла между осями обмоток статора от $2\pi/m$ электрических радиан, неравенстве числа витков фаз статора.

С течением времени картина переходного процесса электромагнитного поля не остается постоянной, а вместе с ней будут принимать иные значения параметры схемы замещения. В несимметричных ОАД малой мощности значимое влияние, оказывает насыщение магнитной цепи, на изменение параметров электрической машины. Насыщение магнитной цепи следует учитывать во всех типах несимметричных АД.

Возможность использования математического моделирования на этапах изготовления макетных и опытных образцов и проектирования позволяет разработчику уже на этих стадиях рассматривать динамику машины, оценивать ее пусковые и эксплуатационные свойства, что в значительной степени снижает затраты на макетное моделирование и сокращает срок разработки. Разрабатывая и просчитывая модель несимметричного асинхронного двигателя

дает возможность для изучения и оптимизации сложных нелинейных процессов, исследование которых традиционными способами затруднено или невозможно[3].

Список литературы

- 1. Тонн Д.А. Квазиустановившиеся переходные процессы несимметричных асинхронных двигателей, работающих от однофазной сети: Автореферат дис. Канд. Техн. Наук./ Тонн А.Д. – Воронеж: ВГТУ, 2004 – 17 с.*
- 2. Митрофанов С.В., Никиян Н.Г., Сурков Д.В. Дифференциальные уравнения асинхронной машины в фазной системе координат: Всероссийская научно-практическая конференция «Интеграция науки и практики в профессиональном развитии педагога»- . – Оренбург, ИПК ГОУ ОГУ, 2010. – Секция “Современные технологии в электротехнике, электромеханике, электроэнергетике”- с. 2583–2594.*
- 3. Сергеев Д.Н. Моделирование асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором для механизма подъёма (опускания) электромостового крана // Современная техника и технологии. 2013. № 5*