

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С МНОГОФАЗНОЙ ДРОБНОЙ ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ

Пантелеев С.В., Малашин А.Н., Степанов А.А.
Военная академия Республики Беларусь

Аннотация:

Существующими методами определения индуктивных параметров электрических машин, которые учитывают высшие пространственные гармоники магнитного поля в воздушном зазоре, геометрические параметры магнитной системы, распределение фазных обмоток независимо от числа фаз, являются: метод гармонических проводимостей, метод проводимостей зубцовых контуров, метод интегральных уравнений. Но использование таких подходов в процессе оптимизации синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками (СЭМ с ДЗО) с различными соотношениями чисел зубцов на полюс и фазу является слишком трудоемким.

Текст доклада:

Наличие корректной информации об индуктивных параметрах электрической машины необходимо как для разработки адекватной математической модели СЭМ с ДЗО, так и для решения задач синтеза систем управления. Поэтому разработка удобного для процесса оптимизации электрической машины способа определения собственных и взаимных индуктивностей многофазных СЭМ с ДЗО, который учитывает несинусоидальное распределение фазных обмоток в пазах магнитопровода статора и спектр пространственных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре, является актуальной задачей.

Для моделирования влияния схемы и параметров обмотки на вращающееся магнитное поле в воздушном зазоре электрической машины используется пространственная обмоточная функция (ПОФ) $Q_n(\phi_s)$. Гармонический состав ПОФ определяет: характер распределения МДС обмотки вдоль воздушного зазора; фильтрующие свойства обмотки как источника ЭДС по отношению к высшим пространственным гармоникам магнитного поля; индуктивные параметры электрической машины.

Производная пространственной обмоточной функции определяет функцию распределения обмотки (ФРО) $D_n(\phi_s)$.

Функция распределения обмотки непрерывна, однако с учетом того, что при увеличении числа фаз m увеличивается число пазов магнитопровода статора z_1 , можно принять допущение о дискретном характере функции распределения и использовать дискретную модель многофазной обмотки электрической машины. Основой для разработки дискретной модели обмотки электрической машины в матричном виде является введение двух матриц: матрицы функции распределения обмотки и матрицы пространственной обмоточной функции:

$$[D] = (d_{kn}) = (\bar{d}_0 \quad \dots \quad \bar{d}_n \quad \dots \quad \bar{d}_{m-1}), \quad k \in [0, z_1 - 1], \quad n \in [0, m - 1], \quad (1)$$

$$[W] = (w_{kn}) = (\bar{w}_0 \quad \dots \quad \bar{w}_n \quad \dots \quad \bar{w}_{m-1}), \quad k \in [0, z_1 - 1], \quad n \in [0, m - 1], \quad (2)$$

где d_{kn} – доля проводников пазы статора k , которая принадлежит фазе n ; \bar{d}_n – вектор распределения обмотки фазы n ; w_{kn} – дискретное значение ПОФ фазы n справа от пазы статора с номером k ; \bar{w}_n – вектор-столбец дискретных значений ПОФ фазы n .

В матрице ФРО (1) компонент k вектора n соответствует дискретному значению функции распределения в пазу статора с номером k . При условии протекания постоянного тока в фазных обмотках, проводники в пазу статора с положительным направлением тока являются прямыми, а

с отрицательным направлением тока – обратными. С учетом этого d_{kn} могут принимать следующие значения: $d_{kn} \in (0,1]$, если это доля прямых проводников; $d_{kn} \in [-1,0)$, если это доля обратных проводников.

Выражение дискретного интегрирования (3) позволяет определить компоненты матрицы пространственной обмоточной функции из матрицы функции распределения обмотки:

$$w_{k,n} = \sum_{g=0}^k d_{g,n} - \frac{1}{z_1} \sum_{j=0}^{z_1-1} \sum_{h=0}^j d_{h,n}, \quad k \in [0 \dots z_1 - 1], n \in [0 \dots m - 1], \quad (3)$$

где $g, j, h \in Z$ – переменные.

На основе известных значений компонентов матриц ФРО и ПОФ можно представить функцию распределения обмотки $D_n(\phi_s)$ и пространственную обмоточную функцию $Q_n(\phi_s)$ для фазы n в дискретной форме:

$$D_n(\phi_s) = \frac{W_{z_1}}{R_s \sigma_s} \sum_{k=0}^{z_1-1} d_{kn} S_{\sigma_s} \left(\phi_s - \frac{\pi}{z_1} - k \frac{2\pi}{z_1} \right), \quad (4)$$

$$Q_n(\phi_s) \approx W_{z_1} \sum_{k=0}^{z_1-1} w_{kn} S_{\tau} \left(\phi_s - k \frac{2\pi}{z_1} \right), \quad (5)$$

где W_{z_1} – количество проводников внутри паза статора (принято равным для всех пазов статора); σ_s – величина открытия паза магнитопровода статора; S_{σ_s} – функция открытия паза магнитопровода статора; $\tau = 2\pi/z_1$ – величина зубцового (пазового) деления статора; S_{τ} – функция зубцового (пазового) деления статора; ϕ_s – угол между началом отсчета и рассматриваемой точкой на статоре; R_s – радиус магнитопровода статора у воздушного зазора.

Выражения (4) и (5) представляют собой аналитическую модель многофазной зубцовой обмотки, которая позволяет с высокой достоверностью определить влияние схемы и параметров обмотки на индуктивные параметры электрической машины при наименьших временных затратах.

С использованием данной модели разработан способ определения индуктивных параметров синхронной электрической машины с многофазной дробной зубцовой обмоткой, который позволяет учесть высшие гармоники индукции магнитного поля в воздушном зазоре и несинусоидальный закон изменения пространственных обмоточных функций.

Проверку адекватности аналитических выражений для определения индуктивных параметров электрической машины корректно проводить в сравнении с результатами расчета посредством магнитостатической векторной модели магнитного поля электрической машины. Расчет значений собственных и взаимных индуктивностей статора рассмотрен на примере девятифазной синхронной электрической машины с двухслойной дробной зубцовой обмоткой с числом пазов на полюс и фазу $q = 2/17$ [1].

В таблице 1 приведены результаты расчета собственных и взаимных индуктивностей статора электрической машины посредством аналитического метода и численного метода конечных элементов.

Таблица 1. – Результаты расчета индуктивностей статора СЭМ с ДЗО

Метод	L_0 , мГн	M_1 , мГн	M_2 , мГн	M_3 , мГн	M_4 , мГн
Аналитический	0,408	0	0	0	0,027
Численный	0,419	0	0	0	0,029

Из таблицы 1 видно, что расхождение результатов, полученных посредством аналитического и численного методов, не превышают 10 %. Это подтверждает адекватность разработанных аналитических выражений для определения индуктивных параметров электрической машины.

Литература

1. Пантелеев, С.В. Повышение энергетических показателей электрической машины путем применения многофазной зубцовой обмотки С.В. Пантелеев, А.Н. Малашин // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск. – 2017 – №3. – С. 80–86.