

Математические модели электрооборудования нового поколения на основе сверхпроводников и силовой электроники

Э.П. Волков, Ш.И. Лутидзе

ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», 119991, Москва, Россия

1. Использование сверхпроводников и силовой электроники с целью радикального улучшения технико-экономических показателей электроэнергетических устройств охватывает все их разновидности применяемые для генерирования, преобразования, потребления и хранения электрической энергии: генераторы, трансформаторы, линии электропередач, двигатели, СП накопители, коммутационную аппаратуру и т.д.

2. Описание электромеханических и электромагнитных процессов в этих устройствах для расчетов и оптимизации режимов их работы требует разработки математических моделей СП электрических машин и трансформаторов в наиболее общем виде, применяемых для случаев как постоянного, так и переменного токов с использованием низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников первого и второго рода в широком диапазоне изменения интенсивности электромагнитного поля.

3. Для достижения этой цели необходимо в первую очередь установление параметров, характерных для СП среды, которые должны быть введены в уравнения. В качестве исходных уравнений необходимо использовать уравнения электромагнитного поля Максвелла.

4. Для определения плотности сверхпроводящего тока нами введен новый физический параметр – удельная кинетическая индуктивность

$$\ell_k = \frac{m}{e^2 n_s} \quad [\Gamma_{н.м}]$$

где m – масса электрона, e – заряд электрона, n_s – количество СП электронов единицы объема.

5. В реальных сверхпроводниках общее количество электронов в единице объема n_0 делится на две части: на сверхпроводящие электроны n_s и нормальные электроны n_n . Для плотности тока от нормальных электронов имеем

$$\vec{j}_n = \frac{\vec{E}}{\rho}$$

$$\text{где } \rho = \frac{m}{n_n e^2} \frac{1}{\tau} = \frac{m}{(n_0 - n_s) e^2} \frac{1}{\tau}$$

τ - время свободного пробега электронов.

6. Относительная проницаемость в сверхпроводнике определяется по выражению

$$\mu' = \frac{B}{\mu_0 H}$$

где \vec{B} и \vec{H} – магнитная индукция и напряженность магнитного поля в заданной точке внутри сверхпроводника.

Для определения напряженности магнитного поля и магнитной индукции имеем:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= \vec{j}_n \\ \text{rot} \vec{B} &= \mu_0 (\vec{j}_s + \vec{j}_n) \end{aligned}$$

где

$$\vec{j}_s = \frac{\int_0^t \vec{E} dt}{\ell_k}$$

$$\vec{j}_n = \frac{\vec{E}}{\rho_n}$$

7. Новый вид нелинейности, представляющий нелокальную зависимость плотности электронов магнитного поля, предложен нами следующим соотношением

$$n_s^* = \left(1 - B_0^* \right) \left(1 - \left(\frac{B}{B_0} \right)^\chi \right)$$

где

$B_0^* = \frac{B_0}{B_k}$ – относительное значение магнитной индукции на поверхности сверхпроводника;

$B_0^* = \frac{B}{B_0}$ – относительное значение магнитной индукции внутри сверхпроводника;

$n_s^* = \frac{n_s}{n_0}$ – относительное значение плотности СП электронов;

$\chi = \frac{\lambda}{\xi}$ – параметр Гинзбурга-Ландау, учитывающий степень неоднородности изменения СП электронов;

λ – параметр Гинзбурга-Ландау, учитывающий степень неоднородности изменения СП электронов;

ξ – параметр Гинзбурга-Ландау, учитывающий степень неоднородности изменения СП электронов;

v_0 – параметр, учитывающий уменьшение плотности электронов в зависимости от B_0 .

8. Освоение новых полупроводниковых переключателей: силовых запираемых тиристоров, мощных транзисторов и быстродействующих диодов дает реальные возможности создания нового широкого класса электрических машин и трансформаторов с управляемым полупроводниковым коммутатором (УПК). При помощи УПК происходит по любому заданному закону пространственное переключение магнитодвижущих сил отдельных секций обмоток электрических машин и трансформаторов, что придает этим устройствам новые качественные свойства: управляемость и регулируемость, надежность и устойчивость в работе, экономическую выгодность, экологичность и т.д. В математической модели переходных процессов этих машин использованы обобщенные пространственно-временные ориентированные векторы токов, напряжений, потокосцеплений и комплексные матричные преобразования фаз для многофазных несимметричных обмоток.

В полученные уравнения введены угловые скорости переключения коммутаторов, что дает возможность использования этих уравнений в различных задачах регулирования осуществляемых в новых видах электрических машин и трансформаторов. Как частный случай предложено множество новых схем вращающихся и статических преобразователей на переменном и на постоянном токе. Особенно следует выделить из них новые регулируемые бесконтактные асинхронные и синхронные генераторы и двигатели, обладающие уникальными параметрами, устойчивостью и надежностью в работе, выполненные с СП многофазной обмоткой с коммутатором на постоянном токе. Следует также отметить целый класс статических регулируемых трансформаторных преобразователей с УПК. Среди них: мощные СП трансформаторы постоянного тока, выполненные в одной магнитной системе, СП регулируемые преобразователи для СПИН практически без гармоник со вторичной стороны.