

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ В СЕРДЕЧНИКЕ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Предложена причина появления и алгоритм расчета сил, которые возникают в шихтованном сердечнике статора турбогенератора по аксиальной оси в процессе эксплуатации, и которые приводят к его разрушению («распушиванию»).

Введение. Проблема повышения надежности работы мощных турбогенераторов является основной, как для вновь проектируемых машин, так и для отработавших свой расчетный ресурс и подлежащих модернизации с повышением мощности в установленном габарите. Последнее требует пересмотра существующей практики расчетов, конструирования, технологии изготовления и сервисного обслуживания. Сбор статистических данных о надежности работы турбогенераторов (ТГ) на электростанциях, о причинах аварийных отказов и данные обследования ТГ при проведении плановых ремонтов позволил сделать вывод об актуальности исследования процессов, которые приводят к так называемому «распушиванию» торцевых пакетов и разрушению средних пакетов шихтованных сердечников статоров, [1].

Общемировая тенденция повышения удельной мощности ТГ (кВт/кг и кВт/м^3) и нарастание тепловых нагрузок при замене охлаждающего газа (отказ от водорода в объеме ТГ и его замена на воздух) сделало еще более актуальной задачу перспективной оценки поведения шихтованного сердечника статора в процессе эксплуатации и установления причин его разрушения.

Данные исследования. Данные эксплуатации ТГ, полученные по отчетам заводов-изготовителей, показали, что проблемы разрушения сердечников, которые приводят к повышению вибрации машины, расклиновке пазов и нарушению изоляции обмоток и бандажных колец статора, обычно начинаются не ранее 10 лет эксплуатации машины на блоке, [1,2]. До начала общемирового экономического кризиса в высокоразвитых странах после окончания срока эксплуатации (25—30 лет) проводилась полная замена основных элементов или всей машины, то сегодня во всем мире наметилась другая тенденция — продление срока службы ТГ еще на 20—30 лет путем малозатратной модернизации. Так, например, срок службы электрооборудования блоков АЭС в США продлен вдвое (до 60 лет), на российских АЭС – в полтора раза (до 45 лет). Соответственно, конструкция ТГ должна обладать высоким уровнем ремонтпригодности и при ее изготовлении должны использоваться проверенные на конечную надежность технологии, как на заводе - изготовителе, так и те, которые используются при проведении этими заводами сервисного обслуживания и ремонта ТГ непосредственно на блоках станций. Наиболее сложным вопросом комплексного решения проблемы обеспечения высокого уровня эксплуатационной надежности и ремонтпригодности является решение вопроса восстановления на станциях шихтованных магнитопроводов сердечников статоров турбогенераторов.

Сердечники изготавливаются из лучших сортов листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм (иногда 0,35 мм); листы изолируют лаковой пленкой. Сердечник набирается

из отдельных сегментов в пакеты толщиной 40—70 мм, разделенные вентиляционными радиальными каналами шириной 5—10 мм, образованными с помощью дистанционных распорок двутаврового или прямоугольного профиля, как правило, из немагнитного металла. При работе машины под нагрузкой сердечник испытывает действие очень больших радиальных усилий магнитного тяжения и окружных электромагнитных сил, под действием которых он деформируется и колеблется с двойной частотой сети. Поэтому в месте закрепления сердечника в корпусе возникают значительные усилия, передающие вибрации сердечника к корпусу и вызывающие контактную эрозию соприкасающихся поверхностей сердечника и ребер-клиньев. Для снижения вибрации сердечник к корпусу присоединяется на упругой подвеске. Наиболее простой и хорошо зарекомендовавшей себя в эксплуатации является конструкция, в которой в ребрах-клиньях в области крепления их к корпусу делаются длинные продольные прорезы, позволяющие ребру-клину деформироваться в радиальном направлении. Концы ребер-клиньев затачивают на цилиндр и снабжают резьбой.

Для уменьшения добавочных потерь от магнитного поля в зоне лобовых частей обмотки статора нажимные кольца, которые удерживают сердечник в запрессованном состоянии, выполняют из немагнитной стали. Для защиты крайних пакетов сердечника от этих полей между нажимными кольцами и сердечником устанавливают медный экран – кольцо. Крайние пакеты делают более тонкими, а в зубцах делают радиальные прорезы.

При работе генератора в шихтованном сердечнике действует комплекс внутренних сил того же порядка, что и сила магнитного тяжения в воздушном зазоре. Расчет сил в радиальном направлении выполнен многими авторами, например, [1-4], но в осевом направлении расчет очень сложен и его не удается выполнить обычными методами моделирования магнитных полей.

Нами предложена модель появления аксиальных электродинамических усилий в турбогенераторе, которые приводят к «распушиванию» (распрессовке) пакетов сердечников статоров.

Магнитные поля от постоянных магнитов аналогичны магнитным полям от электрических токов. Поэтому магнит можно заменить прямоугольной призмой, на поверхности граней которой циркулируют токи (поверхностные токи). Циркуляция (вращение) происходит вокруг осей, которые ориентированы вдоль одного определенного направления и создают внешнее поле.

Пластины шихтованного сердечника статора турбогенератора можно представить в виде системы параллельных и одинаково ориентированных постоянных магнитов. При этом возникают силы, которые можно заменить взаимодействием полей поверхностных токов, возникающих на поверхности каждой пластины сердечника. Взаимодействие между соседними шихтованными пластинами равномерно, аналогично распределению давления в жидкости.

Поверхностные токи формируются в плоскостях, направленных перпендикулярно направлению намагничивания x . Плотность тока не зависит от x и определяется интенсивностью намагниченности M , рис. 1. Вектор-потенциал поля, создаваемого заданной намагниченностью M , выражается:

$$A_M = -\frac{\mu_v}{4\pi} \cdot \int_v \frac{M \times r}{r^3} \cdot dv = \frac{\mu_v}{4\pi} \cdot \int_v \frac{\nabla \times M}{r} \cdot dv + \frac{\mu_v}{4\pi} \cdot \int_s \frac{M \times n}{r} dS \dots (1)$$

где объемные интегралы берутся по всему объему магнита, а поверхностные - по его поверхности.

Для равномерно намагниченной области, т.е. области, где внутри намагниченность M постоянна по величине и направлению, второй объемный интеграл в выражении (1) равен нулю. Рассмотрим остающийся интеграл по поверхности. Предположим, что M направлено по оси x , т.е. $M = i \cdot M$. Пусть θ - угол между i и n , а dx и ds — ортогональные векторы, лежащие на поверхности магнита (ds нормально к i и n).

Тогда

$$M \times n \cdot dS = M \cdot \sin\theta \cdot ds_1 = M dx ds,$$

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint \frac{M dx}{r} ds \quad (2)$$

Магнитный поток в зазоре формируется двумя группами токов:

- 1) токи, параллельные оси x ;
- 2) токи, параллельные оси y .

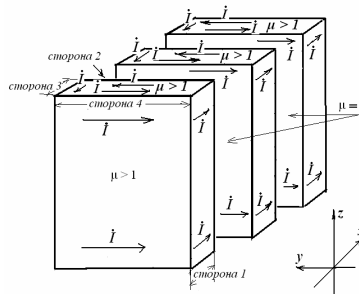


Рисунок 1 – Модель анализируемой системы

Рассмотрим группу токов, параллельных оси x . При $\delta \ll b_F$ величину магнитной индукции B_z в плоскости $z = 0$ можно считать зависящей только от потока по оси y (рис. 2), и определяется выражением для каждой из сторон. Выделим из шихтованного пакета одну пластину и примем промежуточную систему координат v, u, w , рис. 3.

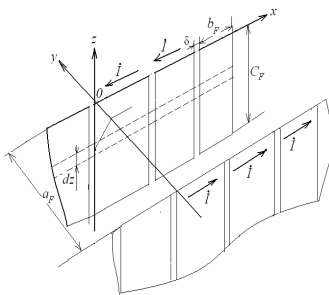


Рисунок 2 - Модель к расчету магнитной индукции B_z

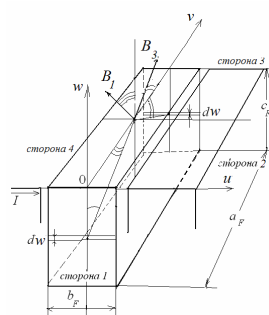


Рисунок 3 – Распределение магнитных полей в пластине зубца сердечника

Запишем значения индукции от эквивалентной пленки тока по поверхности различных граней одной пластины зубца:

1) для стороны 1 (рис. 3) можно записать

$$B_{1Z}(Y_N) = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{c_F} \cdot \int_{-c_F}^0 \frac{Y_N \cdot dw}{(Y_N^2 + w^2)} = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{c_F} \cdot \arctg \frac{w}{Y_N} \Big|_{-c_F}^0 =$$

$$= \frac{\mu \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{b_F} \cdot \arctg \frac{c_F}{Y_N}, \text{ Тл.}$$

2) Для стороны 3 (рис. 3) аналогично можно записать:

$$B_{3Z}(Y_N) = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{c_F} \cdot \int_{-c_F}^0 \frac{(a_F - Y_N) \cdot dw}{(a_F - Y_N)^2 + w^2} = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{c_F} \cdot \arctg \frac{w}{(a_F - Y_N)} \Big|_{-c_F}^0 =$$

$$= \frac{\mu \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{b_F} \cdot \arctg \frac{c_F}{(a_F - Y_N)}, \text{ Тл}$$

Учитывая, что $V=Y_N$, z - составляющую магнитного потока через торец пластины, определяемую токами, параллельными оси u (оси x), поток можно вычислить, Вб:

$$\Phi_{1-3} = \int_0^{a_F} c_F \cdot (B_{1Z}(v) + B_{3Z}(v)) \cdot dv = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{c_F} \cdot \int_0^{a_F} (\arctg \frac{c_F}{v} \cdot \arctg \frac{c_F}{(a_F - v)}) \cdot dv.$$

Получив значение потока, мы рассчитали значение силы, действующей на крайние пластины по аксиальной оси u , как ожидается, должны были бы быть причиной «распушивания» торцов сердечника. Однако, величины этих сил оказались недостаточными для отгибания нажимных пальцев торцевых пакетов сердечника. Поэтому надо искать другие силы, которые действуют на листы шихтованного сердечника, что необходимо для обеспечения требуемых запасов механической прочности элементов конструкции.

Список литературы.

1. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов/ Сб. Электросила. - 2004. - № 43. - С. 56-64.
2. Васковский Ю.Н., Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Анализ вибровозмущающих осевых сил в сердечнике статора мощного турбогенератора //Электротехника и электромеханика. -2009 - № 2 -С. 21-26.
3. Томашов Г.В., Титко В.А. Расчет электромагнитного поля в шихтованном магнитопроводе электромашины при наличии локальной распрессовки. // Вісник НТУ «ХП». - 2001. - № 16. – С. 155-157.
4. Милых В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов // Технічна електродинаміка. – Київ. – 2013. – №3. – С. 40-49.