УДК 621.313.13

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА НА МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ТОРЦЕВОЙ ЗОНЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Полищук В.И., Лиясова О.В., Оболтина А.В.

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, e-mail: radish.tsk@gmail.com

В работе изложены результаты исследования по разработке методики моделирования влияния магнитного поля «выпучивания» из воздушного зазора синхронного генератора на показания точечных измерительных преобразователей магнитного поля в торцевой зоне синхронного генератора. Разработка методики вызвана необходимостью проектирования защитно-диагностических систем, которые основаны на использовании информации несимметрии магнитного поля в торцевой зоне синхронного генератора. Методика базируется на идее замены поля зазора на проводник и использовании метода зеркальных отражений с коррекцией токов. Методика проста, надежна и позволяет получить значения аксиальной и радиальной составляющей индукции магнитного поля с учетом влияния поля «выпучивания» зазора в точке измерения с точностью порядка 15%, что удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям.

Ключевые слова: синхронный генератор, воздушный зазор, магнитное поле, метод зеркальных отражений, измерительный преобразователь

METHOD OF MODELING THE INFLUENCE OF AIR GAP ON THE MAGNETIC FIELD IN CORE END SYNCHRONOUS GENERATOR

Polishchuk V.I., Lijasova O.V., Oboltina A.V.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: radish.tsk@gmail.com

The paper presents the results of a study to develop a method of modeling the influence of the magnetic field «buckling» of the air gap synchronous generator on the readings of point transducers magnetic field in the end zone of a synchronous generator. Development of a technique due to the necessity of design of protective and diagnostic systems based on using information of a magnetic field asymmetry in the end zone of the synchronous generator. The technique is based on the idea of replacing the gap field on the conductor and the use of the specular reflections with correction of currents. The method is simple, reliable, and allows you to get the values of the axial and radial component of the magnetic field with the field effect «buckling» of the gap at the point of measurement with an accuracy of about 15%, which satisfies the demands placed upon it.

Keywords: synchronous generator, air gap, magnetic field, specular reflections, transmitter

При проектировании защитно-диагностических систем, основанных на анализе составляющих поля в торцевой зоне синхронного генератора (СГ) [1-5], необходимы данные с конкретной точки торцевой зоны. Величина воздушного зазора δ, особенно мощных СГ в сравнении с размерами торцевой зоны, значительна. Так, например, в СГ ТВВ-500-2ЕУ3 она составляет 95 мм при высоте и ширине расчетного призматического канала торцевой зоны 1020 и 1193 мм соответственно. При этом максимальное значение индукции магнитного поля воздушного зазора может достигать величины 1,6…2,0 Тл [7]. Поэтому поле «выпучивания» [8] из воздушного зазора в торцевую зону должно быть значительно. Поэтому при расчетах магнитного поля в торцевой зоне СГ необходима оценка влияния поля «выпучивания» из воздушного зазора на выходные параметры измерительного преобразователя.

Цель работы – изложение результатов исследования по моделированию влияния поля «выпучивания» из воздушного зазора на показания точечного преобразователя магнитного поля в торцевой зоне СГ.

Постановка задачи. Разработать простую методику позволяющую учесть магнитное поле «выпучивания» из воздушного зазора при расчете ЭДС на выходе точечного преобразователя магнитного поля, устанавливаемого в торцевой зоне СГ.

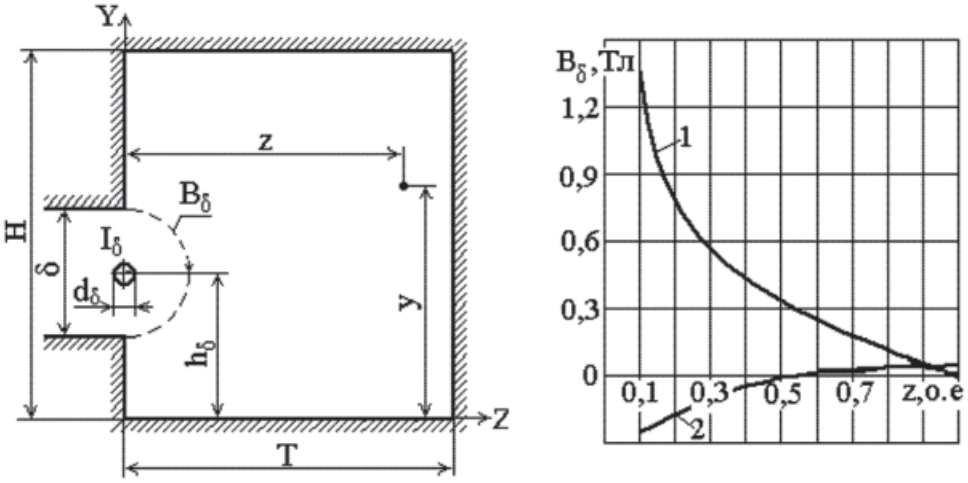
Методика моделирования. Точное моделирование поля воздушного зазора является достаточно сложной задачей [9] по целому ряду причин, в частности, из-за неравномерности воздушного зазора в аксиальном направлении у торцов сердечника статора неявнополюсных СГ, а также его неравномерностью в тангенциальном направлении у явнополюсных СГ. Поэтому для его приближенной оценки предлагается воспользоваться моделью, прототип которой изложен в [10, 11]. Эта модель проста и дает неплохие результаты. Основная идея состоит в том, чтобы заменить поле «выпучивания» воздушного зазора полем проводника диаметром $d_\delta = (0{,}1\ldots0{,}2)\delta$ с током I_δ в нем. Расчетная схема для моделирования

приведена на рисунке, а. Величина тока I_δ в проводнике рассчитываются по уравнению Био–Савара–Лапласа с учетом

$$I_\delta = \frac{B_\delta \pi \left(\delta - d_\delta\right)}{\mu_0} = \frac{0{,}9\delta B_\delta \pi}{\mu_0},$$

где B_δ – индукция магнитного поля воздушного зазора.

Для определения радиальной и аксиальной составляющей индукции B_y B_z от проводника с током можно воспользоваться любым метом расчета магнитного поля, но в рамках поставленной задачи наиболее эффективным является усовершенствованный метод зеркальных отражений, в котором предлагается ввести коррекцию токов [12].



а б

Расчетная схема и результаты расчета поля воздушного зазора в торцевой зоне СГ

Расчет поля проводника с током, расположенного между параллельными ферромагнитными поверхностями, учитывается бесконечным числом отражений [12]. По закону Био–Савара–Лапласа для i, j-го отражения проводника с током $I_{x(i,j)}$ вдоль осей y и x соответственно индукция магнитного поля в плоскости, перпендикулярной проводнику, определяется выражением:

$$B_{y(i,j)} = \frac{I_{x(i,j)}\mu_0 \left|z - z_j\right|}{2\pi b_{x(i,j)}} \cdot \frac{l_x K_y}{2d_{x(i,j)}};$$

$$B_{z(i,j)} = \frac{I_{x(i,j)}\mu_0 \left|y - y_i\right|}{2\pi b_{x(i,j)}} \cdot \frac{l_x K_z}{2d_{x(i,j)}};$$

$$b_{x(i,j)} = \sqrt{\left(y_i - y\right)^2 + \left(z_j - z\right)^2};$$

$$d_{x(i,k)} = \sqrt{l_x^2 + b_{x(i,j)}^2},$$

где y_i, z_j – координаты i, j-го отражения проводника; μ_0 – относительная магнитная проницаемость; y, z – координаты точки, в которой определяются аксиальная – $B_{z(i,j)}$ и радиальная – $B_{y(i,j)}$ составляющие индукции магнитного поля отражений; l_x – длина проводника, вдоль которого и разворачивается машина; K_y, K_z – коэффициенты коррекции; b_x – расстояние от точки расчета индукции до центра проводника; d_x – расстояние от точки расчета индукции до конца проводника.

Если принять, что магнитная проницаемость ферромагнитных элементов равна бесконечности, то величина тока для любого отражения

$$I_{x(i,j)} = I_x.$$

Если магнитная проницаемость не равна бесконечности, то величина тока для i, j-го отражения равна

$$I_{x(i,j)} = I_x \left(\frac{\mu_c - 1}{\mu_c + 1}\right)^{i+j},$$

где μ_c – магнитная проницаемость ферромагнитных элементов.

При расчете B_z в областях $0 < y < h_\delta$ и $h_\delta < y < H$ рис. 1 коэффициент коррекции определяется как

$$K_z = \frac{y}{0{,}5H} \text{ и } K_z = \frac{H - y}{0{,}5H}.$$

Если в системе координат ферромагнитные поверхности параллельны оси z, то для расчета составляющей индукции магнитного

поля B_y в области $0 < z < T$ коэффициент коррекции

$$K_y = \frac{T - z}{0{,}5T}.$$

В реальных условиях [9] магнитная проницаемость ферромагнитных стенок в электрических машинах имеет конечную величину и колеблется в пределах 40…1400. В этом случае при расчете B_z в областях $0 < y < h_\delta$ и $h_\delta < y < H$ следует применять коэффициенты коррекции, рассчитанные следующими уравнениями:

$$K_z = \frac{y}{0{,}5H}(1 + K_c) - K_c$$

и

$$K_z = \frac{H - y}{0{,}5H}(1 + K_c) - K_c,$$

где $K_c = e^{\mu p}$, а $p \approx -0{,}00264$.

Расчет составляющей индукции магнитного поля B_y в области $0 < z < T$ соответственно осуществляется с коэффициентами коррекции

$$K_y = \frac{T - z}{0{,}5T}(1 + K_c) - K_c.$$

В результате радиальная и аксиальная составляющие магнитного поля от проводника с током I_δ в торцевой зоне определятся как

$$B_{y\delta} = \sum_i \sum_k B_{y(i,j)}$$

и

$$B_{z\delta} = \sum_i \sum_k B_{z(i,j)}.$$

Проверка. Результаты моделирования магнитных полей «выпучивания» воздушного зазора приведены на рис. 1, б, где кривые 1 и 2 радиальная и аксиальная составляющие этого поля при $y = h_\delta$. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами в [9, 10, 13, 14]. При расчетах в разных частях торцевой зоны расхождение с результатами расчетов, полученных численными методами расчета аксиальной составляющей вблизи торцевого щита, редко достигало уровня 15%, что вполне удовлетворяет предъявляемых к методике расчета требованиям.

Выводы

Метод зеркальных отражений с коррекцией токов позволяет учесть влияние магнитного поля «выпучивания» на поле в заданной точке торцевой зоны генератора с погрешностью порядка 15%. Использование при расчете поля простых аналитических выражений дает возможность производить учет влияния магнитного поля «выпучивания» на показания датчиков без дополнительных временных потерь на ПЭВМ.

Работа выполнена в рамках исполнения Госзадания «Наука» ГК № 7.2826.2011.

Список литературы

1. Электрические процессы в торцевых частях электрических машин // А.И. Вольдек, Я.Б. Данилевич, В.И. Косачевский, В.И. Яковлев. – Л.: Атомиздат, 1983. – 212 с.

2. Вольдек А.И. Влияние неравномерности воздушного зазора на магнитное поле машины // Электричество. – 1951. – № 12. – С. 40–46.

3. Вольдек А.И. Основы методики расчета магнитных полей лобовых частей обмоток электрических машин // Электричество. – 1963. – № 1. – С. 41–43.

4. Данилевич Я.Б. Добавочные потери в турбо- и гидрогенераторах. – Л.: Наука, 1973. – 181 с.

5. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К, и др. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.

6. Новожилов А.Н., Кислов А.П. Магнитное поле вала асинхронного двигателя.// Электротехника. – 2001. – № 10.

7. Новожилов А.Н. Расчет точечных измерительных преобразователей для защиты синхронного двигателя.// Электротехника. – 1995. – № 10. – С. 45–48.

8. Полищук В.И., Кислов А.П., Новожилов А.Н. Способ защиты синхронной электрической машины от виткового замыкания.

9. Моделирование магнитных полей методом зеркальных отражений с коррекцией токов для синтеза защит электрических машин / В.И. Полищук, А.Н. Новожилов, О.А. Андреева, М.П. Воликова // Электричество. – 2008. – № 11. – С. 41–48.

10. Полищук В.И., Новожилов А.Н., Воликова М.П. Устройство защиты обмотки ротора синхронного генератора от двойных на землю и витковых замыканий // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 54–59.

11. Полищук В.И., Новожилов А.Н., Горюнов В.Н. Способ защиты обмотки ротора синхронного генератора от витковых замыканий на двух индукционных преобразователях // Электричество. – 2010. – № 8. – С. 64–67.

12. Полищук В.И., Новожилов А.Н. Устройство защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыкания в обмотке роторе // Патент № 22450 (KZ). Официальный бюллетень. Пром. Собственность. – 2010. – № 4.

13. Полищук В.И. Построение защиты от виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 4. – С. 57–61.

14. Полищук В.И. Способ защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора // Патент № 21247 (KZ). Официальный бюллетень. Пром. Собственность. – 2009. – № 5.

References

1. Vol'dek A.I., Danilevich Ja.B., Kosachevskij V.I., Jakovlev V.I. Electrical processes in the core end of electrical machines. AL: Clarendon Press Oxford, 1983. 212 p.

2. Vol'dek A. I. Effect of non-uniformity of the air gap in the magnetic field of the machine. Elektrichestvo. 1951. no. 12. pp. 40–46.

3. Vol'dek A. I. Methodology used for the magnetic field end coil windings of electrical machines. Elektrichestvo. 1963. no. 1. pp. 41–43.

4. Danilevich Ja.B. Additional losses in the turbo and hydrogenerator. L.: Nauka, 1973. 181 p.

5. Kopylov I.P., Gorjainov F.A., Klokov B.K. Design of electrical machines. Moscow: Energya, 1980. 495 p.

6. Novozhilov A.N., Kislov A.P. The magnetic field of the asynchronous motor shaft. Jelektrotehnika. 2001. no. 1

7. Novozhilov A.N. Calculation of point converters to protect the synchronous motor. Jelektrotehnika. 1995. no. 10 pp.45- 48.

8. Polishchuk V.I., Kislov A.P., Novozhilov A.N. A method for protecting a synchronous electric machine of protection against turn-to-turn faults//Patent № 5381 (KZ). Official bulletin Prom . Property. 1997, № 4.

9. Polishchuk V.I., Novozhilov A.N., Andreeva O.A., Volikova M.P. Simulation of the magnetic fields by specular reflections with the correction currents for the synthesis of protection of electrical machines. Elektrichestvo. 2008. no. 11. pp. 41–48.

10. Polishchuk V.I., Novozhilov A.N., Volikova M.P. Protection device of synchronous generator winding rotor of the double earth fault and interturn. Elektrichestvo. 2012 no. 6. pp. 54–59.

11. Polishchuk V.I., Novozhilov A.N., Gorjunov V.N. A method of protecting rotor winding synchronous generator circuits on of interturn two inductive transmitters. Elektrichestvo. 2010 no. 8. pp. 64–67.

12. Polishchuk V.I., Novozhilov A.N. Protection device of synchronous electric machine against turn-to-turn and double earth fault in the rotor winding//Patent № 22450 (KZ). Official bulletin. Prom . Property. 2010, no. 4.

13. Polishchuk V.I. Construction of protection interturn fault in the winding rotor synchronous generator based on inductive sensor magnetic slot field. The Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2012. no. 4. pp. 57–61.

14. Polishchuk V.I. Sposob zashhity sinhronnoj jelektricheskoj mashiny ot vitkovyh i dvojnyh na zemlju zamykanij v obmotke rotora. Patent № 21247 (KZ). Official Bulletin . Prom . Property. 2009, no. 5.

Рецензенты:

Лукутин Б.В., д.т.н., профессор кафедры ЭПП ЭНИН, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск;

Исаев Ю.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Работа поступила в редакцию 08.10.2013.