

Г.В. БЕРБЕРЯН

К АНАЛИЗУ ВЛИЯНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ ПОЛЮСОВ РОТОРА НА АСИММЕТРИЮ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ГИДРОГЕНЕРАТОРА

Рассматривается проблема влияния формы огибающей поверхности полюсов ротора на асимметрию воздушного зазора в гидрогенераторах. Результатом проведенного анализа, с одной стороны, является подробное описание случайного процесса распределения воздушного зазора, с другой - доказательство возможности оценки эксцентриситетов ротора и статора в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: эксцентриситет, асимметрия, огибающая полюсов, воздушный зазор, ротор, статор.

Известно, что асимметрия воздушного зазора наряду с коротким замыканием (к.з.) в обмотках возбуждения вызывает асимметрию магнитного поля, что является причиной ряда нежелательных последствий, ведущих к аварийному исходу в случае их несвоевременного обнаружения и ликвидации вызвавших их причин [1-3]. Причина указанной асимметрии – искажения правильных форм расточки статора и огибающей полюсов ротора, результат совместного действия которых принято рассматривать на основе принципа наложения. В связи с этим для исследования указанного влияния следует четко представить модель анализа, состоящую из ротора и статора. В данном случае очевидными являются допущения идеальности статора в виде цилиндра правильной формы без зубцов и пазов, искажения огибающей полюсов в виде поверхности эллипсоида [3] и наличия эксцентриситетов статора и ротора относительно центра вращения ротора (рис.1).

В принятой модели (рис.1а) ротор можно представить в виде поперечного сечения, перпендикулярного его геометрической оси и ограниченного снаружи эллипсом, жестко связанные друг с другом большая и малая оси которого в общем случае в начальный момент могут быть ориентированы в пространстве случайным образом в пределах от нуля до 2π рад к горизонтальной (или вертикальной) оси статора.

На рис.1а случайным образом изображены три положения большой оси указанного эллипса - aa_1 , bb_1 , cc_1 так, что положение aa_1 ориентировано вдоль вертикальной оси окружности l с центром в точке O_1 , а два других - bb_1 и cc_1 - под одинаковым углом наклона, но в противоположных направлениях от вертикали.

Эксцентриситет ротора относительно его же центра O равен d_2 . Центр вращения O может занять произвольное положение вдоль окружности со случайным радиусом d_1 и центром в точке O_1 , а центр O_2 - вдоль окружности со случайным радиусом d_2 и центром в точке O .

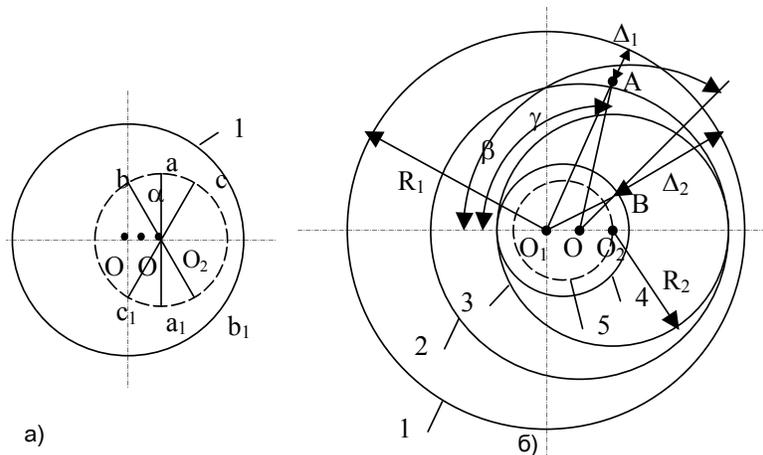


Рис.1

Нетрудно заметить, что центры O_1 и O в любом случае будут расположены на диаметре статора, а центр O_2 , в силу его вращения вокруг центра O , дважды в течение одного полного поворота ротора также окажется расположенным на том же диаметре вместе с центрами O_1 и O со смещением влево или вправо от центра O . Очевидно, что в смысле наибольших приближений точек a , b или c к внутренней поверхности статора, имеющих отношение к асимметрии воздушного зазора, из вышеуказанных двух положений центра O_2 наиболее критичным будет то, которое окажется вправо от O , поскольку в этом случае вращающаяся вокруг центра O точка O_2 окажется наиболее удаленной от центра O_1 . Таким образом, из приведенного рассмотрения случайного процесса ориентации центров O_1, O и O_2 относительно друг друга следует, что ориентация, указанная на рис.1а, является представительной для произвольного случая. Кроме того, поскольку число пар полюсов ротора P является целым, то при одинаковом шаге между ними они оказываются попарно размещенными на противоположных концах различных диаметров, повернутых друг к другу на одинаковый угол α (рис.1 а).

Из-за эллипсности поперечного сечения длины указанных диаметров будут распределены случайным образом между наибольшим и наименьшим значениями для данного ротора, приписываемыми большой и малой осям эллипса соответственно. Поэтому при вращении центра O_2 вокруг O конечные точки, например, a и a_1 , b и b_1 и др., изображающие вершины полюсов в их огибающей наружной поверхности, получают максимальное и минимальное приближения к расточке статора (рис.1 а).

Что касается наибольшего и наименьшего значений осей указанного эллипса, то их можно распознать во время пусконаладочных операций

путем поочередной установки подходящих измерительных средств на всех парах противоположных полюсов и измерения воздушного зазора под ними по принятой процедуре. После обнаружения наибольшего значения большой оси эллипса указанное измерительное средство может продолжать функционировать в составе общей информационно-измерительной системы (ИИС). Необходимость в указанной идентификации очевидна, т.к. априорно определить большую ось эллипса невозможно, а ее распознавание с помощью средств, установленных на всех полюсах, связано с удорожанием и усложнением ИИС и поэтому неприемлемо.

Следует также отметить, что указанную процедуру необходимо провести для обоих крайних сечений ротора - верхнего и нижнего, т.к. из-за определенной прецессии ротора существует разница в асимметрии воздушного зазора, достигающая максимального значения на этих уровнях.

Рассмотрим изменение воздушного зазора на основе рис.1 а, откуда следует, что если большая ось эллипса совпадет с отрезком aa_1 , то ее крайние точки a и a_1 будут вращаться вокруг центра O с одинаковыми радиусами $r_1 = Oa = Oa_1$. Удаления этих точек от расточки статора будут одинаковыми, причем максимальное удаление возникнет тогда, когда Oa займет левое, а минимальное - правое горизонтальные положения. В случае других исходных направлений большой оси, например, совпадающих с направлением отрезков bb_1 или cc_1 , точки b и b_1 или c и c_1 будут вращаться с разными радиусами $r_{2B} = O_B < r_{2B1} = O_{B1}$ и $r_{3C} = O_C > r_{3C1}$ соответственно.

На рис.1б изображено пять окружностей, причем окружность 1 представляет расточку статора, 2 - траекторию движения точек b_1 или c , 3 - траекторию движения точек a или a_1 вокруг центра O_2 , 4 - траекторию движения точек b или b_1 вокруг центра O , 5 - траекторию движения геометрического центра O_2 вокруг центра вращения O , а расположение этих окружностей относительно друг друга следует из результатов предварительного анализа.

Для определения минимальных и максимальных приближений двух характерных точек к статору, например, b и b_1 , при вращении вокруг центра O достаточно воспользоваться соотношениями, следующими из рис.1 б. При произвольном положении точки b_1 на окружности 2 в точке A и точки B на окружности 4 радиальные длины воздушных зазоров Δ_1 и Δ_2 будут соответственно равны

$$\Delta_1 = R_1 - O_1A = R_1 - \sqrt{d_1^2 + (R_2 + d_2)^2 - 2d_1(R_2 + d_2)\cos\gamma} \quad \text{и}$$

$$\Delta_2 = R_1 - O_1B = R_1 - \sqrt{d_1^2 + (R_2 - d_2)^2 - 2d_1(R_2 - d_2)\cos\beta},$$

где R_1 - радиус расточки статора, а R_2 - большая полуось эллипса.

Минимальные и максимальные значения Δ_1 и Δ_2 можно найти из экстремумов $O_1 A$ и $O_1 B$ по аргументам γ и β , изменяющимся периодически в пределах от нуля до 2π рад, в следующем виде:

$$\Delta_{1\max} = R_1 - R_2 + (d_1 - d_2), \quad (1)$$

$$\Delta_{1\min} = R_1 - R_2 - (d_1 + d_2), \quad (2)$$

$$\Delta_{2\max} = R_1 - R_2 + (d_1 + d_2), \quad (3)$$

$$\Delta_{2\min} = R_1 - R_2 + (d_2 - d_1). \quad (4)$$

Полученные выражения (1) - (4) образуют систему уравнений, в которых левые части представляют собой измеряемые (известные), а правые - неизвестные величины R_1 , R_2 , d_1 и d_2 , причем вычитания (2) из (3) и (1) из (4) приводят к новой системе уравнений, содержащей только искомые неизвестные d_1 и d_2 :

$$\begin{cases} \Delta_{2\max} - \Delta_{1\min} = 2(d_1 + d_2), \\ \pm \Delta_{2\min} \mp \Delta_{1\max} = 2(\pm d_2 \mp d_1). \end{cases} \quad (5)$$

Легко заметить, что $\Delta_{2\max}$ и $\Delta_{1\min}$ - это наибольшее и наименьшее из измеренных значений Δ_2 и Δ_1 соответственно, а $\Delta_{2\min}$ и $\Delta_{1\max}$ образуют равные по модулю разности, причем, если модуль равен нулю, то

$$d_1 = d_2 = (\Delta_{2\max} - \Delta_{1\min}) / 2, \quad (6)$$

если $\Delta_{2\min} \neq \Delta_{1\max}$, то при $\Delta_{2\min} > \Delta_{1\max}$ значения d_1 и d_2 равны

$$d_1 = (\Delta_{2\max} - \Delta_{1\min} - \Delta_0) / 4, \quad (7)$$

$$d_2 = (\Delta_{2\max} - \Delta_{1\min} + \Delta_0). \quad (8)$$

В случае, если $\Delta_{1\max} > \Delta_{2\min}$, значение d_1 определяется из (8), а d_2 из (7), причем

$$\Delta_0 = |\Delta_{2\max} - \Delta_{1\min}|. \quad (9)$$

Отсюда следует, что система уравнений (5) и ее решения полностью определяют относительно простой алгоритм идентификации эксцентриситетов d_1 и d_2 статора и ротора при вышеуказанных допущениях. Для расточки статора, отличающейся от идеальной произвольными искажениями формы, идентификацию эксцентриситетов можно произвести лишь на основе вероятностных оценок при известном законе (или плотности) распределения погрешности, возникающей при измерении воздушного зазора.

Согласно предельной теореме вероятностей, указанные погрешности распределены по нормальному закону, значение среднеквадратичного отклонения σ которого можно определить на основе опытных данных. Дело в том, что при пусконаладочных работах производят измерение длины воздушного зазора под всеми полюсами с максимальной погрешностью $\delta_{\max} = \pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ [2]. А т.к. при указанном выше распределении $\delta_{\max} = 3\sigma$ (при вероятности $P=0,97$), то отсюда следует, что $\sigma = \delta_{\max} / 3$, а значения d_1 и d_2 можно оценить по выражениям

(7) и (8), добавив к ним либо $\pm\rho=2\sigma/3$ при $P=0,5$ для вероятной погрешности ρ , либо $\delta=2\sigma$ при $P=0,95$ для средней погрешности, либо $\pm\delta_{\max}=3\sigma$ при $P=0,97$ для максимальной погрешности.

Таким образом, анализ показал, что контроль асимметрии воздушного зазора гидрогенератора в условиях эксплуатации можно совместить с идентификацией эксцентриситетов ротора и статора, реализуемой с вероятностной оценкой на основе несложного алгоритма обработки результатов измерений. Указанное совмещение двух видов контроля позволяет существенно упростить ИИС и повысить достоверность предсказания причин возникновения и развития магнитной асимметрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль А.А., Нецеевский А.Б. Анализ спектра индукции при асимметрии магнитного поля в воздушном зазоре гидрогенераторов // Электричество.- 1981.- ¹ 8.- С.13-17.
2. Коваль А.А., Нецеевский А.Б. Эксплуатационный контроль асимметрии магнитного поля в воздушном зазоре гидрогенераторов // Энергетика и электрификация.- 1984.- ¹ 2.- С. 17-20.
3. Нецеевский А.Б., Самородов Ю.Н., Элькинд Ю.М. К анализу причин, признаков и развития начальных дефектов гидрогенераторов // Электрические станции.-1981.- ¹ 6.- С. 35-39.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 26.10.1999.

Գ.Վ. ԲԵՐԲԵՐՅԱՆ

ՌՈՏՈՐԻ ԲԵՎԵՆՆԵՐԻ ԸՆԴՊՐԿՈՂ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՁԵՎԻ՝ ՀԻՂՈՂԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ՕՂԱՅԻՆ ԲԱՑՎԱԾՔԻ ԱՆՀԱՄԱՉԱՓՈՒԹՅՈՒՆ ԱՌԱՋԱՑՆՈՂ ԱՁԴՅՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Հոդվածում դիտարկվում է ռոտորի բևեռներն ընդգրկող մակերևույթի ձևի՝ հիդրոգեներատորի օդային բացվածքի անհամաչափության վրա ունեցած ազդեցության խնդիրը: Կատարված վերլուծության արդյունքը, մի կողմից, հիդրոգեներատորի բևեռների և ստատորի միջև առաջացած օդային բացվածքի բաշխման պատահական ընթացքի մանրակրկիտ նկարագրումն է, մյուս կողմից, ռոտորի ու ստատորի էքսցենտրիսիտետների շահագործման պայմաններում գնահատման հնարավորության ապացույցը:

G.V. BERBERYAN

ON THE ANALYSIS OF THE ROTOR POLE-PIECE ENVELOPE SURFACE IMPACT EXERTING ON THE HYDROGENERATOR AIR-GAP ASYMMETRY

A problem of rotor pole-piece envelope surface profile effect exerted on the hydrogenerator air-gap asymmetry is discussed. The basic result is, on the one hand, a detailed description of a random process in the air-gap distribution and, on the other hand, possibility to prove rotor and stator eccentricity evaluation based on the experimental data under operating conditions.