

Є.О Зайцев
В.О. Березниченко

ГІБРИДНИЙ СЕНСОР ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АНОМАЛІЙ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ В СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРАХ

Інститут електродинаміки НАН України

У статті показано, що з моменту початку виробництва і до моменту остаточного виведення з експлуатації в елементах конструкції потужних гідрогенераторів (ГГ) протікає цілий ряд фізико-хімічних та термомеханічних процесів в його обертових та не обертових елементах конструкції. Ці процеси з плином часу призводять до зміни фактичного технічного стану вузлів ГГ та розвитку дефектів, які впливають на ефективність роботи ГГ. Визначення фактичного технічного стану ГГ базується на оцінюванні комплексу контрольно-діагностичних параметрів різної природи, до яких відносяться електричні, механічні, температурні, магнітні та технологічні. Достовірність визначення фактичного технічного стану, визначення наявності дефектів в об'єкті, оцінка можливості подальшого використання енергетичного об'єкта залежить від того, наскільки повно контрольовані параметри відображають його фактичний технічний стан. Одним із основних вузлів ГГ, в якому відбувається перетворення механічної енергії напору води в електричну енергію є повітряний зазор між ротором і статором. Конструктивною особливістю повітряного зазору в ГГ є порівняно невелика його величина в порівнянні з діаметром розточення статора. В таких умовах особливо складно домогтися стабільної величини та рівномірності повітряного зазору особливо під час експлуатації ГГ. Розмір та значення асиметрії та нерівномірного розподілу повітряного зазору в значній мірі визначають фактичні характеристики ГГ та його поведінку в процесі експлуатації, а також істотно впливають і на ряд інших характеристик машини: на значення торцевих магнітних потоків і втрат, які мають місце в крайніх пакетах осердя і натискних плитах статора, на значення і розподіл втрат на поверхні полюсів ротора, а також на області допустимих режимів роботи генераторів. Визначення значення асиметрії та нерівномірності розподілу повітряного зазору тільки за даними контролю повітряного зазору не дозволяє в повній мірі, на працюючій машині, визначити тип дефекту, який призвів до зміни розподілу повітряного зазору. Показано, що збільшення ефективності визначення типів дефектів пов'язаних з аномаліями повітряного зазору є доцільним застосування гібридних сенсорів, які окрім ємнісних сенсорів повітряного зазору в своїй структурі містять додатковий сенсор. Приведено розрахунок додаткової інформаційної складової у вигляді залежності вихідної величини сенсору від параметрів магнітного поля між полюсами ротора та статора.

Ключові слова: гідрогенератор, повітряний зазор, гібридний сенсор, параметри магнітного поля, нерівномірність, аномалія.

Вступ

Важливу роль в розвитку енергетичних комплексів відіграють відновлювальні джерела енергетики (ВДЕ), основними перевагами яких є невичерпність та екологічна чистота. Одним з класично розвинутих в Україні наймасштабніших видів використання ВДЕ є гідроенергетика. Важливим аспектом забезпечення надійності роботи гідро генераторів, що входять до електроенергетичного комплексу України є питання оцінки їх фактичного технічного стану та його постійний контроль, тобто перехід до обслуговування машин за фактичним технічним станом. Вирішення цього завдання має пріоритетне значення для енергетичної галузі України, вирішення якого дозволить забезпечити безперебійну експлуатацію електрообладнання ОЕС України, особливо в умовах війни та ведення військових дій коли необхідно в короткий час оцінити фактичний технічний стан та визначити шляхи усунення можливих проблем.

Перехід до обслуговування машин за фактичним технічним станом викликає необхідність в забезпеченні неперервного віброконтролю, але й безпосереднього контролю параметрів критично-важливих вузлів та агрегатів машини. Одним із таких параметрів для ГГ є значення повітряного

зазору та його рівномірність. Розмір та значення асиметрії та нерівномірного розподілу повітряного зазору в значній мірі визначають фактичні характеристики потужних гідрогенераторів (ГГ) та їх поведінку в процесі експлуатації, а також істотно впливають і на ряд інших характеристик машини: на значення торцевих магнітних потоків і втрат, які мають місце в крайніх пакетах осердя і натискних плитах статора, на значення і розподіл втрат на поверхні полюсів ротора, а також на області допустимих режимів роботи генераторів. Значення повітряного зазору контролюють під час планових оглядів та ремонтів гідроагрегату за допомогою спеціальних щупів або сенсорів повітряного зазору[1-2].

На працюючих машинах нерівномірність розподілу повітряного зазору спостерігають за вихідними характеристиками машини [3,4]. При цьому на вихідні характеристики безпосередньо впливає не саме значення величини нерівномірності повітряного зазору, а саме асиметричний розподіл магнітного поля на різних полюсах ротора внаслідок виникнення дефекту. Природа виникнення дефекту може мати різне походження і бути пов'язаною з факторами механічного[5-7] (дефект підшипників, небаланс ротора), гідравлічного [8-13] (несиметричні сили на робочому колесі турбіни) та електромагнітного [14-16] (тангенціальні складові сил магнітної взаємодії, які деформують осердя статора, обод та ротор під час роботи, особливо в перехідних режимах, обрив стержнів та короткозамикаючих кілець обмотки ротора, міжвиткові замикання і обрив фази обмотки статора, перегрів осердя та обмотки статора та, тощо) походження, а також може виникнути в результаті несиметричності роботи генератора на несиметричне навантаження.

Метою статті розрахунок залежності інформаційної складової додаткового сенсору, який є частиною гібридного сенсору повітряного зазору від параметрів магнітного поля між полюсами ротора та статора.

Основна частина

Ідентифікація дефекту повітряного зазору і природи його походження потребує окрім контролю повітряного зазору, також забезпечувати контроль величин магнітних потокозчеплень між полюсами ротора та статора. Такий контроль можливо здійснити застосувавши або додаткові сенсори або доповнивши структуру створених емнісних сенсорів додатковим чутливим елементом. Таким додатковим сенсором є сенсор магнітного поля. Сенсор магнітного поля може бути реалізований на ефекті Холла, але такому рішенню притаманні недоліки пов'язані із необхідністю формування в структурі сенсора повітряного зазору складної структури чутливого елементу. Більш простим в реалізації чутливого елементу є використання ефекту, який спостерігається під час дії магнітного поля на виток, який являє собою індукційний перетворювач. Виток в конструкції сенсора можливо реалізувати у вигляді стрічки розміщеної по периметру плати сенсора, як це зображено на рис. 1, або реалізувати у вигляді окремо виготовленої котушки, яка монтується на поверхню сенсора за допомогою спеціального клею. Градування такого типу сенсору можливо за допомогою методу безпосередньої оцінки із використанням в якості міри котушки Гельмгольца.

Вихідною величиною сенсору, яка пропорційна величині магнітного поля в повітряному зазору є значення ε ЕРС, яке утворюється в контурі під дією змінного магнітного поля. У відповідності до закону електромагнітної індукції, значення ε ЕРС у контурі залежить від зміни величини магнітного потоку та розраховується як

$$\varepsilon = -\Delta\Phi/\Delta t \quad (1)$$

Оскільки магнітний потік через контур пропорційний струму I , який виникає в електричному колі утвореному контуром, то

$$\Phi = k_L \cdot I \quad (2)$$

де k_L – коефіцієнт пропорційності, який залежить від геометрії кола утвореного контуром, але не залежить від току, який протікає в колі.

Підставивши вираз (1) в вираз (2) отримаємо вираз для визначення значення ε ЕРС у контурі

$$\varepsilon = -k_L \cdot \Delta I/\Delta t \quad (3)$$

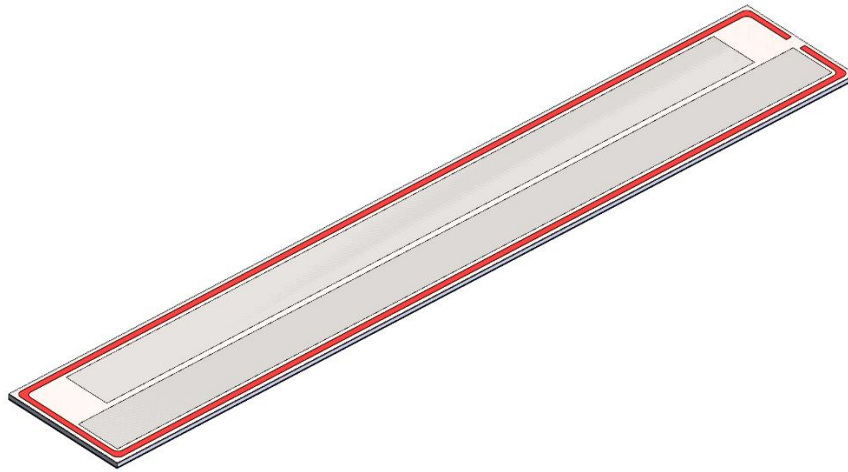


Рис. 1 Схема розміщення додаткового сенсору в структурі ємнісного сенсору

З іншого боку, максимальне значення величини ε ЕРС, яке може бути наведеним у контурі за умови рівномірного повітряного зазору дорівнює [17]:

$$\varepsilon = B \cdot l \cdot v \quad (4)$$

де B – індукція в повітряному зазорі; l – активна довжина контуру розміщеного в повітряному зазорі; v – швидкість зміни поля відносно контуру.

Враховуючи, що на відміну від інших генеруючих машин гідрогенератори мають свої особливості, серед яких є характерна геометрія активної зони (діаметр ротору значно перевищує його довжину), а також наявність значної кількості полюсів, як на роторі так і на статорі, що обумовлено насамперед меншою швидкістю обертання, на відміну від наприклад потужних турбогенераторів, параметри магнітного потоку в повітряному зазорі між ротором та статором, залежать від конструктивних параметрів активної зони.

Враховуючи, що ротори потужних гідрогенераторів мають більше ніж дві пари полюсів, швидкість v зміни поля визначиться як

$$v = 2 \cdot \tau \cdot f \quad (5)$$

де τ – полюсне ділення; f – частота наведеної ЕРС в контурі.

Як відомо, для мережі 50 Гц, якою є мережа ОЕС України, частота наведеної ЕРС в контурі розраховується як

$$f = \frac{p \cdot n}{60}, \quad (6)$$

де p – кількість полюсів гідрогенератора; n – швидкість обертання ротора; τ – значення полюсного ділення

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}, \quad (7)$$

де D – внутрішній діаметр статора.

Підставивши вираз (6) та (7) у (5) отримаємо

$$v = 2 \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \cdot \frac{p \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}, \quad (8)$$

Підставивши вираз (8) у (4) максимальне значення величини ε ЕРС запишеться у наступному вигляді

$$\varepsilon = B \cdot l \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (9)$$

Значення індукції B в гладкому зазорі шириною d_{vz} магніторушійна сила (МРС), якої дорівнює F у відповідності із законом повного току

$$B = \mu_0 \cdot F / d_{vz} \quad (10)$$

де μ_0 – діелектрична проникність середовища.

В реальних конструкціях індукції B вздовж зазору є нерівномірною для забезпечення гармонійної зміни ЕРС в обмотці статора. Це забезпечується застосування меншого діаметру для полюсів ротора чим для розточення осердя. В цьому разі величина повітряного зазору поступово збільшується від середини башмака полюса до його країв [18]. Досягти повністю гармонійного розподілу B такими конструктивними методами не вдається, тому в осерді статора індуються основні та вищі гармоніки ЕРС відповідно. Враховуючі, що ЕРС утворене вищими гармоніками становить величину другого порядку малості для проведення подальших розрахунків будемо враховувати лише основну гармоніку ЕРС. Відміну реального розподілу B від прийнятого для розрахунків розподілу основної гармоніки поля збудження B_{fm1} до дійсного максимального значення поля збудження B_{fm} позначають коефіцієнтом форми поля збудження k_f та розраховують за наступним співвідношенням

$$k_f = \frac{B_{fm1}}{B_{fm}} \quad (11)$$

Величина коефіцієнта k_f залежить від значень максимального та мінімального повітряних зазорів та конструктивних параметрів полюса, які впливають на форму поля. За замовчуванням значення коефіцієнта k_f обирається в діапазоні значень від 0,95 до 1,15.

Враховуючи вище зазначене та співвідношення (10) амплітудне значення основної гармоніки поля збудження може бути розраховано [19], як:

$$B_{fm1} = k_f \cdot B_{fm} = \frac{\mu_0}{k_d \cdot k_{\mu d} \cdot d_{vz}} \cdot F \cdot k_f \quad (12)$$

де $F = \frac{\omega_f \cdot i_f}{2 \cdot p}$ – ЕРС обмотки збудження одного полюсу; ω_f – кількість витків обмотки збудження; i_f – струм збудження.

У випадку, коли вісь полюсу та центр сенсору будуть розташовані на одній лінії, будемо мати максимальне значення ЕРС в контурі, тобто

$$B = B_{\max} = B_{fm1} \quad (13)$$

Тоді, підставивши (12) в (9) з урахуванням (13) отримаємо

$$\varepsilon = \frac{\mu_0}{k_d \cdot k_{\mu d} \cdot d_{vz}} \cdot \frac{\omega_f \cdot i_f}{2 \cdot p} \cdot k_f \cdot l \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (14)$$

Прирівнявши (5) та (2) визначаємо максимальне значення струму I , яке може протікає в контурі

$$\Delta I = -k_f \cdot l \cdot k_L \cdot \Delta t \frac{\mu_0}{k_d \cdot k_{\mu d} \cdot d_{vz}} \cdot \frac{\omega_f \cdot i_f}{2 \cdot p} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (15)$$

Враховуючі значення отримані із сенсорів вигляді витка та співвідношення (14) та (15) можна отримати розподілення повітряного зазору між ротором і статором.

Висновки

Показано, що підвищення якості ідентифікації дефектів повітряного зазора ГГ і природи його походження є необхідним окрім контролю повітряного зазору, ще й здійснювати контроль додаткових величин, серед яких параметри магнітного поля між полюсами ротора та статора. Запропонована гібридна структура сенсора, яка утворюється за допомогою розміщення в структурі існуючих сенсорів повітряного зазору додаткового сенсора. Визначено залежність вихідної величини додаткового сенсора виготовленого у вигляді витка від параметрів магнітного поля між полюсами ротора та статора. Використовуючи кореляційний аналіз даних отриманих із ємнісних сенсорів повітряного зазору та додаткового сенсора можна визначити наявність дефектів пов'язані із факторами механічної або електромагнітної природи, які впливають на механічні та магнітні параметри повітряного зазору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ie. Zaitsev and A. Levytskyi Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. *Clean Generators - Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators* : монографія/ за ред. Dr. A. Ebrahimi. 200 p.: Intechopen, 2020, P. 25-42. DOI: 10.5772/intechopen.77988.
- [2] Ie.O. Zaitsev, A.S. Levytskyi, A.I. Novik, V.O. Berezhnychenko, and A.M. Smyrnova Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*, 78(2):5-18 (2019) Pp.173-180. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80>.
- [3] Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин и В.Е. Вавилов, Влияние неравномерности воздушного зазора на ЭДС синхронного генератора переменного тока. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2013, №9 (4), С. 54-60.
- [4] Б. Геллер и В. Гамата Высшие гармоники в асинхронных машинах; пер. сангл. З.Г. Каганова. Москва: Энергия, 1981. 351 с.
- [5] V. Roda-Casanova and F. Sanchez-Marin Contribution of the deflection of tapered roller bearings to the misalignment of the pinion in a pinion-rack transmission. *Mech. Mach. Theory*. 2017. Vol.109. Pp. 78-94.
- [6] M. Chouksey, J.K. Dutt and S.V. Modak Modal analysis of rotor-shaft system under the influence of rotor-shaft material damping and fluid film forces. *Mech. Mach. Theory*. 2012. Vol.48(1). Pp.81-93.
- [7] N. Kishor, S.P. Singh and A.S. Raghuvanshi Dynamic simulations of hydro turbine and its state estimation based LQ control. *Energ. Convers. Manage.* 2006. Vol.47(18-19). Pp.3119-3137.
- [8] N. Kishor Nonlinear predictive control to track deviated power of an identified NNARX model of a hydro plant. *Expert. Syst. Appl.* 2008. Vol.35(4). Pp.1741-1751.
- [9] B.B. Xu, D.Y. Chen and S. Tolo Model validation and stochastic stability of a hydro-turbine governing system under hydraulic excitations. *Int. J. Elec. Power*. 2018. Vol.95. Pp.156-165.
- [10] Y. Zeng, L. Zhang, Y. Guo, J. Qian and C. Zhang The generalized Hamiltonian model for the shafting transient analysis of the hydro turbine generating sets. *Nonlinear Dynam.* 2014.Vol.76(4). Pp.1921-1933
- [11] C. Trivedi, M.J. Cervantes, B.K. Gandhi, and O.G. Dahlhaug Transient pressure measurements on a high head model francis turbine during emergency shutdown, total load rejection, and runaway. *J. Fluid. Eng.- T. ASME*. 2014.Vol.136(12) Pp. 121107-12107 -18. DOI: 10.1115/1.4027794
- [12] J.I. Sarasúa, J.I. Pérez-Díaz, J.R. Wilhelmi and J.Á. Sánchez-Fernández Dynamic response and governor tuning of a long penstock pumped-storage hydropower plant equipped with a pump-turbine and a doubly fed induction generator. *Energ. Convers. Manage.* 2015. Vol.106 Pp.151-164.
- [13] H.V. Pico, J.D. McCalley, A. Angel and R. Leon Analysis of very low frequency oscillations in hydro-dominant power systems using multi-unit modeling. *IEEE T. Power Syst.* 2012. Vol.27(4) Pp.1906-1915.
- [14] K.N. Srivastava and S.C. Srivastava Application of Hopf bifurcation theory for determining critical value of a generator control or load paramete. *Int. J. Elec. Power*. 1995. Vol.17(5) Pp.347-354.
- [15] H.H. Li, D.Y. Chen, H. Zhang, C.Z.Wu and X.Y. Wang Hamiltonian analysis of a hydro-energy generation system in the transient of sudden load increasing. *App. Energ.* 2017. Vol.185 Pp.244-53.
- [16] V. Roda-Casanova and F. Sanchez-Marin Contribution of the deflection of tapered roller bearings to the misalignment of the pinion in a pinion-rack transmission. *Mech. Mach. Theory*. 2017. Vol.109 Pp.78-94.
- [17] П.С. Сергеев Электрические машины. Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1955. 256 с.
- [18] А.Я. Бергер Синхронные машины. Москва: ГОНТИ, 1938. 662 с.
- [19] А.И. Вольдек и В.В. Попов Электрические машины. Машины переменного тока. Москва: Питер, 2008. 349 с.

REFERENCES

- [1] Ie. Zaitsev and A. Levytskyi Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. *Clean Generators - Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators* : монографія/ за ред. Dr. A. Ebrahimi. 200 p.: Intechopen, 2020, P. 25-42. DOI: 10.5772/intechopen.77988.
- [2] Ie.O. Zaitsev, A.S. Levytskyi, A.I. Novik, V.O. Berezhnychenko, and A.M. Smyrnova Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*, 78(2):5-18 (2019) Pp.173-180. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80>.
- [3] F.R. Ismagilov, I.Kh. Khairullin and V.E. Vavilov, Influence of air gap non-uniformity on the EMF of a synchronous alternator. *Electrotechnical and information complexes and systems*. 2013, No. 9 (4), pp. 54-60.
- [4] B. Geller and V. Gamata Higher harmonics in asynchronous machines; per. English Z.G. Kaganov. Moscow: Energy, 1981. 351 p.
- [5] V. Roda-Casanova and F. Sanchez-Marin Contribution of the deflection of tapered roller bearings to the misalignment of the pinion in a pinion-rack transmission. *Mech. Mach. Theory*. 2017. Vol.109. Pp. 78-94.
- [6] M. Chouksey, J.K. Dutt and S.V. Modak Modal analysis of rotor-shaft system under the influence of rotor-shaft material damping and fluid film forces. *Mech. Mach. Theory*. 2012. Vol.48(1). Pp.81-93.
- [7] N. Kishor, S.P. Singh and A.S. Raghuvanshi Dynamic simulations of hydro turbine and its state estimation based LQ control. *Energ. Convers. Manage.* 2006. Vol.47(18-19). Pp.3119-3137.
- [8] N. Kishor Nonlinear predictive control to track deviated power of an identified NNARX model of a hydro plant. *Expert. Syst. Appl.* 2008. Vol.35(4). Pp.1741-1751.
- [9] B.B. Xu, D.Y. Chen and S. Tolo Model validation and stochastic stability of a hydro-turbine governing system under hydraulic excitations. *Int. J. Elec. Power*. 2018. Vol.95. Pp.156-165.
- [10] Y. Zeng, L. Zhang, Y. Guo, J. Qian and C. Zhang The generalized Hamiltonian model for the shafting transient analysis of the hydro turbine generating sets. *Nonlinear Dynam.* 2014.Vol.76(4). Pp.1921-1933
- [11] C. Trivedi, M.J. Cervantes, B.K. Gandhi, and O.G. Dahlhaug Transient pressure measurements on a high head model francis turbine during emergency shutdown, total load rejection, and runaway. *J. Fluid. Eng.- T. ASME*. 2014.Vol.136(12) Pp.

121107-12107 -18. DOI: 10.1115/1.4027794

[12] J.I. Sarasúa, J.I. Pérez-Díaz, J.R. Wilhelmi and J.Á. Sánchez-Fernández Dynamic response and governor tuning of a long penstock pumped-storage hydropower plant equipped with a pump-turbine and a doubly fed induction generator. *Energ. Convers. Manage.* 2015. Vol.106 Pp.151-164.

[13] H.V. Pico, J.D. McCalley, A. Angel and R. Leon Analysis of very low frequency oscillations in hydro-dominant power systems using multi-unit modeling. *IEEE T. Power Syst.* 2012. Vol.27(4) Pp.1906-1915.

[14] K.N. Srivastava and S.C. Srivastava Application of Hopf bifurcation theory for determining critical value of a generator control or load paramete. *Int. J. Elec. Power.* 1995. Vol.17(5) Pp.347-354.

[15] H.H. Li, D.Y. Chen, H. Zhang, C.Z.Wu and X.Y. Wang Hamiltonian analysis of a hydro-energy generation system in the transient of sudden load increasing. *App. Energ.* 2017. Vol.185 Pp.244-53.

[16] V. Roda-Casanova and F. Sanchez-Marin Contribution of the deflection of tapered roller bearings to the misalignment of the pinion in a pinion-rack transmission. *Mech. Mach. Theory.* 2017. Vol.109 Pp.78-94.

[17] P.S. Sergeev Electrical machines. Leningrad: State Energy Publishing House, 1955. 256 p.

[18] A.YA. Berger Synchronous machines. Moscow: GONTI, 1938. 662 p.

[19] A.I. Voldek and V.V. Popov Electrical machines. AC machines. Moscow: Piter, 2008. 349 p.

Зайцев Євген Олександрович – д-р техн. наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу теоретичної електротехніки та діагностики електротехнічного обладнання, e-mail: zaitsev@i.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3303-471X>

Березниченко Вікторія Олександрівна – молодший науковий співробітник відділу теоретичної електротехніки та діагностики електротехнічного обладнання, email: vika.bereznichenko@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9961-1703>

Інституту електродинаміки НАН України

Ie. O. Zaitsev
V.O. Bereznichenko

Hybrid Sensor for Determining Air Gap Anomalies in Synchronous Generators

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

In the paper shows, that from the moment of the start of production until the moment of final decommissioning, a number of physico-chemical and thermomechanical processes take place in the structural elements of powerful hydrogen generators (HG) in its rotating and non-rotating structural elements. Over time, these processes lead to a change in the actual technical condition of the HG nodes and the development of defects that affect the efficiency of the HG. The determination of the actual technical condition of HG based on the evaluation of a complex of control and diagnostic parameters of various nature, which include electrical, mechanical, temperature, magnetic, and technological parameters. The reliability of determining the actual technical condition, determining the presence of defects in the facility, assessing the possibility of further use of the energy facility depends on how fully the controlled parameters reflect its actual technical condition. The air gap between the rotor and the stator is one of the main nodes of the HG, in which the mechanical energy of the water pressure transformed into electrical energy. The design feature of the air gap in the HG is its relatively small size compared to the bore diameter of the stator. The size and value of the asymmetry and uneven distribution of the air gap largely determine the actual characteristics of the HG and its behavior during operation, and significantly affect a number of other characteristics of the machine (Value of the end magnetic fluxes and losses that occur in the extreme packages of the core and pressure plates of the stator; on the value and distribution of losses on the surface of the rotor poles; as well as on the area of permissible modes of operation of the generators). Determining the value of asymmetry and uneven distribution of the air gap only based on the data of the air gap control does not allow to fully determining the type of defect that led to the change in the air gap distribution on a working machine. For increase the efficiency of determining the types of defects associated with air gap anomalies, it is advisable to use hybrid sensors, which, in addition to capacitive air gap sensors, contain an additional sensor in their structure was shown. The calculation of the additional information component in the form of EMF is given.

Keywords: hydrogen generator, air gap, hybrid sensor, magnetic field parameters, unevenness, anomaly.

Zaitsev Ievgen O. – Dr. Sc. (Eng.), senior researcher, head of the department of theoretical electrical engineering and diagnostics of electrical equipment, e-mail: zaitsev@i.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3303-471X>

Bereznichenko Victorii O. – junior researcher at the Department of Theoretical Electrical Engineering and Diagnostics of Electrical Equipment, email: vika.bereznichenko@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9961-1703>