

Аналітичний огляд
доповідей, наданих дослідним комітетом SC-A1 “Rotating electrical machines”
 (“Обертові електричні машини”) на електронну сесію CIGRE-2020.

О. Агамалов, д.т.н.

На електронну сесію CIGRE-2020 дослідним комітетом SC-A1 “Rotating electrical machines” (“Обертові електричні машини”) було надано 25 доповідей, відображаючих світові (представлені доповіді авторами з Європи, Північної та Південної Америк, Азії, Австралії, Японії, Китаю, Індії) актуальні напрямки розвитку по даній тематиці. Далі коротко проаналізовано зміст кожної з доповідей, виконано узагальнення основних напрямків робіт, а також окремо виділені роботи, які на думку автора даного огляду, є актуальними для об’єднаної енергосистеми (ОЕС) України на її сучасному етапі розвитку.

1. Доповідь A1-101, “Is reliance on synchronous machines holding back the evolution of the power grid to facilitate renewables?” або в перекладі «**Чи стримує залежність від синхронних машин еволюцію енергосистеми для полегшення використання відновлюваних джерел енергії**».

Розглянута парадигма керування електроенергетичної системи (ЕЕС), в якій генеруюча потужність забезпечується без синхронних машин (СМ), виключно за рахунок відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), більшу частину навантаження якої складають електронні пристрої, що можуть працювати в широких діапазонах робочих частот та напруг, тобто є стійкими в роботі при більших відхиленнях частоти та напруги живлення. Наприклад, якщо в європейському стандарті передбачено допустиме відхилення частоти ± 0.8 Гц, австралійським ± 1 Гц, то в Тасманії нормується відхилення частоти в енергосистемі ± 2 Гц. Запропоновано модулювати потужність споживачів в залежності від виробітку електроенергії ВДЕ.

2. Доповідь A1-102, “The benefits of implementing Synchronous Compensators in grids with high penetration of Renewables ” або в перекладі «**Переваги застосування синхронних компенсаторів в мережах зі значним проникненням відновлюваних джерел енергії**».

В даній роботі відображається ключова роль синхронних компенсаторів (СК) для забезпечення стійкої роботи ЕЕС зі значним заміщенням генеруючих потужностей СМ на ВДЕ. Основні функції, які СК можуть забезпечити для ЕЕС зі значними генеруючими потужностями ВДЕ це створення додаткового резерву інерції, підтримання резерву по реактивній потужності та жорсткості (рівня струмів короткого замикання (СКЗ)) в ЕЕС. Розглянуто основні характеристики СК, що впливають на вирішення вищевказаних задач, та виконано порівняння обертових СК зі статичними СК на основі елементів силової електроніки. Вказано, що серед переваг обертових СК є можливість обладнання їх додатковими обертовими масами (маховиками), що дозволяє суттєво збільшити їх постійну інерцію (наприклад для СК потужністю 250 МВАр за рахунок додаткового маховика постійна інерція може бути збільшена з 1.8 с до 16 с) та збільшення жорсткості ЕЕС, забезпечуючи необхідні рівні СКЗ. В той же час відмічається, що статичні СК з системами накопичення електроенергії BESS (battery energy storage system) в порівнянні з обертовими СК можуть забезпечити регулювання частоти та балансу потужності. Також розглянута можливість використання існуючих агрегатів ГЕС та ТЕС в режимі СК. Виконано моделювання (на прикладі тестової моделі IEEE) можливості забезпечення при нормованих збуреннях стійкої роботи ЕЕС при заміщенні всіх СМ комплексом генеруючих потужностей у складі ВДЕ, обертових СК та систем накопичення електроенергії BESS.

3. Доповідь A1-201, “ Experimental Study of Vibration Sparking Erosion on Stator Bars” або в перекладі «Експериментальне дослідження віброіскрової ерозії стрижнів статора».

Розглянуті теоретично та змодельовані на експериментальній установці фізичні процеси виникнення віброіскрової ерозії стрижнів статора СМ як суми двох складових:

- наведення індукційних струмів, що протікають уздовж напівпровідного шару стрижня;
- вібрації стрижня в пазу статора.

Віброіскрова ерозія (ВІЕ) стрижнів статора СМ є результатом переривання наведених індуктивних струмів внаслідок вищевказаних процесів та може серйозно пошкодити напівпровідний шар стрижня статора. Паразитний струм, що протікає в напівпровідниковому шарі, визначається поверхневим опором та індукованою напругою на напівпровідниковому шарі та концентрується на краю кожної зони контакту на початковій стадії ерозії. Результати випробувань показують, що процес розвитку ВІЕ на поверхні стрижня статора мав три стадії. Перша стадія мала низьку інтенсивність іскроутворення. Друга стадія мала високу інтенсивність іскроутворення з великим пошкодженням напівпровідного шару. Третя стадія мала дуже низьку інтенсивність іскроутворення через накопичення залишків вуглецю, що порушувало паразитну петлю струму.

4. Доповідь A1-202, “ Supervised and Unsupervised Machine Learning Techniques Applied to SCADA and Vibration Data for Diagnostics and Prognostics of Two Wind Turbines’ Drivetrains” або в перекладі «Контрольовані та неконтрольовані техніки машинного навчання, що застосовуються до даних SCADA та вібрації для діагностики та прогнозування приводів двох вітрогенераторів».

Розглянуто використання чотирьох алгоритмів машинного навчання для діагностики технічного стану трансмісії двох вітрогенераторів і, таким чином, зменшення вартості їх технічного обслуговування та ремонту (ТОiP), збільшення ресурсу та прибутку їх роботи. Визначено, що для кластеризації, класифікації технічного стану та виявлення дефектів трансмісії двох вітрогенераторів з використанням вибірок даних з кількома змінними краще використовувати такі методи, як KNN, K-Means та GMM. З іншого боку, для прогнозування технічного стану на основі отриманих даних найкраще підходить такий алгоритм, як ARIMA. Це дослідження також показало, що навіть при відносно невеликому наборі даних можна математично прогнозувати зміну багатьох фізичних параметрів компонентів трансмісії, таких як вібрація та температура.

5. Доповідь A1-203, “ Evaluation of the Behavior of Partial Discharges in Generator Heating and Operating Range Tests” або в перекладі «Оцінка поведінки часткових розрядів при випробуваннях генератора на нагрів та в роботі».

Розглянуто вимірювання часткових розрядів (ЧР) в статорі потужного гідрогенератора (611 МВт) ГЕС «Belo Monte» (Бразилія) при його випробуваннях на нагрів та в роботі, в процесі проведення пусконаладжувальних робіт та зміні потужності до номінального значення. Наголошується, що для об'єктивної оцінки ЧР необхідно враховувати різні фактори, такі як вібрація, температура, цикл навантаження, та інші, що впливають на вимірювання ЧР.

6. Доповідь A1-204, “The evolution of the maintenance processes increases the operational availability and contribute to the operational efficiency of Itaipu Power Plant” або в перекладі «Розвиток процесів технічного обслуговування збільшує експлуатаційну готовність та сприяє оперативній ефективності електростанції Ітайпу».

В роботі розглянута оптимізація процесів технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) та, як результат, підвищення ефективності однієї з потужніших електростанцій світу ГЕС «Ітайпу» (Бразилія-Парагвай) (14 ГВт), що досягнуто за рахунок:

- попередження затримок при виконанні періодичних ТОіР;
- скорочення часу простою для виконання корегуючих та профілактичних робіт;
- зменшення кількості і часу простою внаслідок відмов в роботі обладнання.

Наведені дані, що до 2012р. час, необхідний для проведення ТОіР агрегатів ГЕС складав в середньому 290 діб на рік, а після оптимізації процесів ТОіР відповідно 173 доби на рік, тобто фактично час простою скорочено приблизно на 40 %. Це дозволило ГЕС «Ітайпу» першій в світі виробити > 100 ГВт*год електроенергії за рік (у 2016р. виробіток електроенергії склав 103.098 ГВт*год).

7. Доповідь A1-205, “Partial discharge characterization of stator windings taken from a hydro generator after 50 years of service” або в перекладі «Характеристики часткових розрядів обмотки статора гідрогенератора після 50 років експлуатації».

Розглянуті характеристики часткових розрядів в обмотці статора гідрогенератора після 50 років експлуатації, виміряні на частотах прикладеної напруги 0.1 Гц та 50 Гц.

8. Доповідь A1-206, “Features of the design and operating modes of the asynchronized turbogenerator T3FSU-320” або в перекладі «Особливості конструкції та режимів роботи асинхронного турбогенератора ТЗФСУ-320».

Розглянуті особливості конструкції та режимів роботи (асинхронний, асинхронізований, синхронний) асинхронізованого турбогенератора ТЗФСУ-320 потужністю 320 МВт, введеного в експлуатацію на енергоблоці №3 Каширській ТЕС (Росія) з грудня 2009 року. Відмічаються його наступні особливості:

- генератор виконаний з асиметричними обмотками збудження. Головна обмотка збудження по поздовжній осі d виконана зі 100% магнітно-рушійною силою (МРС), а регулююча обмотка по поперечній осі q має 7% МРС від основної обмотки.
- система охолодження турбогенератора змішана: пряме повітряне охолодження обмотки ротора та непряме водяне охолодження сердечника та обмотки статора.
- максимальне підвищення температури притискної пластини, обмотки та сердечника статора за будь-якого робочого режиму не перевищує допустимі значення.
- система збудження та керування забезпечує роботу в синхронному та асинхронному (без збудження) режимах роботи.
- аналіз режимів роботи турбогенератора показує, що він може працювати в широкому діапазоні значень по реактивної потужності як за умов видачі, так і споживання реактивної потужності.
- асинхронізований турбогенератор сприяє поліпшенню керування режимами роботи енергосистеми з точки зору підтримання необхідних рівнів напруги та контролю потоків реактивної потужності, а також підвищення стійкості та надійності роботи.

9. Доповідь A1-207, “A Study on the Resonance Problems and Anti-Vibration Design of Large Vertical Motor-Pump set” або в перекладі «Дослідження проблем резонансу та антивібраційного конструювання великого вертикального насосного агрегату».

Розглянуті конструктивні методи попередження резонансу великих вертикальних насосних та компресорних агрегатів, а саме:

- збільшення або зменшення жорсткості конструкції для уникнення резонансу.
- приєднання додаткової маси для зменшення частоти резонансу.

- мінімізація дисбалансу та балансування електромагнітного поля в зазорі двигуна.
- встановлення динамічного поглинача.

10. Доповідь A1-208, “Motor Maintenance Management for Power Plant Operation Reliability with Work Optimization by on-line Condition Based Monitoring” або в перекладі «Управління технічним обслуговуванням двигуна для надійності роботи електростанції з оптимізацією роботи на основі моніторингу в роботі».

Розглянуто процес ТОiP електродвигуна що базується на даних моніторингу технічного стану в роботі (аналіз гармонійного складу струмів статора, даних системи вібромоніторингу та термоконтролю).

11. Доповідь A1-210, “Optimization of turbogenerator’s core suspension system reconstruction methods for life time extension in the power plant conditions” або в перекладі «Оптимізація методів реконструкції системи підвіски заліза статора турбогенератора для продовження терміну служби в умовах електростанції».

Розглянуті недоліки конструкції системи підвіски сердечника (заліза) статора турбогенераторів серії ТГВ-200, 300 з водневим охолодженням виробництва заводу «Електротяжмаш» (м. Харків, Україна) та шляхи вирішення даної проблеми в умовах електростанції. Отримані практичні результати досліджень. Зокрема було встановлено, що при нормальному технічному стані заліза статора його натуральна частота коливань перевищує подвійну частоту коливань мережі (50 Гц), з якою магнітні сили впливають на статор. В той самий час, порушення жорсткості конструктивного зв'язку між активним залізом статора та конструктивними елементами корпусу статора призводить до зменшення даної власної частоти коливань та її наближення до частоти другої гармоніки 100 Гц, викликаючи тим самим резонансний ріст "магнітних" коливань статора. Багаторазові розрахунки різних способів підвищення сердечника статора здійснювались за допомогою розробленої математичної моделі. Метою було довести вибір найкращої технології ремонту шляхом оптимізації схеми установка додаткових кріпильних елементів заліза статора.

12. Доповідь A1-211, “A study of the drop test to detect damper faults and sensitivity analysis in order to identify the parameters that have an impact on the test results” або в перекладі «Дослідження методом вимірювання падіння напруги для виявлення дефектів демпферної обмотки та аналізу чутливості з метою виявлення параметрів, що впливають на результати випробувань».

В роботі розглянута можливість розширеної інтерпретації випробувань обмотки ротора гідрогенератора для пошуку короткозамкнених витків шляхом вимірювання падіння напруги на ділянках обмотки ротора для виявлення дефектів демпферної обмотки (тріщини, порушення цілостності демпферної обмотки). В основі запропонованої інтерпретації результатів даних випробувань лежить ефект тяжіння полюсів ротора при подачі напруги на обмотку або ділянки обмотки ротора. Теоретичні дослідження були виконані методом кінцевих елементів, та отримані наступні основні висновки:

- тріщину або зламаний стрижень демпферної обмотки можна виявити за допомогою тесту на падіння напруги в обмотці ротора лише якщо випробування проводяться при введеному роторі в статор гідроагрегата.
- тріщина або зламаний стрижень демпферної обмотки знаходяться зі сторони полюса.
- зламаний стрижень демпферної обмотки призводить до збільшення падіння напруги на полюсі, тоді як короткозамкнуті витки ротора на даному полюсі призводять до зменшення падіння напруги, що дозволяє розрізнити ці дві деградації.
- збільшення падіння напруги вище, якщо демпферна обмотка на полюсі не замкнута.
- обмотка статора впливає на результат випробування, але вона досить незначно.

13. Доповідь A1-212, “Potential of VLF PD measurements for diagnosis of stator insulation of large hydro generators” або в перекладі «Потенціал вимірювань ультра низькочастотних часткових розрядів для діагностики ізоляції статора великих гідрогенераторів».

Розглянута методика вимірювання часткових розрядів на частоті 0.1 Гц в обмотках статорів потужних гідрогенераторів, що дозволяє використовувати менш потужні випробувальні установки. Ще в 1960-х рр. тести УНЧ (ультра низька частота, що зазвичай означає частоту 0,1 Гц) вивчались як альтернатива тестам постійного струму, які раніше використовували на статорах великих синхронних генераторів. Випробування УНЧ показали себе цікавою альтернативою випробуванням постійного струму, оскільки розподіл напруги в ізоляції на УНЧ значно краще відповідає умовам роботи. Через значно нижчу потребу реактивної потужності для випробувань з УНЧ порівняно з випробуваннями з робочою частотою, джерела УНЧ потенційно також менші і, отже, більш мобільні. Основна увага в цьому дослідженні зосереджена на застосуванні діагностики часткового розряду (ЧР) статорів на УНЧ. Для цього типові дефекти ізоляції статора моделюються чисельно, щоб дослідити частотні відмінності в поведінці ЧР. Результати цих моделювань добре збігаються з вимірюваннями ЧР в статорі, а також окремих стрижнів статора. Показано, що УНЧ вимірювання ЧР має значно меншу чутливість, ніж вимірювання на робочій частоті, для практично значних проблем із ізоляцією (пошкодження, прорізу або торцевої корони). Отже, для систем ізоляції статора слюда/синтетичні смоли, що використовуються в даний час, вимірювання ЧР на робочій частоті залишаються головним діагностичним інструментом.

14. Доповідь A1-213, “Evaluation of High Voltage Isolation Systems Electrodynamic Meaning of Typically Specified Tests” або в перекладі «Електродинамічна оцінка типово заданих високовольтних випробувань ізоляційних систем».

Розглянуті основи проведення типових високовольтних випробувань та вимірювань з фізичної точки зору, використовуючи такі фізичні параметри ізоляції як поляризація, діелектрична проникність, релаксація, коефіцієнт втрат. Розглянута концептуальна та семантична різниця між ізолятором та діелектриком. Визначено, що для ізоляційного матеріалу його властивістю вважається можливість переривати електричний струм. Тоді як для діелектрика спостерігається його здатність накопичувати енергію, пов'язану з явищем поляризації та релаксації його молекулярної структури. У цьому контексті вплив температури включається в її здатність розширювати орбітальний об'єм електронів, що у випадку діелектриків має тенденцію послаблювати їх квантові зв'язки з ядром.

15. Доповідь A1-301, “Modern Approaches for the Thermal Design of High Rotational Speed, Air-Cooled Hydro Motor-Generators” або в перекладі «Сучасні підходи до розрахунку теплового режиму швидкісних гідрогенераторів-двигунів з повітряним охолодженням».

Розглянуто детальне 3D комп'ютерне моделювання теплового стану обмоток роторів швидкісних гідрогенераторів-двигунів з двома різними системами повітряного охолодження: з радіальним (від валу ротора до спинки статора) та аксіальним (вздовж валу з забором повітря знизу та до спинки статора) напрямками повітряних потоків.

16. Доповідь A1-302, “Static Eccentricity Fault Detection Method for Electrical Rotating Machines Based on the Magnetic Field Analysis in the Air Gap by Measuring Coils” або в перекладі «Метод визначення статичного ексцентриситету для виявлення несправностей електричних обертових машин на основі аналізу магнітного поля у повітряному проміжку за допомогою вимірювальних котушок».

Розглянуто метод оцінки технічного стану обертових електричних машин на основі інформації про вимірюванні за допомогою котушок параметри магнітного поля в повітряному зазорі та розраховані на їх основі значення статичного ексцентриситету.

Методологія пояснюється за допомогою розрахунків методом скінчених елементів та перевіряється за допомогою вимірювань, проведених на асинхронній машині. Інші методи, що використовуються для виявлення несправностей, в основному засновані на моніторингу таких величин, як струм і вібрація, та їх гармонічному аналізі. Запропонований метод базується на відстеженні змін індукованої напруги вимірювальних котушок, встановлених на зубах статора. Несправності можна виявити та диференціювати на основі середньоквадратичного значення цих напруг та кількості стрибків напруги форми сигналу напруги, тобто без необхідності гармонічного аналізу. Якщо ці котушки встановлені на роторі, можна виявити несправності обмотки статора подібним чином.

17. Доповідь A1-303, “Magnetic Balancing System for Synchronous Machines – A Full Scale Demonstration of Unbalanced Pull Mitigation” або в перекладі «**Система магнітного балансування для синхронних машин – повномасштабне демонстрування зменшення незбалансованого тяжіння ротора**».

Представлено принцип роботи та основні технічні характеристики системи магнітного балансування для синхронної машини потужністю 11 МВт. Для цього, ротор даної синхронної машини був розділений на окремі групи полюсів, в яких струми можуть керуватися незалежно за допомогою сучасних пристроїв силової електроніки. Кожна з п'яти груп полюсів отримувала живлення через свій щітково-контактний апарат (ЩКА). Датчики магнітного потоку встановлені на рівній відстані в розточці статора всередині повітряного проміжку давали необхідну інформацію для системи управління для подачі відповідних компенсаційних струмів в групи полюсів ротору з прив'язкою до положення ротора в статорі. Дана система усуває незбалансовані магнітні сили спричинені різноманітними механічними недоліками. Також в роботі було проведено імітаційне дослідження для 64-полюсного гідрогенератора потужністю 30 МВА. Під час моделювання ротор був розділений на чотири групи по 16 полюсів в кожній групі, а ексцентриситет статора був компенсований. Було зроблено висновок, що побудована система працює за призначенням і практично може усунути незбалансовані сили магнітного тяжіння в синхронній машині. На момент написання статті система напрацювала 1450 годин зі стабільним рівнем компенсації. Моделювання машини на 30 МВА показує, що можливо компенсувати високий рівень нерівномірності магнітного поля в зазорі, визваний різноманітними причинами. Це може бути хорошою альтернативою дорогому механічному відновленню генераторів.

18. Доповідь A1-304, “Technical challenges and solutions for the new Terna’s standardized synchronous condensers/flywheel systems” або в перекладі «**Технічні проблеми та рішення для нових стандартизованих синхронних компенсаторів/маховиків оператора передачі Terna**».

Для покращення жорсткості та інерційності енергосистеми Італії оператор системи передачі компанія Terna прийняла рішення по встановленню 8 синхронних компенсаторів (СК) з технічними характеристиками: повітряне охолодження, частота обертання 3000 хв^{-1} регульовальний діапазон потужності $+250/-125 \text{ МВАр}$, напруга статора 19 кВ, постійна інерція $H = 7\text{с}$, що відповідає моменту інерції $35\,500 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, для чого додатково на валу в вакуумній камері був встановлений маховик (для зниження вентиляційних втрат).

19. Доповідь A1-305, “How To Choose Electric Drive According IEC 60034-1 ?” або в перекладі «**Як вибрати електричний привід відповідно до IEC 60034-1?**».

Стандарт МЭК 60034-1 визначає 10 режимів роботи (S1-S10) електроприводів та рекомендації по вибору електродвигуна. В роботі наведені пропозиції по використанню різноманітних перетворювачів потужності для регулювання швидкості електродвигуна.

20. Доповідь A1-306, “Considerations on IEEE 1310-2012, Numbers of Starts-Stops and Life Time of Stator Windings in Hydro-Generators” або в перекладі «Міркування щодо стандарту IEEE 1310-2012 відносно кількості пусків-зупинок та тривалості експлуатації обмоток статорів гідрогенераторів».

На основі методу випробувань стандарту IEEE 1310-2012 змодельовані можливі механізми старіння ізоляції генератора, що працює при повторюваних режимах «пуск-зупинка». Реальні стрижні обмотки статора гідрогенератора, який під час експлуатації мав приблизно 10000 режимів «пуск-зупинка» були досліджені в лабораторії, а потім порівнянні зі змодельованими відповідно стандарту IEEE 1310-2012 стрижнями обмотки статора, які мали таку ж кількість теплових циклів. Результати свідчать про те, що невеликої кількості теплових циклів відповідно стандарту IEEE 1310-2012 достатньо для створення дефектів, яких не було в стрижнях обмотки статора під час експлуатації. Тобто припущення, що часті режими «пуск-зупинка» можуть спричинити несправність сучасної високовольтної ізоляції обмоток статора великих обертових машин, яке зазвичай зустрічається в технічних специфікаціях, програмах випробувань та обговореннях робочих груп серед експертів не було підтверджено для сучасних систем термореактивної ізоляції стрижнів статора.

21. Доповідь A1-308, “Reliable Stator Coil End Design for Large Turbine Generator” або в перекладі «Надійна конструкція лобових частин котушки статора потужного турбогенератора».

Однією з проблем потужних турбогенераторів є вібрації лобових частин обмотки статора, що нерідко призводить до їх пошкодження та тривалого простою. В роботі розглянута нова конструкція кріплення лобових частин потужного (1000 МВт) турбогенератора, зменшуюча їх вібрацію. Була розроблена нова конструкція з'єднуючого кільця, в якій для протидії вібрації використані мідь-нержавіючі коліна для системи водяного охолодження та виконана модернізація кріплення колекторних труб системи охолодження за рахунок зміни розташування опор що симетрувало окружну жорсткість та зменшило натуральну частоту коливань з'єднуючого кільця. Дана технологія була застосована до реального турбогенератора 1000 МВА та дозволила отримати ефект зменшення вібрації на 23 - 75% порівняно із звичайною конструкцією.

22. Доповідь A1-309, “Impact of the Q-axis Sub-Transient Reactance on the Rotor Oscillations of a Hydro Generator” або в перекладі «Вплив реактанса X_q на коливання ротора гідрогенератора».

В роботі досліджується вплив зміни надперехідного реактансу по поперечній вісі X_q реального гідрогенератора на демпфування коливань ротора. Показано, що правильно налаштований системний стабілізатор PSS системи збудження може компенсувати зміни X_q , що мали місце при ремонті гідрогенератора 95 МВт, 15 кВ.

23. Доповідь A1-310, “The Design and Application of New Fast-response, Large-scaled Rotary Condensers in UHV Power Grid” або в перекладі «Розробка та застосування нових швидкодіючих потужних синхронних компенсаторів в мережі надвисокого класу напруги».

Розглянута конструкція та технічні параметри нового потужного (300 МВАр) синхронного компенсатора, призначеного для встановлення поблизу підстанцій надвисокої напруги.

24. Доповідь A1-311, “Design, Implementation and Field Application of a New Generation Flexible Excitation System for High-Power Synchronous Generators” або в перекладі «Розробка, впровадження та практичне застосування нового покоління гнучких систем збудження для потужних синхронних генераторів».

Для підвищення гнучкості статичних систем збудження розглянута нова структура на основі багаторівневої топології перетворювачів з використанням повністю контрольованих потужних IGBT транзисторів, що дозволило підвищити стельове значення напруги форсування при близьких коротких замиканнях та на шинах

синхронного генератора та забезпечити швидкодіюче керування реактивною потужністю та демпфування коливань в перехідних режимах.

25. Доповідь A1-312, “Failures of Large Turbo-Generator on Prolonged Site Storage – Case Studies of Indian Power Utility” або в перекладі «Відмови Потужних Турбогенераторів Внаслідок Тривалого Зберігання – Приклад енергосистеми Індії».

Розглянуті випадки пошкодження двох турбогенераторів потужністю 250 МВт після їх тривалого зберігання та обстеження подібного третього турбогенератора для попередження пошкодження в енергосистемі Індії. Відмічається, що можливими причинами пошкодження ізоляції в даних турбогенераторах є:

- недостатня консервація статора при тривалому зберіганні перед початком пусконаладжувальних робіт, що призвело до погіршення параметрів ізоляції.
- значна вібрація турбогенераторів при перших пусках, що призвела до зміщення пазової ізоляції стрижнів обмотки статора.
- недостатнє кріплення стрижнів статора, особливо лобових частин.

Надані дослідним комітетом SC-A1 “Rotating electrical machines” (“Оберткові електричні машини”) доповіді розподілені по наступним основним темам:

- використанню СК для покращення динамічних властивостей ЕЕС (збільшення інерційності, жорсткості та рівнів СКЗ) присвячено 3 доповіді. Серед них цікавою видається пропозиція використання додаткового маховика для підвищення постійної інерції СК, розміщеного в вакуумній камері для зниження вентиляційних втрат (доповідь A1-304).
- вимірюванню ЧР для оцінки технічного стану ізоляції обмоток статорів гідрогенераторів присвячено 3 доповіді. З них у доповіді A1-212 відмічено, що вимірювання ЧР на частоті 0.1 Гц потребує меншої потужності вимірювальної установки (менші затрати), але в той же час не дозволяє виявляти можливі дефекти ізоляції, які можуть бути виявлені з використанням вимірювальної установки, що працює на промисловій частоті 50, 60 Гц.
- питанням організації ТОіР оберткових електричних машин присвячено 4 доповіді. Ефективно виглядає оптимізація процесів ТОіР ГЕС «Ітайпу» (Бразилія-Парагвай), що дозволила скоротити час простою гідроагрегатів приблизно на 40% та вперше в світі виробити за рік більш ніж 100 ГВт*год електроенергії на одній електростанції (доповідь A1-204).
- впливу вібрації, методам її вимірювання та усунення в оберткових електричних машинах присвячено 3 доповіді. В доповідях A1-210 та A1-308 розглянуті питання модернізації кріплення лобових частин в турбогенераторах потужністю 200, 300 та 1000 МВт за рахунок зміни конструктивних елементів, що призводить до зменшення натуральної резонансної частоти менше другої гармоніки (100 Гц при номінальній частоті 50 Гц).
- по одній доповіді представлено по наступним темам: можливість ЕЕС зі 100% генеруючою потужністю відновлюваних джерел енергії, конструкції та режимам роботи асинхронизованого турбогенератора ТЗФСУ-320, використання метода виявлення короткозамкнених витків ротора по падінню напруги для виявлення дефектів демпферної обмотки гідрогенератора, тепловим розрахункам гідрогенератора-двигуна з повітряним охолодженням, оцінці технічного стану генератора по параметрам магнітного поля в повітряному зазорі, системі магнітного балансування ротора при його невірноваженості, виборі електроприводу на основі існуючого стандарту IEEE, впливу кількості режимів «пуск-зупинка» на технічний стан гідрогенераторів з термореактивною ізоляцією, можливості компенсації зміни надперехідного опору по поперечній вісі гідрогенератора переналаштуванням системного стабілізатора збудження для демпфірування коливань ротора, розробці

нової гнучкої структури системи збудження на основі IGBT транзисторів, впливу тривалого зберігання турбогенераторів на їх технічний стан.

На думку автора, перспективними для використання в об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України з практичної точки зору є наступні пропозиції та підходи, викладені в доповідях дослідного комітету SC-A1 "Rotating electrical machines" ("Оберткові електричні машини") на електронній сесії CIGRE-2020:

1. Зростаюча роль оберткових СК для підтримання та покращення динамічних властивостей ОЕС України (збільшення інерційності, жорсткості та рівнів СКЗ) в умовах збільшення генеруючої потужності на основі відновлюваних джерел енергії. Практично, в ролі оберткових СК для покращення динамічних властивостей ОЕС України (збільшення інерційності, жорсткості та рівнів СКЗ) можуть бути залучені гідрогенератори ГЕС та гідрогенератори-двигуни ГАЕС при умові оплати їх роботи в даному режимі у відповідності з розрахованим погодинним тарифом.
2. Алгоритми машинного навчання, включаючи алгоритми класифікації, кластеризації та регресійного аналізу, з врахуванням широкого використання в ОЕС України реєстраторів режимів роботи основного обладнання, які можуть бути використані для формування баз даних, дозволяють виконати перехід від планово-попереджувальної системи ТОіР до системи ТОіР основного електрообладнання по його фактичному технічному стану, що дозволяє суттєво оптимізувати затрати енергокомпаній.
3. Використання технології вимірювання ЧР в ізоляції синхронних машин доцільно виконувати з використанням виключно напруги промислової частоти 50 Гц, не вкладаючи затрати в придбання випробувальних установок на низьких частотах.
4. Виходячи з наданих експериментальних даних для сучасних гідрогенераторів ГЕС та гідрогенераторів-двигунів ГАЕС з термореактивною ізоляцією обмотки статора часті режими «пуск-зупинка» не є проблемою, що погіршує їх технічний стан.
5. Для оцінки технічного стану потужних синхронних турбо- та гідрогенераторів доцільно ще на етапі їх монтажу встановлювати в повітряний зазор датчики магнітного поля, які дозволяють вимірювати радіальну, аксіальну та тангенціальну складові вектора напруженості (індукції) магнітного поля.
6. Для ТЕС з генераторами серії ТГВ потужністю 200 та 300 МВт та АЕС з генераторами ТВВ потужністю 1000 МВт, які використовуються в ОЕС України корисною буде інформація надана відповідно в доповідях А1-210 та А1-308 щодо модернізації даних турбогенераторів для зменшення вібрації їх конструктивних елементів (зменшення натуральної частоти вібрацій менше частоти другої гармоніки), особливо лобових частин обмотки статора і, таким чином, підвищення надійності їх роботи.