

Обзор докладов Исследовательского Комитета А1 на 47 Сессии СИГРЭ в Париже в 2018 году

В.В.Беляков, Ю.Д.Виницкий, М.Б.Ройтгарц

СИГРЭ является некоммерческой неправительственной организацией, основанной в Париже в 1921 году. Членами СИГРЭ в настоящее время являются более 1100 организаций из 98 стран мира. Свыше 7000 экспертов активно сотрудничают по различным направлениям электроэнергетики. Всего в структуре СИГРЭ действуют 16 Исследовательских Комитетов (ИК) .

Представителем России в ИК А1 является М.Б.Ройтгарц. Руководителем Подкомитета ПК А1 РНК СИГРЭ является В.В.Беляков, координатором работы ПК А1 является Ю.Д.Виницкий

Введение

- ИК А1 ответственен за направление «Вращающиеся Электрические Машины» и их применение для генерации электрической энергии (генераторы и мощные двигатели для различных механизмов на электрических станциях). В состав Комитета А1 входят четыре основных направления:
- Турбогенераторы AG/WGs A1.01
- Гидрогенераторы AG/WGs A1.02
- Новые технологии AG/WGs A1.05
- Электрические двигатели AG/WGs A1.06

2. Сессия докладов

На сессию были представлены 26 докладов, которые перечислены ниже по следующим трем предпочтительным темам, выбранным для сессии 2018 г.

PS1 Структура генерирующих мощностей в будущем

- Требования к совершенствованию конструкции и технологическому улучшению оборудования с целью обеспечения надлежащего функционирования в условиях циклической эксплуатации, возникшей вследствие нестабильного характера выработки возобновляемой энергии и переменного графика нагрузки.
- Влияние фактора увеличения доли возобновляемой энергии на существующие традиционные генераторы, вспомогательное генерирующее оборудование и двигатели.
- Эволюция и тенденции в сфере проектирования электрических машин для генерации возобновляемой энергии.

PS2 Управление электрическим машинным оборудованием (Asset management)

- Опыт модернизации, замены и повышения номинальной мощности и эффективности устаревших генераторов.
- Новейшие технологии, призванные преодолеть известные эксплуатационные и конструкторские проблемы.
- Оптимальные методы мониторинга состояния, диагностики, прогнозирования и технического обслуживания, направленные на повышение надежности и увеличение эксплуатационного ресурса традиционных электростанций для новых быстроизменяющихся условий в сети.

PS3 Новые разработки и опыт эксплуатации вращающихся электрических машин

- Новейшие конструктивные решения, технические характеристики, материалы, методы производства и технического обслуживания, функциональные показатели и повышение эффективности генераторов и двигателей.
- Опыт эксплуатации: отказы, анализ основных причин, опции восстановления, инициативы, направленные на снижение стоимостных и временных издержек.

1. Предпочтительная тема 1: Структура генерирующих мощностей в будущем

В рамках предпочтительной темы PS1 было представлено 6 докладов, которые кратко описаны ниже.

3.1 Требования к совершенствованию конструкции и технологическим усовершенствованиям оборудования с целью обеспечение надлежащего функционирования в условиях циклической эксплуатации, возникающей вследствие нестабильного характера выработки возобновляемой энергии и переменного графика нагрузки

[Доклад A1-101 \(США\): Совместное функционирование газовых турбин с аккумуляторными хранилищами энергии: Функциональные и экономические показатели](#)

Hybridizing Gas Turbine with Battery Energy Storage: Performance and Economics
N. W. MILLER, V. KAUSHIK, J. HEINZMANN, J. FRASIER General Electric Company, Southern California Edison Company, USA

В этом докладе рассматривается одна из наиболее важных проблем, которая стоит перед электрогенерирующими компаниями, вынужденными работать в условиях очень высокой и продолжающей увеличиваться доли возобновляемой энергии, поступающей на рынок (Рис. A1-101-1). Наличие относительно дешевых возобновляемых источников энергии привело к закрытию крупных генерирующих мощностей, работающих на ископаемом топливе. Тем не менее, все еще существует требование к обеспечению работы традиционных источников энергии, например, газотурбинных генераторов, с целью генерации энергии в случае недостаточной выработки мощности возобновляемыми источниками энергии и/или для стабилизации электроэнергетической системы. В докладе продемонстрирована сложность упомянутой проблемы на примере рынка электроэнергии Калифорнии. Одним из возможных решений, предложенных в этом документе, является использование газотурбинной установки, совмещенной с накопителем энергии на базе аккумуляторной батареи. В докладе приведено подробное описание первой установленной системы подобного рода (Рис. A1-101-2) и обсуждение экономических и функциональных показателей системы.

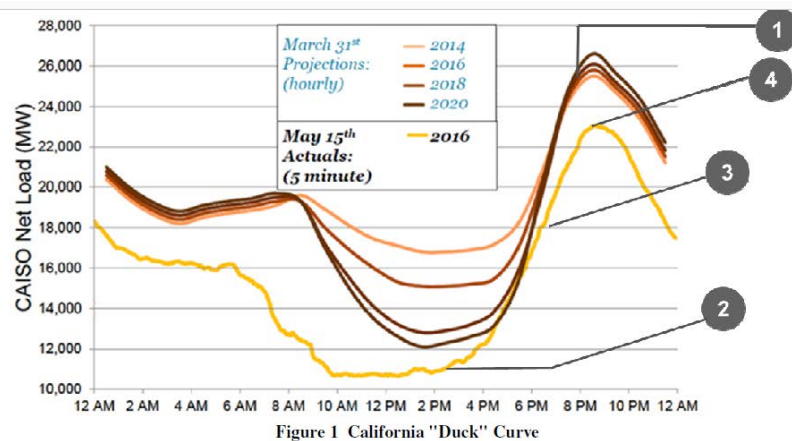


Рис. А1-101-1. Кривые суточных нагрузок с возобновляемыми источниками энергии



Рис. А1-101-2. Гибрид батареи и газовой турбины в промышленной эксплуатации

[Доклад А1-102 \(Швейцария\): Исследования по вопросу устойчивости к изменению частоты для синхронных генераторов большой мощности](#)

Investigations on ROCOF withstand capability on large synchronous Generators
K. CHAN*, J. OESTERHELD, S. TEMTEM J. HALDEMANN GE Switzerland

В публикации А1-102 рассматривается влияние уменьшения инерции системы на скорость изменения частоты (ROCOF), которая может достигать высокого значения (свыше 6 Гц/с в зависимости от длительности изменения и интенсивности возмущающего воздействия) в случае выхода системы из стационарного режима, при котором возникает потеря генерации или прекращение выдачи электроэнергии. Требования к устойчивости к изменению частоты в настоящее время представлены во многих сетевых стандартах, и, в общем случае, заключаются в необходимости продолжения работы генераторов в случае значительных изменений частоты в сети. Тем не менее, такие требования не гармонизированы различными национальными сетевыми стандартами, даже если они работают на одной частоте в синхронной зоне. Как правило, задаются только максимальные градиенты (например, 1 Гц/с), однако граничные условия (как например, длительность и частотный профиль), методология и принципы реализации в большинстве случаев остаются неопределенными, что не позволяет произвести детальную оценку с точки зрения мощности генератора. В этой публикации описывается опыт авторов в ходе

исследования устойчивости к изменениям частоты для существующих электростанций в Европе согласно предписаниям одного из операторов системы передачи электроэнергии.

Доклад A1-103 (Германия): Разработка, тестирование и проверка новой линейки генерирующего оборудования для работы в существующих и перспективных эксплуатационных режимах

Development, Test and Validation of new Generator Product Line for current and future operational regimes JAN-HENRIK BRAAM, Siemens AG Germany

На рис. A1-103-1 приведены объемы выработки электрической энергии для Германии на январь 2017г. Как следует из рисунка, объем выработки электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии составляет 38,5%, причем ветрогенерация составляет 18,8%.

В публикации A1-103 приведено описание новой линейки генераторов, статорные обмотки которых выполнены с водяным охлаждением, тогда как ротора и сердечники статоров имеют воздушное охлаждение. Такая конфигурация оборудования была выбрана с целью минимизации механического износа и температурного старения обмоток генераторов вследствие повышенного уровня циклической нагрузки в традиционном электрогенерирующем оборудовании, вызванного протеканием тока в направлении возобновляемых источников энергии с характерными периодическими изменениями. С целью уменьшения циклических температурных изменений в обмотке статора была выбрана система водяного охлаждения. Для охлаждения сердечника и ротора подается воздух под давлением, что позволяет исключить необходимость использования водорода и соответствующих систем уплотнения вала, исходя из условий обеспечения безопасности, а также для уменьшения требований к техническому обслуживанию. Для оптимизации температурных режимов и эффективности, водяная система водяного охлаждения была спроектирована таким образом, чтобы предусмотреть возможность изменения расхода в зависимости от тока статора, в то время как воздушная система находится под повышенным давлением в соответствии с величинами тока ротора и коэффициента мощности (рис. A1-103-2).

Согласно приведенным в публикации данным, первая установка была протестирована на заводе и продемонстрировала функциональные показатели в соответствии с ожиданиями и стандартами проектирования.

Предполагается выпустить линейку генераторов в диапазоне мощностей, которые в настоящее время в основном используются в конструкциях с полным косвенным воздушным и водородным охлаждением.

Авторы доклада ссылаются на ту же “DUCK CURVE”, что и в докладе A-101 для обоснования дополнительных требований к генераторам в связи с изменяющимися режимами работы генерирующего оборудования в энергосистемах (необходимость реализации маневренных режимов и увеличивающееся использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ)).

Следует также отметить, что основными задачами, которые ставит Немецкий оператор “German Energiewende” являются:

- Обеспечить продажу 55-60% электроэнергии, полученной от ВИЭ к 2035 году
- Полностью вывести из работы атомные электростанции к 2020 году
- Снизить на 50% потребность в электрической энергии к 2050 году
- Разработать мощные накопители энергии, «умные» сети и «гибкие» (работающие в переменных режимах) тепловые энергоблоки
- Обеспечить использование 6 млн электромобилей к 2030 году

Net electricity generation for public power supply

Jahr 2017

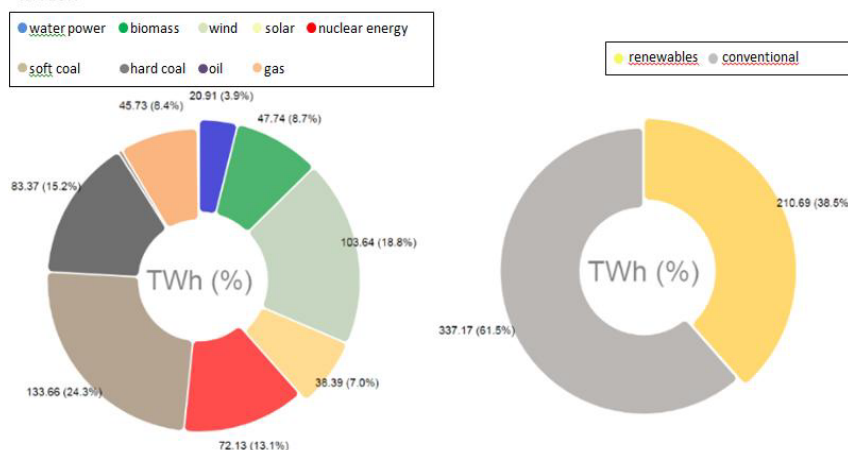


Рис. А1-103-2. Выработка электроэнергии в Германии в январе 2017г.

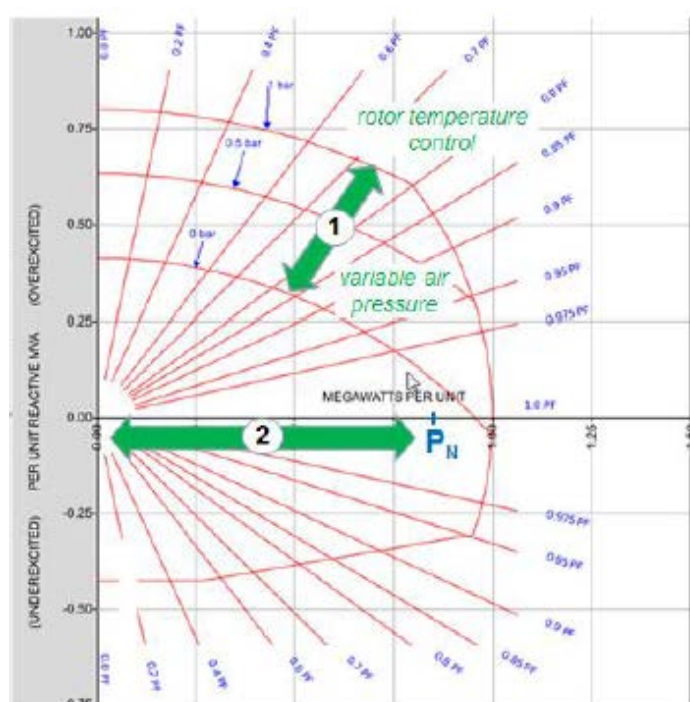


Рис.А1-103-1. Гибкая диаграмма мощности при регулируемом охладителе

3.2 Воздействие и эффект от повышения доли возобновляемой энергии на существующие традиционные генераторы, вспомогательное генерирующее оборудование и двигатели

Доклад А1-104 (Франция): Влияние развития сетевых стандартов на конструкцию генераторов для атомных электростанций (половинная скорость, мощность свыше 800 МВА)

Impact of grid code evolution on the design of the generators for nuclear plants (half speed, power above 800 MVA) P. CHAY / M. BUQUET / B. WAHDAME* V. FERNAGUT / S. MAGOIS GENERAL ELECTRIC EDF France

В публикации А1-104 приведена хорошо проработанная оценка эксплуатационных

проблем и воздействий, связанных с требованиями сетевого стандарта ENTSO-E к синхронным генераторам большой мощности (> 800 МВА). К этому относятся общие требования для электрогенерирующих модулей типа D (диапазоны напряжения и частоты), способность к поддержанию генераторного режима в случае возникновения отказов (FRT), более быстрая реакция системы возбуждения, стойкость к изменениям частоты в соответствии с заданной скоростью изменения частоты (ROCOF) и способность поддержания генераторного режима при провале напряжения сети (LVRT).

По мере того, как рабочая точка перемещается от номинальных значений напряжения и частоты, может наблюдаться значительное повышение температуры сердечника статора генератора и обмотки возбуждения, что может привести к повреждению сердечника статора генератора и изоляции обмоток, оказывая тем самым негативное влияние на срок службы генерирующего оборудования. Таким образом, как правило, рекомендуется ограничить степень, длительность и частоту возникновения таких эксплуатационных условий (Рис. А1-104-1). Тем не менее, работа генерирующих агрегатов в определенных эксплуатационных пределах может быть затруднена, и решение заключается в использовании оборудования с избыточными размерами или переключающих устройств для регулировки напряжения под нагрузкой. Для выработки окончательного решения может потребоваться достижение определенного компромисса между оператором сети, владельцем электростанции и изготовителем оборудования.

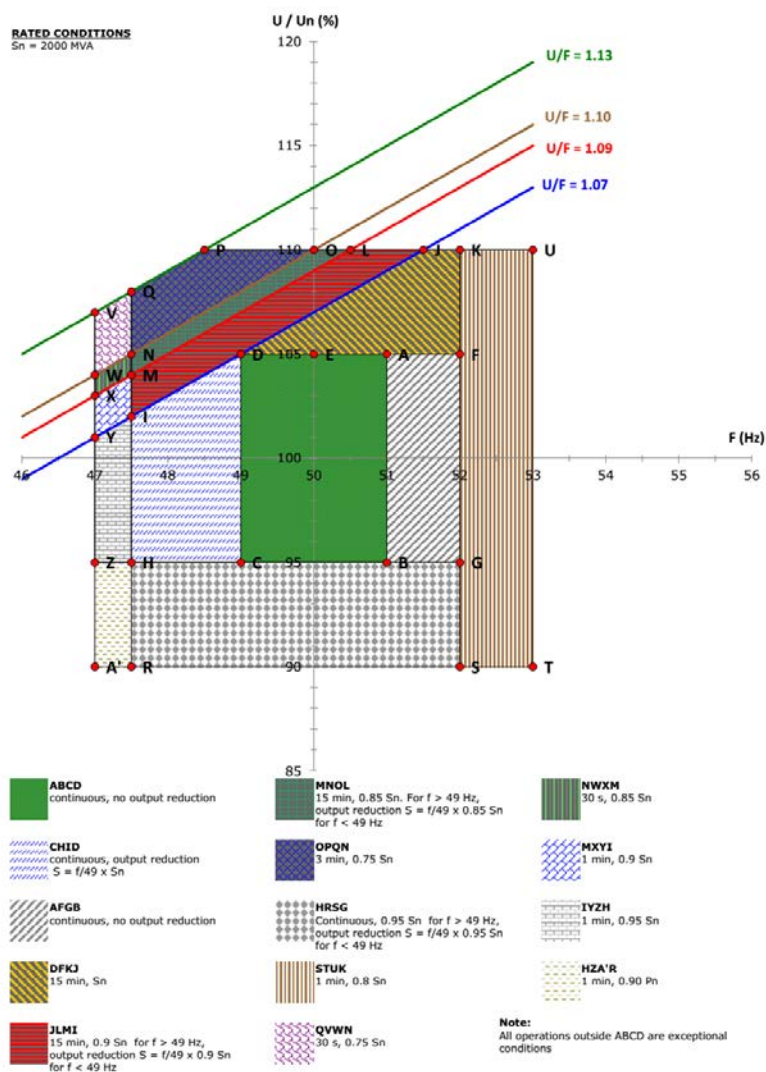


Рис.А1-104-1. Диаграмма эксплуатации турбогенератора 2000 МВА при отклонениях напряжения и частоты

Доклад A1-105 (Япония): Влияние ГАЭС Кегоку (Kyogoku), оснащенной агрегатами с регулируемой частотой вращения, на работу энергосистемы

Contribution of Kyogoku Power Station, the adjustable speed pumped storage, in the actual grid operation T. ISHIZUKI* R. HASEGAWA Y. SHIOZAKI K. IWABUCHI
Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation, Japan

В публикации A1-105 приведено описание влияния функциональных показателей гидроаккумулирующей электростанции Кегоку 2х200 МВт, оснащенной гидроагрегатами с регулируемой частотой вращения (Рис. A1-105-1), на фактическую работу энергосистемы с момента ввода в эксплуатацию в 2014 г. Это публикация основана на результатах измерений и моделирования, и развивает результаты, представленные в предыдущем докладе СИГРЭ, опубликованном в 2016 г.

Упомянутые данные и результаты моделирования в целом фокусируются на характеристиках активной мощности, которые состоят из реакций на требуемые выходные команды, поступающие от центра распределения мощности (EDC+AFC), и реакций на отклонения частоты (без использования регулятора), измеренные на электростанции Кегоку. Согласно полученным данным видно, что система с частотно-регулируемым насосным агрегатом работает удовлетворительно, как предусмотрено согласно функциям EDC+AFC и требованиям к работе без использования регулятора, как в турбинном, так и в насосном режимах (Рис. A1-105-2), при нормальных эксплуатационных условиях и в случае возникновения нарушений в сети.

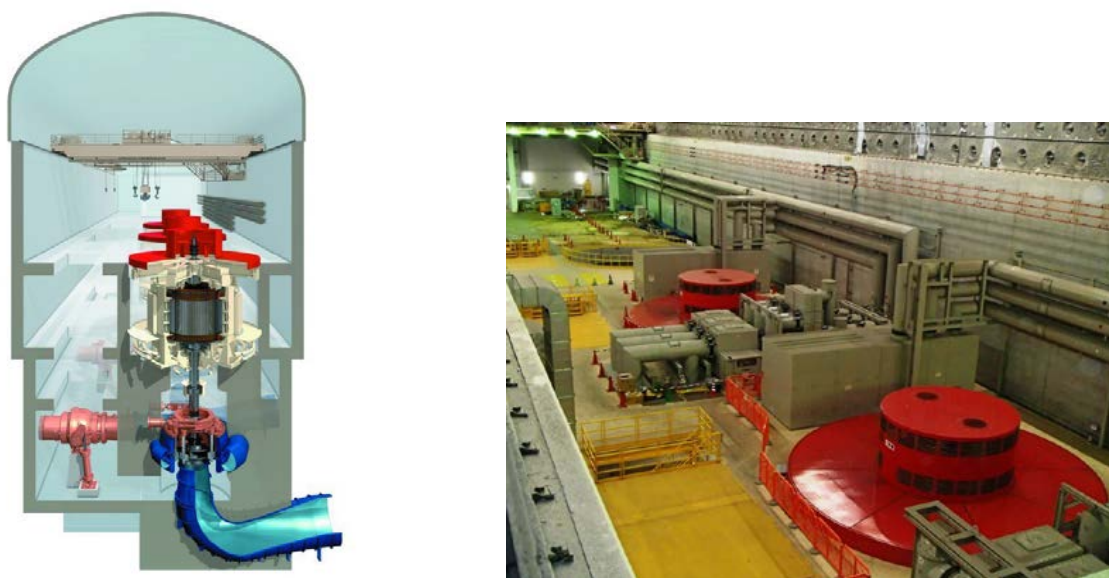
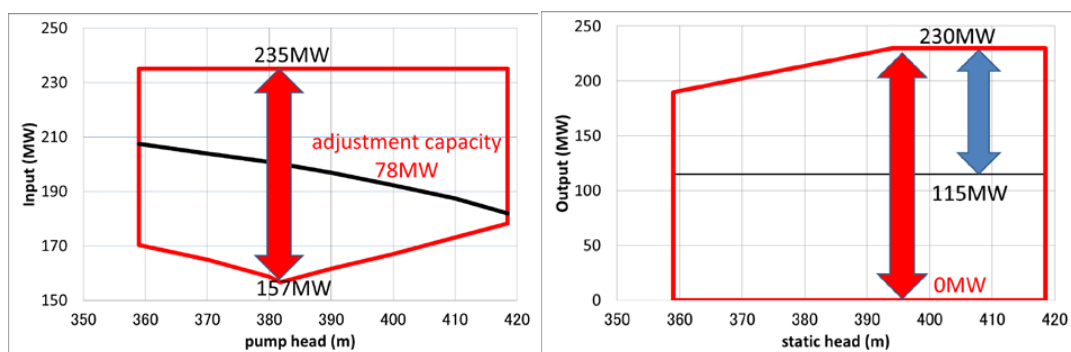


Рис. A1-105-1. Схема гидроаккумулирующего блока и генераторное помещение



3.3 Эволюция и тенденции в сфере проектирования электрических машин для возобновляемых источников электроэнергии

Доклад A1-106 (Великобритания): Расчет потерь на вихревые токи в роторах высокоскоростных синхронных генераторов на постоянных магнитах с использованием метода передаточных матриц

**Calculation of Rotor Eddy Current Losses in High-Speed PM Synchronous Generators using Transfer Matrices J. R. Anglada* and S. M. Sharkh
University of Southampton United Kingdom, M. A. Yuratich TSL Technology Ltd.
United Kingdom**

В публикации A1-106 приведено описание аналитического метода расчета потерь на вихревые токи в роторах высокоскоростных синхронных генераторов на постоянных магнитах с использованием метода передаточных матриц, который используется в качестве более быстрого и практичного способа итерационного проектирования по сравнению с медленным, но более точным методом конечных элементов. В качестве примера приводится генератор на постоянных магнитах мощностью 50 кВт и скоростью вращения 65 000 об/мин, при этом демонстрируется хорошая корреляция между методом передаточных матриц и методом конечных элементов при расчете потерь на вихревые токи, как под нагрузкой, так и без нагрузки.

Предпочтительная тема 2: Управление электрическим машинным оборудованием (Asset Management)

В рамках предпочтительной темы PS2 рассмотрены 10 докладов:

4.1 Опыт модернизации, замены, повышения номинальной мощности и эффективности генераторов, находящихся долгое время в эксплуатации

Доклад A1-211 (Индия): Использование генераторов в качестве синхронных компенсаторов для выполнения динамических требований к системе при работе в условиях смешанной генерации с использованием возобновляемых источников энергии – Индийский сценарий

GENERATORS AS SYNCHRONOUS CONDENSERS TO MEET DYNAMIC SYSTEM REQUIREMENT BY RENEWABLE MIX – Indian scenario, D. K. Chaturvedi A.K. Gupta NTPC Ltd. India

В публикации A1-211 рассматриваются вопросы использования существующих выведенных из эксплуатации генераторных установок и стратегических резервных генераторов в качестве синхронных компенсаторов для уменьшения проблем с компенсацией реактивной мощности в энергосистеме Индии, возникших вследствие быстрого развития электрогенерирующей мощностей на базе ветряных и солнечных электростанций. В качестве конкретного примера приведен пример трех генераторов с водородным охлаждением мощностью 95 МВт с последующими рекомендациями по переключению генератора для работы в качестве синхронного компенсатора. Также рассматриваются преимущества использования вращающихся машин для компенсации реактивной мощности в сравнении со статическими тиристорными компенсаторами.

Показаны преимущества использования синхронных компенсаторов в данном конкретном случае.

4.2 Современные технологии, направленные на решение операционных проблем и задач проектирования

Доклад A1-208 (Египет): Уменьшение крутильных колебаний в многосвязной электроэнергетической системе с использованием новейшей системы нечеткого управления на базе модели резистора для динамического торможения

Torsional Oscillations Mitigation for Interconnected Power System via Novel Fuzzy Control Based Braking Resistor Model M. Fayed Ahmed Cairo Electricity Production, Egypt, et al

В публикации A1-208 представлено описание тормозного резистора, предназначенного для нейтрализации разрушающего воздействия неуспешного автоматического повторного включения на усталостную долговечность валов вследствие возникновения крутильных колебаний (Рис. A1-208-1). Метод с использованием резистора для динамического торможения первоначально применялся для улучшения устойчивости электроэнергетической системы в переходном режиме. Использование управляемой дополнительной нагрузки позволяет рассеивать избыточную генерирующую мощность в случае возникновения значительных коротких замыканий в электроэнергетических системах с доминирующей долей гидрогенераторов, что, таким образом, предупреждает возникновение скольжения и выпадение синхронной машины из синхронизма. В этой публикации была предложена современная модель тормозного резистора, именуемая тормозным резистором с управлением от выпрямителя (RCBR), который управляется посредством контроллера нечеткой логики (FLC) и предназначен для уменьшения крутильных колебаний после повторного включения. Резистор RCBR в целом представляет собой одинарный тормозной резистор, подключенный к выводам генератора посредством 6-пульсного выпрямительного моста.

В публикации указывается, что в литературе не было выявлено подобных работ касательно использования резистора RCBR для нейтрализации крутильных колебаний в объединенной электроэнергетической системе, состоящей из нескольких генераторов. Предложенная схема позволяет безопасно использовать высокоскоростные устройства повторного включения (HSR), расположенные поблизости от генерирующих агрегатов, без риска для механической целостности оборудования. Предложенная схема может привести к разрешению полемических споров между электрическими компаниями и изготовителями турбогенераторного оборудования касательно использования высокоскоростных устройств повторного включения поблизости от генерирующих агрегатов. Кроме этого, использование одинарного тормозного резистора для каждого генератора может привести к уменьшению размеров и стоимости системы. Присущие этой схеме преимущества могут способствовать ее реализации силами электроэнергетических компаний для нейтрализации крутильных колебаний валов турбогенераторов, которые возникают в случае неограниченных операций высокоскоростных устройств повторного включения.

Структурная схема устройства приведена на рис. A1-208-2.

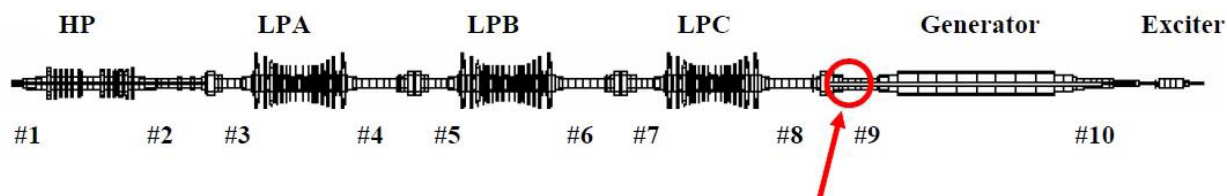


Рис.А1-208-1. Схема валопровода турбоагрегата и место трещины

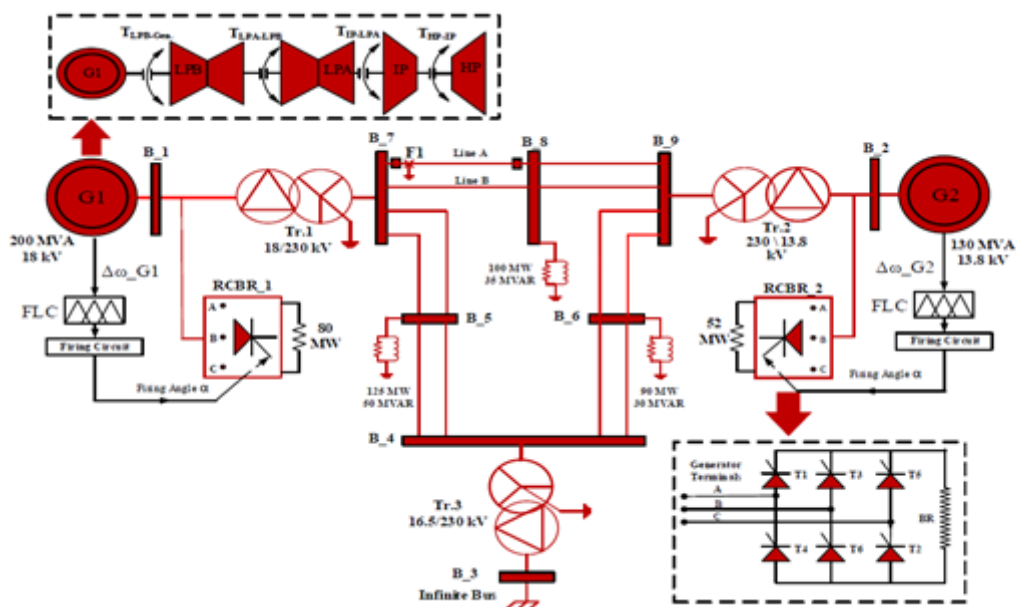


Рис.А1-208-2. Однолинейная схема генераторов с управляемым тормозным резистором и многомассовая модель валопровода

4.3 Оптимальные методы мониторинга состояния, диагностики, прогнозирования и технического обслуживания, направленные на повышение надежности и увеличение эксплуатационного ресурса традиционных электростанций для новых быстро изменяющихся условий в сети

Доклад А1-201 (Бразилия): Дисперсия измерений частичных разрядов и определения коротких замыканий на высоковольтных стержнях

VARIABILITY OF PD READINGS AND FAILURE LOCATION IN HIGH VOLTAGE BARS OF HYDROGENERATORS, E. J. FARIA; T. HILDINGER; M. J. SILVA, VOITH HYDRO LTDA. BRAZIL

В публикации А1-201 представлены результаты исследований, проведенных несколькими лабораториями по анализу дисперсии измерений частичных разрядов (ЧР), полученных в ходе испытаний на одинаковых тестовых объектах с использованием одинакового оборудования. Это исследование было проведено с учетом современной тенденции, применимой для конечных пользователей, согласно которой предусматриваются допустимые пределы амплитуд частичных разрядов для отдельных элементов обмотки (катушек и шинопроводов) и, в некоторых случаях, для собранных обмоток статора. Испытание на измерение частичных разрядов проводилось тремя независимыми лабораториями на группе из шести стержней Ребея, которые были подвергнуты ускоренному старению (температурные циклические нагрузки и воздействие напряжения). Кроме этого, авторы публикации А1-201 провели свои собственные испытания по

исследованию изменения амплитуды частичных разрядов, что привело к появлению вопросов о перспективах определения критериев отказа на основе этого параметра. В этом исследовании не было выявлено каких-либо корреляционных зависимостей между источниками с наибольшей амплитудой частичного разряда и местом отказа в том случае, когда стержни были подвергнуты испытаниям на электрический пробой.

Доклад A1-202 (Австрия): Анализ режимов распространения импульсов частичных разрядов в высоковольтных обмотках гидрогенераторов

A Study of the Propagation Behaviour of Partial Discharge Pulses in the High-Voltage Winding of Hydro Generators F. OETTL, C. ENGELEN, OMICRON electronics GmbH, E. BINDER, Consultant, T. KESSLER Vorarlberger Illwerke AG, Austria,

В публикации A1-202 приведено описание исследования распространения импульсов частичных разрядов, выполненного на двух обмотках статора, подлежащих перемотке, при различных номинальных величинах напряжения и мощности. Заявленной целью этого исследования являлась разработка методов надежной идентификации частичных разрядов в различных частях обмотки статора. Ключевым элементом этого метода является представление «матрицы затухания», построенной на основании набора выбранных измерений частоты. Цель этого метода заключается в устранении хорошо известного процесса затухания и дисперсии высокочастотных импульсов частичных разрядов в ходе их распространения по обмотке статора. Посредством изменения амплитудно-частотной характеристики детектора авторы публикации A1-202 продемонстрировали, что этот метод может использоваться для идентификации специфических характеристик дефектов в обмотке.

Доклад A1-203 (Великобритания): Возникновение частичных разрядов на изолированных по фазам шинопроводах (IPB) – Анализ конкретных примеров на электростанциях Великобритании

Partial Discharge Activity in Isolated Phase Bus (IPB) – Case Studies from UK Power Stations, A. SINGH M. HUGHES-NARBOROUGH SSE PLC, UK Doble PowerTest, UK

В публикации A1-203 представлен анализ конкретных примеров, связанных с измерением частичных разрядов с целью оценки состояния и, таким образом, перспектив надежного функционирования изолированных фазных шинопроводов. Как было продемонстрировано в этом докладе, существует несколько опций проведения измерений частичных разрядов на изолированных фазных шинопроводах. Хотя изолированные фазные шинопроводы не являются интегральной частью вращающейся машины, отказ такой системы сопровождается серьезными последствиями, принимая во внимание, что эта система используется для подключения генератора к блочному трансформатору или автоматическому выключателю генератора. Как правило, этой системе уделялось относительно небольшое внимание, принимая во внимание общее представление об очень высокой надежности изолированных фазных шинопроводов. Тем не менее, некоторое количество пользователей пришло к выводу, что отказ изолированных фазных шинопроводов будет оказывать значительное негативное влияние на готовность генерирующего агрегата. Один из вариантов конструктивного выполнения приведен на рис. A1-203-1.

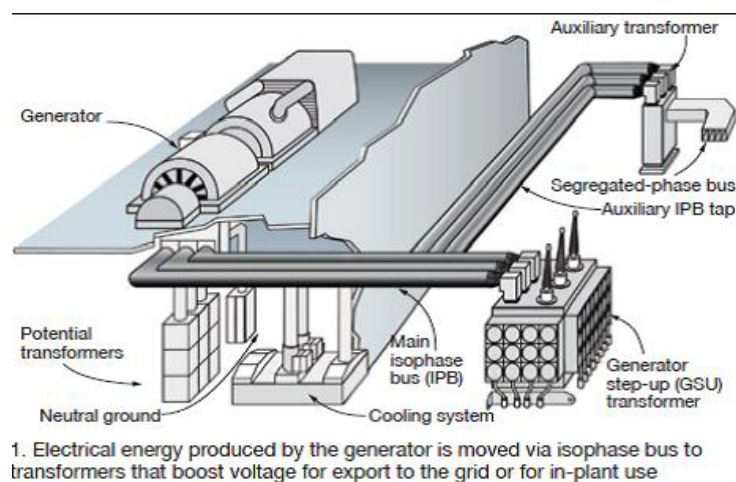


Рис.А1-203-1. Схема размещения изолированных фазных шинопроводов в системе генерации

Доклад А1-204 (Корея): Анализ процедуры диагностики изоляции обмоток статора и сердечников обратимых генераторов, задействованных в составе гидроаккумулирующих электростанций

**Analysis of Insulation Diagnosis for Generator-Motor Stator Winding and Core in Pumped Storage Power Plants S. H. LEE, T. S. KONG, H. D. KIM, D. M. KIM
KEPCO Research Institute ;KHNP Central Research Institute Republic of Korea**

В публикации А1-204 приведено описание усилий, направленных на понимание причин отказов изоляции обмоток статора двух гидроаккумулирующих генерирующих агрегатов и последующее применение программы мониторинга состояния в отключенном и включенном режимах с целью предупреждения дальнейшего возникновения отказов. Согласно анализу отказов было продемонстрировано, что, в одном случае, причиной являлось старение изоляции вследствие большого количества пусков / остановов в течение 25 лет; второй отказ возник вследствие ослабления сердечника статора. На основе этих результатов была разработана программа измерения частичных разрядов на работающем оборудовании и программа дополнительных испытаний на отключенном оборудовании (частичные разряды, сопротивление изоляции, индекс поляризации, коэффициент рассеяния, низкоэнергетический магнитный поток в сердечнике статора, ультрафиолетовая камера и т. д.). В публикации представлены два конкретных примера эффективного применения этой программы испытаний для идентификации механизмов образования дефектов и применения восстановительного технического обслуживания. Эти испытания были также применены для оценки эффективности проведения технического обслуживания.

Доклад А1-205 (Канада): Использование современной оптоволоконной технологии для мониторинга вибрации в пазах и обнаружения мест локального перегрева в газогенераторных агрегатах с воздушным охлаждением

Novel Fiber Optic Technology Monitors in-Slot Vibration and Hot Spots in an Air-Cooled Gas Generator, Peter Kung, et al, QPS Photonics Incorporation, Canada

В публикации А1-205 представлены результаты измерения вибрации и температуры, полученные с использованием оптоволоконных датчиков, установленных в газотурбинных генераторах с воздушным охлаждением. Физические основы для каждого

из таких датчиков подробно описаны в публикации (Рис.А1-205-1). Получены данные измерений температуры в пазах (Рис.А1-205-2) и в концевых частях обмотки, а также параметры вибрации в изолирующих прокладках, концевых выводах обмоток и нейтральной выводной шине. Наблюдалась хорошая корреляция измеренных температур новым оптоволоконным датчиком, предназначенным для распределенного измерения температуры, и традиционными резистивными датчиками температуры, устанавливаемыми в пазах. После успешного испытания на этом генераторе с воздушным охлаждением планируется дальнейшее тестирование на машине с водородной системой охлаждения.

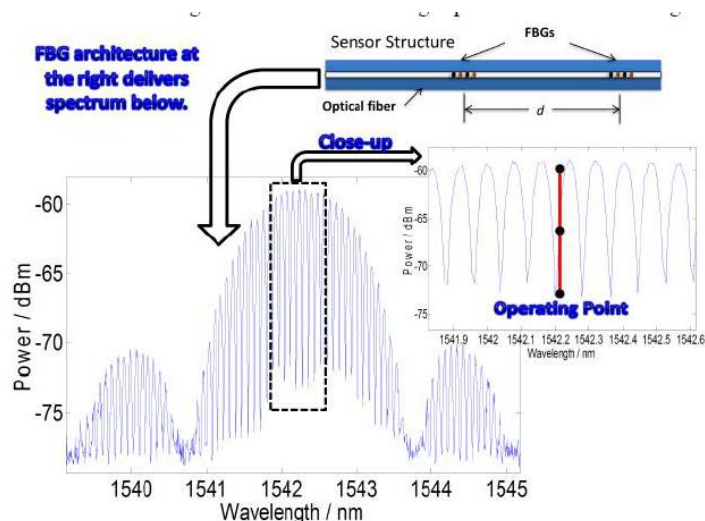


Рис.А1-205-1. Проверена применимость оптоволоконного датчика для измерения деформаций и температуры в статических и динамических режимах

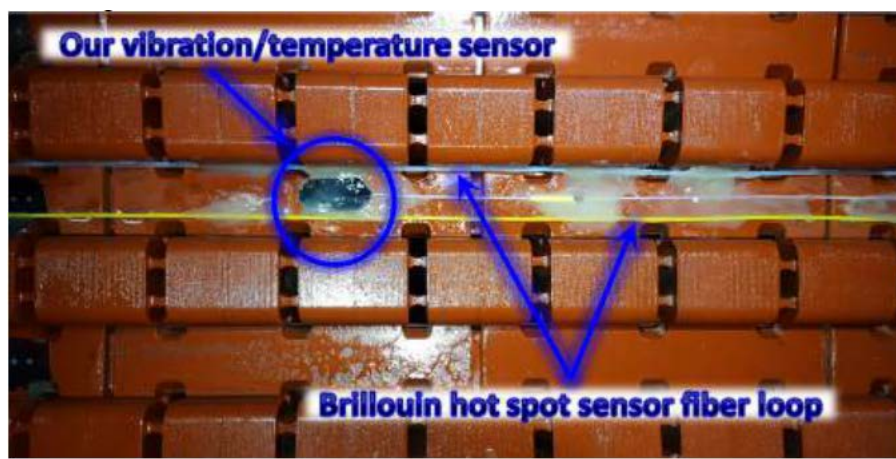


Рис.А1-205-2. Установка пазового датчика вибрации

Доклад А1-207 (Канада): Важность эксплуатационных параметров при оценке состояния работающего машинного оборудования

Importance of Operating Parameters when Assessing the Condition of Machines On-line
J. Letal, H.G. Sedding, M. Sasic, Iris Power – Qualitrol, Canada; O. Husnjak Veski, Croatia

В публикации А1-207 приведен обзор параметров, которые могут быть измерены на

работающем генераторе, и могут использоваться для идентификации дефектов на ранних этапах с целью применения программы технического обслуживания исходя из технического состояния. Рассмотренные в этой публикации параметры: магнитный поток для контроля закороченных витков обмотки ротора, вибрация концевых обмоток статора, вибрация вала и подшипников, воздушный зазор между ротором и статором (для генераторов с приводом от гидравлической турбины). В этой публикации продемонстрировано, что, в зависимости от используемой технологии, различные рабочие параметры оказывают разное влияние на результаты мониторинга, и некоторые из них оказывают значительное воздействие. Были рассмотрены три конкретных случая, посредством которых была подтверждена чувствительность измеряемых параметров (вибрация торцевых частей обмоток, величина воздушного зазора и вибрация) к изменению условий эксплуатации (температура обмоток статора, скорость и нагрузка, соответственно).

Доклад A1-209 (Канада): Использование системы мониторинга воздушного зазора на этапах первоначального ввода в эксплуатацию гидрогенератора

Using an air gap monitoring system during initial commissioning stages of a hydro generator, ANDRÉ TÊTREAU, VibroSystM inc. Canada

В публикации A1-209 подробно описано несколько конкретных случаев, на основании которых продемонстрировано развитие метода мониторинга воздушного зазора в предыдущие 30 лет, начиная с только защитной функции, то есть, функции исключения контакта ротора и статора, в, посредством хорошо проработанных методов анализа, современный инструмент, применяемый в ходе пусконаладочных и диагностических работ во время эксплуатации, особенно в условиях переменных режимов эксплуатации. В этой публикации представлена Интернет-платформа, которая предоставляет конечным пользователям возможности использовать преимущества не только полученных данных, но также аналитических инструментов, необходимых для полной реализации преимуществ таких систем.

Доклад A1-210 (Хорватия): Применение метода измерения дифференциального магнитного поля (метод DMFM) для обнаружения коротких замыканий в обмотках вращающихся машин переменного тока в качестве экспертных систем мониторинга

**Application of Differential Magnetic Field Measurement (DMFM method) in winding fault detection of AC rotating machines as part of expert monitoring systems
Ante Elez, PhD; Josip Študir, M.E.E.; Stjepan Tvorčić, M.E.E.*KONČAR – Generators and Motors ,KONČAR – Electrical Engineering Institute CROATIA**

В публикации A1-210 описан метод обнаружения коротких замыканий в обмотках индукционных и синхронных машин с использованием двух катушек обнаружения, смонтированных на зубьях статора со смещением на один полюсный шаг, и подключенных последовательно таким образом, что сигналы наведенного напряжения нейтрализуются. Разрыв шины ротора или короткое замыкание между витками обмотки приводят к возникновению регистрируемого отклонения сигнала напряжения в соответствии с числом и местом расположения коротких замыканий. Проверка этой методики измерения дифференциального магнитного поля производилась с помощью моделирования по методу конечных элементов, также посредством лабораторных испытаний. Этот метод позволяет упростить процесс интерпретации сигналов в сравнении с существующими методами с одинарной обмоткой и, как было заявлено, обладает большей чувствительностью. Данные представлены только для асинхронных машин, но также применимы к синхронным машинам с явно выраженными полюсами и

турбогенераторам.

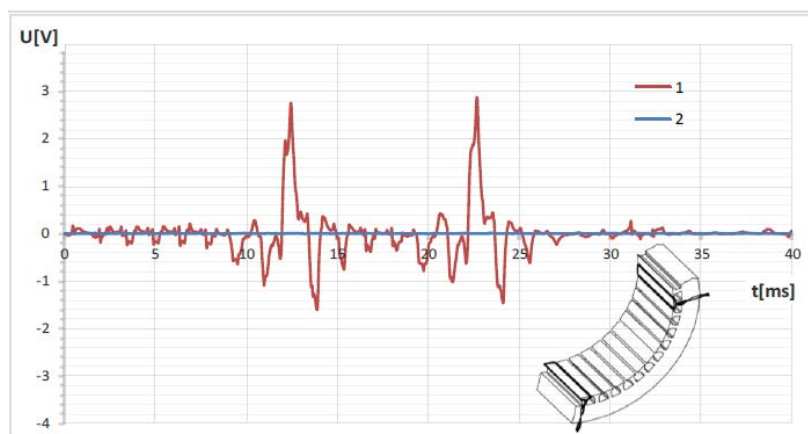


Рис.А1-210-1. Схема расположения датчиков на зубцах статора и результаты контроля ротора. 1- с повреждением в роторе, 2- без повреждений

2. Предпочтительная тема 3

Новые разработки и опыт эксплуатации вращающихся электрических машин

В рамках предпочтительной темы PS3 было принято 10 докладов, которые кратко описаны ниже.

5.1 Новейшие конструктивные решения, спецификации, материалы, методы производства и технического обслуживания, функциональные показатели и повышение эффективности генераторов и двигателей

Доклад А1-305 (Китай): Анализ влияния ширины вентиляционного зазора между экранами на распределение торцевого магнитного потока и потери на вихревые токи в турбогенераторе

Analysis on the effect of screen ventilation width on end flux distribution and eddy current losses of Turbo-generator L. WANG , Y. SUN, B. KOU

Harbin Electric Machinery Co., Ltd. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, College of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, China

В этой публикации представлены результаты исследования потерь на вихревые токи в сердечнике статора с установленным электромагнитным экраном генератора мощностью 330 МВт. В исследовании рассматривался электромагнитный экран, выполненный из двух слоев меди с промежутком между слоями, который использовался в качестве вентиляционного канала, размеры которого изменялись для изучения общего воздействия на эффективность экранирования и результирующие потери (Рис.А1.305-1).

Было достигнуто уменьшение потерь в зажимной пластине на 7% в случае использования экрана с большим промежутком за счет незначительного увеличения потерь в электромагнитном экране.

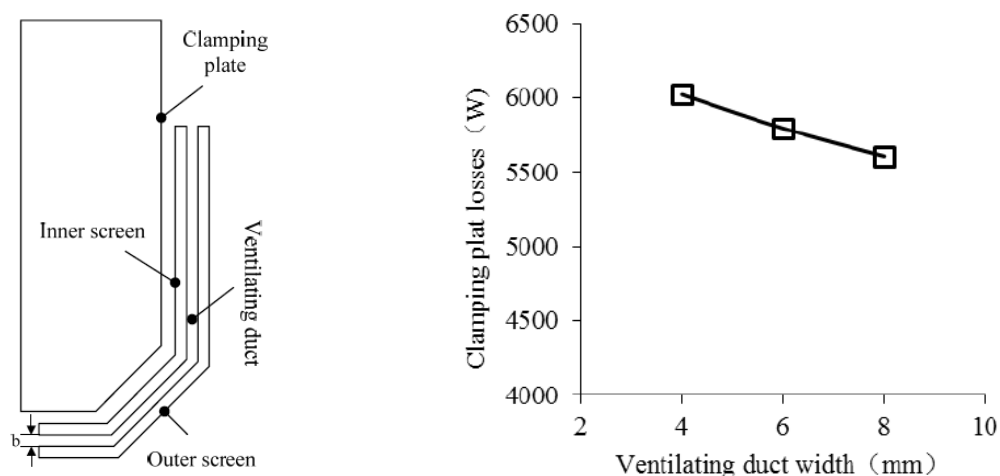


Рис.А1.305-1. Конструкция медного экрана и зависимость потерь в экране от вентиляционного зазора

Доклад A1-306 (Китай): Влияние суммарного расхода на комплексный поток охлаждающего агента и повышение температуры в области ротора гидрогенератора большой мощности

Influence of total flow rate on complex fluid flow and temperature rise in the rotor region of large Hydrogenerators J. HAN, Y. SUN, P. ZHENG, B. GE, D. TAO
Harbin Institute of Large Electrical Machinery, Harbin University of Science and Technology, Harbin Institute of Technology, China

В публикации A1-306 представлен новый метод числового расчета комплексного потока охлаждающего агента и температуры в области ротора гидрогенератора большой мощности. Решение двумерных уравнений переходного электромагнитного поля осуществляется по методу конечных элементов с целью определения потерь в компонентах гидрогенератора. Разработаны математические и физические модели трехмерного потока газа (включая теплопередачу) в области ротора, принимая во внимание сложную конструкцию крупного гидрогенератора и учитывая влияние вращения ротора. Величины потерь, полученные в ходе расчета переходного электромагнитного поля, применяются в динамической / температурной модели газа в качестве источников тепла. Расчет распределения потока охлаждающего воздуха между полюсами ротора гидрогенератора производится с использованием метода конечных объемов для различных суммарных величин расхода, при этом также определяются соответствующие величины теплопередачи от обмоток ротора, нажимной пластины, демпфирующей обмотки и короткозамыкающего кольца. После этого производится анализ результирующего распределения температуры обмотки возбуждения ротора для различных суммарных величин расхода.

Полученные результаты хорошо коррелируются с измеренной средней температурой обмотки ротора.

Доклад A1-307 (Япония): Уменьшение потерь посредством комплексного анализа электромагнитных полей

Loss Reduction by large-Scale Electromagnetic Analysis for Turbine Generators
H.KOMETANI, K.MOTOYOSHI, N.SORA, S.MAEDA, K.TANAKA
MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION, JAPAN

В этой публикации рассматривается большая модель электромагнитных полей, построенная по методу конечных элементов, которая использовалась для анализа потерь в различных компонентах генератора мощностью 900 МВА с косвенной водородной системой охлаждения. По результатам анализа были предложены конструктивные решения, направленные на снижение уровня потерь, которые могут применяться для улучшения общей эффективности генератора. Были рассмотрены такие компоненты и конструктивные решения, которые включают в себя разрезание торцевых пакетов сердечника статора, применение многослойного электромагнитного экрана, использование немагнитных материалов в конструкции корпуса поблизости от концевых обмоток статора и фазных подключений, концевые части стержней статора из изолированных проводников, скрученных по принципу Ребеля, а также повышение эффективности контактных сопротивлений между пазовыми клиньями ротора и бандажным кольцом.

В публикации приведена оценка потенциала уменьшения потерь для каждого определенного компонента агрегата в целом.

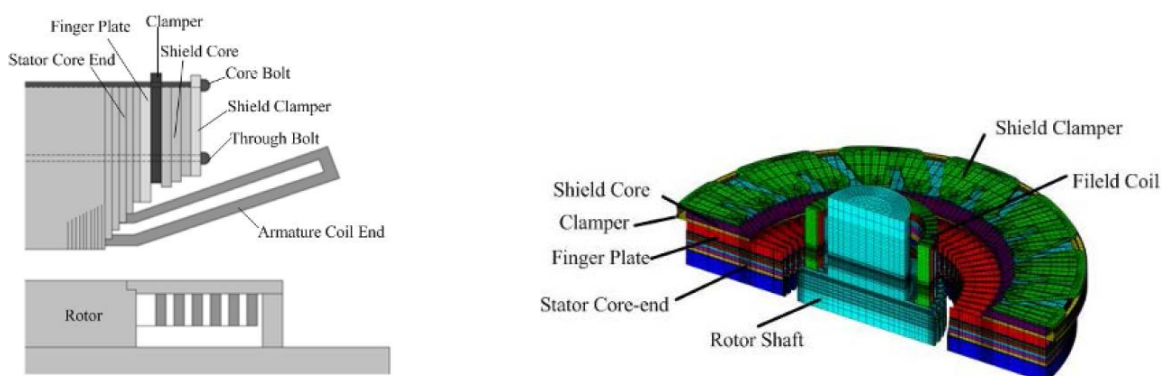


Рис.А1.307-1. Конструкция и сеточная модель торцевой зоны статора

Доклад A1-308 (Испания): Допустимая величина реактивной мощности для крупных гидрогенераторов и требования европейского сетевого стандарта применительно к стабильности напряжения

REACTIVE POWER CAPABILITY OF LARGE HYDRO GENERATORS AND THE EUROPEAN GRID CODE REQUIREMENTS WITH RESPECT TO VOLTAGE STABILITY

L. Rouco Universidad Pontificia Comillas, F. Perán, Iberdrola , SPAIN

В публикации A1-308 приведен отчет по исследованиям, проведенным с целью определения способности гидрогенератора мощностью 65 МВА отвечать требованиям, установленным для верхней границы реактивной мощности согласно недавно одобренному европейскому сетевому стандарту, чувствительности применительно к напряжению в точке подключения, а также для определения параметров переключателя выходных обмоток трансформатора.

В европейском сетевом стандарте были представлены требования касательно стабильности напряжения, сформулированные в виде верхней границы напряжения в зависимости от соотношения $Q/P_{\max}$ в точке подключения; этот стандарт должен быть реализован на национальном уровне соответствующими системными операторами. Эти требования отличаются от традиционных требований к допустимой реактивной мощности

на выводах генератора, которые указаны в стандартах на проектирование, как например, МЭК 60034-3, IEEE C50.13 и C50.12.

В публикации приведена оценка способности генератора к подаче реактивной мощности в точке подключения повышающего трансформатора, как это предусмотрено в настоящее время согласно новым требованиям сетевого стандарта. В публикации приведено заключение, что, если генератор соответствует текущим требованиям, то этот генератор не может работать в полном объеме рабочих режимов, предусмотренных в настоящее время согласно европейскому сетевому стандарту.

Доклад A1-309 (Япония): Разработка турбогенераторов большой мощности с косвенной водородной системой охлаждения и связанных технологий

Development of Large Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator and Associated Technologies, S. MURAMATSU* K. TAKAHASHI M. ONODA K. TANAKA K. HATTORI, Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd., Japan

В этой публикации приведено описание опыта применения трех базовых технологий, необходимых для разработки генератора мощностью 900 МВА с косвенной водородной системой охлаждения; приведенные результаты также могут применяться для перемотки / модернизации генераторов с целью повышения выходной мощности и эффективности. К таким технологиям относится применение главной изоляции стенок стержней статора из материала с высокой теплопроводностью (ННТ), оптимизированная транспозиция проводов по принципу Ребеля (Рис.А1-309-1, А1-309-2) и усовершенствование креплений торцевых частей обмоток статора. В частности, изолирующие материалы с высокой теплопроводностью и оптимизация по принципу Ребеля были проверены в ходе перемотки генераторов как с водородной, так и воздушной системой охлаждения в диапазоне мощностей от 160 до 600 МВА. Показана возможность уменьшения величины повышения температуры на стержнях статора до 50% (Рис.А1-303-3) в зависимости от размеров генератора и первоначальной конструкции.

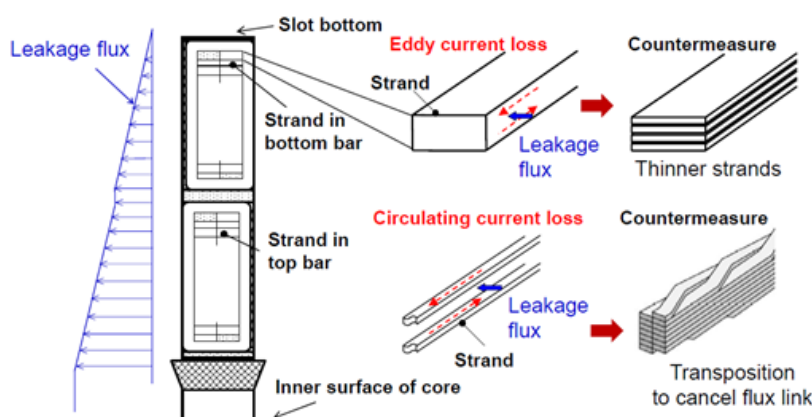


Рис.А1-309-1. Оптимизация элементарных проводников обмотки статора

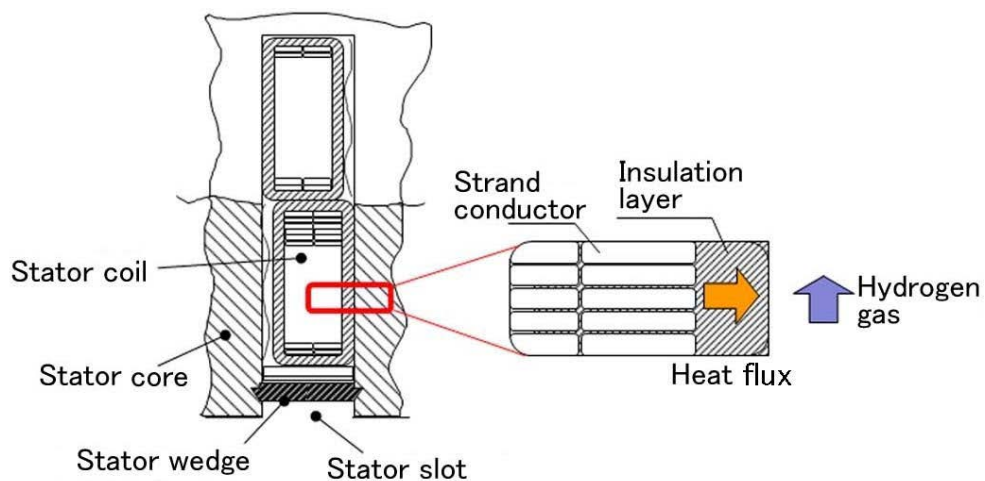


Рис. А1-309-2. Поперечное сечение обмотки статора

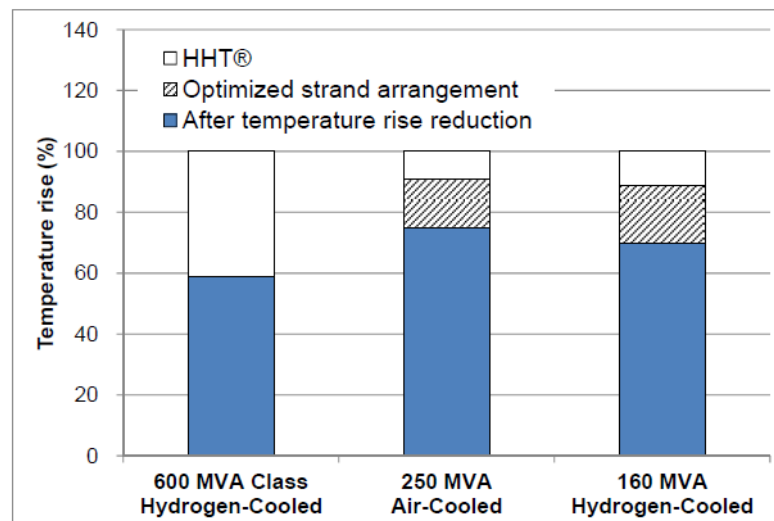


Рис.А1-309-3. Снижение превышения температуры по новой технологии

Доклад А1-310 (Корея): Анализ температурных параметров обмоток посредством метода двойной частоты и испытания индукционных двигателей в условиях реальной нагрузки.

Analysis of Winding Temperature Characteristic by Dual-frequency Method and Real-load Test for Induction Motors . B. H. Kang*, S. J. Lee, S. D. Hong , HYOSUNG Corporation

Republic of Korea

В публикации А1-310 проведено сравнение и оценка двух наиболее распространенных методов, используемых для измерения степени повышения температуры индукционных двигателей под нагрузкой: метод двойной частоты и метод испытаний в условиях реальной нагрузки.

Утверждается, что метод испытаний в условиях реальной нагрузки является более точным, однако его применение для машин большой мощности связано со значительными инвестициями в испытательное оборудование. С другой стороны, метод двойной частоты, хотя и является широко распространенным и рекомендуется в международных стандартах, дает отличающиеся результаты в сравнении с испытаниями в условиях реальной нагрузки, что приводит к значительным температурным вариациям между двумя

этими методами испытаний. Различия в температуре больше для двигателей низкого напряжения в сравнении с двигателями высокого напряжения той же мощности (соответственно, 15°C и 5°C для тестируемых двигателей).

В этой публикации анализируется причина упомянутого отклонения в температуре посредством фактических измерений и моделирования с использованием метода конечных элементов, и сделан вывод, что отклонение возникает вследствие различных потерь на рассеяние, связанных с различными приложенными частотами; такое влияние более существенно для двигателей низкого напряжения высокой мощности с соответственно большими входными токами. Рекомендуется выполнить дальнейшие исследования при проведении испытаний по методу двойной частоты на двигателях этого типа для оценки влияния формы волны тока и повышенных потерь на рассеяние на регистрируемое повышение температуры.

5.2 Опыт эксплуатации: отказы, анализ основных причин, опции восстановления, инициативы, направленные на снижение стоимостных и временных издержек

Доклад A1-301 (Бразилия): Анализ индикаторов отказов и частоты ремонтов для генерирующих агрегатов на электростанции Итайпу (Itaipu)

A STUDY OF THE FAILURE AND REPAIR RATE INDICATORS OF THE ITAIPU GENERATOR UNITS, SILVA, R.J.G.C. TUFAILE, R.B.R. GALASSI, P.H. ITAIPU BINACIONAL, Brazil

В публикации A1-301 представлено описание разработанной вероятностной модели для шести состояний с целью оценки коэффициентов неготовности и интенсивности отказов генерирующих агрегатов, установленных на электростанции Итайпу в Бразилии. В этой модели предусмотрены следующие состояния: эксплуатация, отказ, резерв, отказ с аварийным остановом, отказ пуска и техническое обслуживание, а также переходные режимы между этими состояниями, определенные исходя из опыта эксплуатации в течение 29 лет.

Итоговый анализ данных, полученных от 18 агрегатов, позволяет построить кривую интенсивности отказов, которая хорошо коррелируется с U-образной кривой, при этом длительность периода приработки составляет 13,2 г., а интенсивность отказов равна 0,74 отказа в год на один агрегат в течение периода полезного использования. Также была определена средняя длительность ремонта, которая составляет 28 ч в течение первых 11 лет, и затем снижается до 11 ч во время периода полезного использования. Сравнение коэффициента неготовности с величиной интенсивности отказов демонстрирует, что политика проведения технического обслуживания находится в стадии развития, а длительность технического обслуживания уменьшена на 48 ч на генерирующий агрегат (от 106 до 58 ч) в течение 29 лет эксплуатации.

Доклад A1-302 (США): Экспертный анализ отказов валов газотурбинных генераторов вследствие возможного подсинхронного резонанса

Forensic Analysis of Gas Turbine-generator Shaft Failures due to Possible Subsynchronous Resonance, J. D. GALVEZ, M. D. URBINA, D. J. MADER, J. B. WISNIEWSKI, Sargent & Lundy LLC, USA

В публикации A1-302 представлен анализ конкретного примера газотурбинного генерирующего агрегата, на котором возникло повреждение вала вследствие крутильных колебаний и колебаний мощности в системе на подсинхронных частотах. Цель этого исследования заключается в подтверждении возможности того, что такие колебания могут быть вызваны явлением подсинхронного резонанса, возникающим между механической

системой валопровода турбогенератора и комбинированной электрической системой, к которой подключена установка. Внешняя распределительная сеть состоит из нескольких линий, оснащенных продольными статическими компенсаторами реактивной мощности, предназначенными для улучшения режимов распределения нагрузки.

Была разработана полномасштабная модель системы с использованием методов ЕМТР-RV и сканирования частоты, примененная в различных конфигурациях распределения нагрузки для обнаружения явления потенциальных крутильных взаимодействий (TI) и индукционного эффекта генератора (IGE).

По результатам анализа было установлено, что существует вероятность возникновения крутильных взаимодействий в случае совпадения резонансной частоты системы с собственной частотой крутильных колебаний валопровода, что приводит к возникновению крутильных колебаний на подсинхронной частоте и высоким механическим нагрузкам в валопроводе в местах крепления соединительных муфт. Явление индукционного эффекта генератора не было обнаружено.

Доклад A1-303 (Черногория): Анализ возможных вариантов модернизации генераторов, установленных на гидроэлектростанции Перучица (Perucica)

**Analyses of possible refurbishment of generators in HPP Perucica R.
BATAKOVIĆ, Montenegrin Electrodistributive System, B. ĐORDAN
Montenegrin Electric Enterprise, Montenegro**

В публикации A1-303 представлено общее описание проблем (Рис. A1-303-1), связанных с техническим обслуживанием и эксплуатацией генераторов на гидроэлектростанции Перучица в Черногории в течение 50 лет эксплуатации, которые возникли вследствие замасливания и прилипания графитовой пыли к поверхностям обмоток ротора и статора. Комбинация графитовой пыли, масла и влаги приводит к образованию токопроводящих маслянистых отложений, которые необходимо регулярно удалять. Возникновение трещин в старой изоляции на некоторых агрегатах усилило проблему вследствие того, что маслянистые отложения проникли в трещины, что затрудняет их удаление. Источником графитовой пыли, как представляется, является двигатель-генераторные агрегаты первоначально установленных систем возбуждения, и эти проблемы уменьшились по мере постепенной замены системами статического возбуждения. Для устранения этой проблемы в будущем было предложено вернуться к современным бесщеточным системам возбуждения.

Также были представлены результаты диагностических испытаний, проведенных в 2014 г., с общим заключением о состоянии систем изоляции и рекомендациями касательно дальнейшей эксплуатации генераторных агрегатов. В этой публикации также приведены дальнейшие опции по модернизации установки посредством реконструкции и перекомпоновки, включая повышение выходной мощности и эффективности.

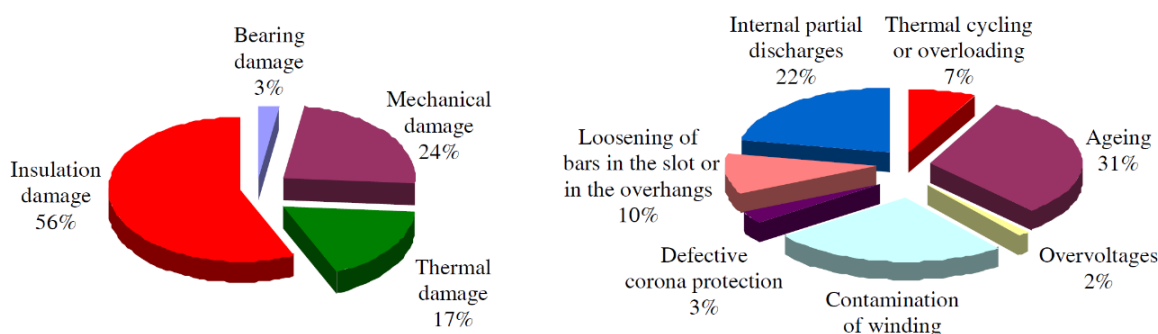


Рис. А1.303-1. Наиболее частые причины повреждения генераторов

Доклад А1-304 (Россия): Опыт эксплуатации асинхронных турбогенераторов в электроэнергетической системе Москвы

**Operation experience of asynchronized turbo-generators in the Moscow power system Yu. G. SHAKARIAN, P.V. SOKUR, R&D CENTER FGC UES, JSC
Yu.K. PETRENYA, N.D. PINCHUK, M.B. ROYTGARTS, PJSC "Power Machines"
S.N. LENYOV, A.D. GRITSENKO, PJSC "Mosenergo", F.A. POLYAKOV, D.V. KUZNETSOV, Electroservice-NTCG LLC, Russia**

В публикации А1-304 приведены данные эксплуатации пяти асинхронизированных турбогенераторов мощностью в диапазоне от 110 до 320 МВт, которые установлены в электроэнергетической системе Москвы в период между 2003 и 2009 г. Все асинхронизированные турбогенераторы оснащены двумя обмотками возбуждения, которые могут компоноваться в симметричной или асимметричной конфигурации, при этом асимметричная конфигурация имеет преимущество в плане лучших показателей применительно к потерям возбуждения. Полученные данные продемонстрировали возможности генераторов этого типа работать с увеличенными опережающими коэффициентами мощности, что, таким образом, уменьшает потребность в опережающем коэффициенте мощности на традиционных генерирующих установках, характеризующихся низкими опережающими коэффициентами мощности. Это особенно полезно в условиях плотной локальной электроэнергетической системы московского региона. В настоящее время на стадии рассмотрения находятся поправки касательно изменения тарифов, что приведет к повышению прибыльности эксплуатации оборудования с опережающими коэффициентами реактивной мощности, что, таким образом, сделает эксплуатацию асинхронизированных турбогенераторов коммерчески более привлекательной в будущем.

Заключение.

Сессия продемонстрировала постоянно растущий уровень разработки технических решений в области совершенствования конструкции генераторов большой мощности, а также генераторов меньшей мощности для работы с возобновляемыми источниками энергии. Появление новых материалов, совершенствование математических программ расчета процессов позволяет снижать себестоимость разрабатываемых электрических машин, повышать их надежность и эффективность.

Как и на предыдущих сессиях и коллоквиумах в промежутках между сессиями было обращено внимание на существенное изменение нагрузочных режимов генерирующих агрегатов. Существенный рост доли возобновляемых источников энергии в общей генерации привел к необходимости более тесного взаимодействия системного оператора

и производителя генераторов различной мощности. Выявлена необходимость модернизации (а в некоторых случаях и разработка новых решений) конструкции генератора для удовлетворения требований системного оператора особенно при подключении маломощных энергосистем к мощным энергосистемам. Сформулированы требования к необходимым диапазонам изменения частоты и напряжения, а также к скорости изменения нагрузки.

Следует отметить продолжающийся интерес к реанимации синхронных компенсаторов в том числе и к разработке и практической реализации решений по повышению устойчивости и стабилизации напряжения в энергосистеме путем использования выведенных из работы генераторов (отключение от турбины) в режиме синхронного компенсатора. Это, по мнению российских разработчиков, открывает дополнительные перспективы для использования асинхронизированных генераторов и созданных на тех же принципах асинхронизированных синхронных компенсаторов.

Цифровизация энергетики не оставила в стороне и проблемы вращающихся машин. Серьезным трендом является создание высокоинтеллектуальных устройств и систем непрерывного мониторинга и диагностики вращающихся машин, созданию базы данных работающего оборудования, анализу и обобщению выявленных трендов с целью обеспечения продления ресурса и обеспечению существенного прогресса в продвижении ремонтов «по состоянию» как наиболее экономичных способов организации ремонтов.

Продолжаются работы по совершенствованию методов и способов контроля состояния электрических машин в процессе эксплуатации, повышению их надежности.