СИНТЕТИЧЕСКАЯ СХЕМА ИСПЫТАНИЙ ГЕНЕРАТОРНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

АВТОРЫ:

Р.Н. ШУЛЬГА,
К.Т.Н.,
ВСЕРОССИЙСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ — ФИЛИАЛ ФГУП «РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР — ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ АКАДЕМИКА Е.И. ЗАБАБАХИНА» (ВЭИ — ФИЛИАЛ РФЯЦ–ВНИИТФ)

Т.С. СМИРНОВА,
ВЭИ — ФИЛИАЛ РФЯЦ–ВНИИТФ

Е.А. МИЛКИН,
ВЭИ — ФИЛИАЛ РФЯЦ–ВНИИТФ

Генераторные выключатели являются важнейшим оборудованием электростанции, осуществляя защиту и генератора, и силового трансформатора. Условия работы таких аппаратов существенно отличаются от условий работы обычных выключателей. Соответственно и требования, предъявляемые к таким выключателям, установленным в цепях генераторов, имеют свои особенности.

Ключевые слова: синтетическая схема; коммутационное испытание; генераторный выключатель; генератор импульсных токов; генератор импульсных напряжений.

Комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией (КРУЭ-110 кВ)

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Если методика испытаний сетевых высоковольтных выключателей довольно подробно описана В.В. Капланом, В.М. Нашатырем [1], Г.Е. Агафоновым [2], Н.М. Чернышевым, И.П. Щегловым, в статьях и отчетах НИИВА и ВЭИ, то методика коммутационных испытаний (КИ) генераторных выключателей (ГВ), отраженная в отечественном ГОСТ Р 52565-2006 [3], во многом не учитывает особенности работы ГВ. Зарубежные стандарты [4, 5] более полно учитывают специфику ГВ, но не охватывают требования реализации КИ сверхмощных энергоблоков АЭС мощностью свыше 1200 МВт.

Зарубежные разработки ГВ фирм ABB [6] и GE на основе элегазовой техники стали недоступны из-за введения санкций, весьма дороги, требуют применения дутья и дополнительных средств охлаждения, экологически вредны из-за выброса ядовитых окислов элегаза. Вакуумные технологии, освоенные фирмой Siemens и отраженные в Каталоге НВЗ-80 [7], не достигают требуемых параметров по номинальному току и току отключения для сверхмощных энергоблоков. Отечественные ГВ с использованием технологий воздушных и масляных выключателей [8, 9] не соответствуют предъявляемым требованиям, морально и физически устарели и требуют замены даже для энергоблоков небольшой мощности.

Отечественные испытательные центры для КИ ГВ, которые существуют в ВЭИ и НТЦ ФСК [10, 11], также либо устарели, либо не в состоянии обеспечить разрядные токи на уровне 800 кА. В связи с этим для отработки новых идей в части схемотехники ГВ применяются программные комплексы ATP и ETAP [13, 14], причем ATP более ориентирован на расчет электромагнитных процессов и был широко использован для отработки схемотехники гибридного генераторного выключателя (ГГВ), о чем было рассказано на конференции ТРАВЭК в июне 2019 г. [15], в статьях Р.Н. Шульги и соавторов [16, 17]. Комплекс ETAP более ориентирован на анализ электромеханических процессов и лучше учитывает внутреннюю структуру генератора.

В связи с отсутствием отечественного стандарта на ГВ и недостаточной систематизацией зарубежных стандартов в одной статье Р.Н. Шульги и соавторов [18] делается попытка их обобщения, а в другой статье Р.Н. Шульги и соавторов [19] на базе анализа существующей отечественной испытательной базы (в основном ВЭИ и НТЦ ФСК) сделан вывод о необходимости создания синтетической схемы испытаний (ССИ) для испытаний ГВ сверхмощных энергоблоков.

Цель настоящей статьи состоит в анализе схем КИ и оценке возможности создания ССИ для испытаний линейки ГВ, предназначенных для энергоблоков мощностью 300, 600 и 1200 МВт, а также для испытаний перспективных образцов ускорительной и лазерной техники.

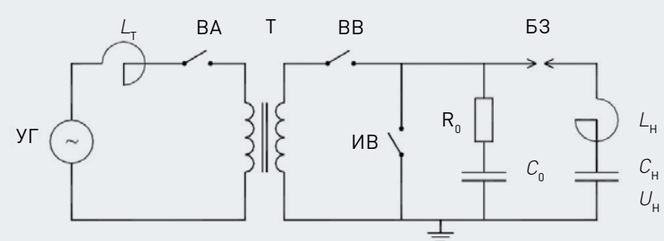
Возможны варианты выполнения КИ в соответствии с работами В.В. Каплана, В.М. Нашатыря [1] и Г.Е. Агафонова [2], предусматривающие реализацию двух вариантов схем: схемы прямых испытаний и ССИ.

СХЕМА ПРЯМЫХ ИСПЫТАНИЙ ГВ

Схема прямых испытаний, приведенная на рис. 1, использует в качестве генератора испытательных токов (ГИТ) один или несколько параллельно соединенных ударных генераторов (УГ), обычно в сочетании с понижающим трансформатором, а в качестве схемы испытательных напряжений — генератор импульсных напряжений (ГИН), обычно в виде синтетической схемы с наложением тока [2].

В качестве источника тока используется синхронный ударный генератор (СУГ) с трансформатором, который служит для повышения генераторного напряжения или повышения тока в цепи ГИТ, а иногда и просто как изолирующий цепь ГИТ от цепи высокого напряжения. Зарядное напряжение $U_н$ конденсатора $C_н$

СХЕМА ПРЯМЫХ ИСПЫТАНИЙ



Обозначения: УГ — ударный генератор; $L_т$ — индуктивность контура тока; ВА — включающий аппарат; Т — повышающие или изолирующие трансформаторы; ВВ — вспомогательный выключатель; ИВ — испытуемый выключатель; БЗ — быстродействующий замыкатель; $L_н$, $C_н$ — индуктивность и емкость контура высокого напряжения; R_0, C_0 — элементы схемы формирования переходного восстанавливающего напряжения (ПВН); $U_н$ — зарядное напряжение конденсатора $C_н$.
Источник: [2]

Рис. 1

должно быть таким, чтобы с учетом затухания и уменьшения напряжения за счет схемы формирования ПВН обеспечить приложение требуемого напряжения к ИВ после гашения дуги. Значение индуктивности $L_н$ должно быть равно или близко к значению индуктивности прямой схемы испытаний. Значение емкости $C_н$ выбирается таким, чтобы частота колебаний контура $C_н$ — $L_н$ была равна 500 Гц для сетевого выключателя (СВ), а для ГВ — намного выше. Эта частота определяется в первую очередь параметрами ИВ после гашения дуги и восстановления прочности его промежутка.

При включении ВА через замкнутые ВВ и ИВ начинает проходить отключаемый ток I_o. За определенное время до последнего перед гашением перехода тока через нулевое значение, равное, например, трем четвертям времени полупериода колебаний собственной частоты контура высокого напряжения, замыкается БЗ и в контуре $C_н$ — $L_н$ начинает проходить ток $I_н$ повышенной частоты $\omega_н$:

$I_н = I_o\ \omega/\omega_н$,

где ω — круговая промышленная частота источника тока, т.е. ток $I_н$ меньше I_o в $\omega/\omega_н$ раз.

Затем через ВВ протекает ток I_o, а через ИВ — ток, равный $(I_o + I_н)$. При прохождении тока I_o через нулевое значение ВВ гасит дугу в течение времени $t_н$, а ИВ оказывается включенным только в контур высокого напряжения с индуктивностью и напряжением, близкими к таковым при прямых испытаниях.

После гашения дуги на ИВ восстанавливается напряжение, форма которого определяется схемой формирования ПВН.

Длительность $(t_н)$ нахождения выключателя в контуре высокого напряжения должна быть в пределах от 100 мкс до времени четверти полупериода колебаний собственной частоты контура высокого напряжения.

Схема с последовательным наложением тока отличается от схемы с параллельным наложением тем, что контур высокого напряжения подключается не к ИВ, а к ВВ, и после гашения дуги в нем, ИВ оказывается в цепи, где последовательно включены контура тока и высокого напряжения. Поэтому восстанавливающееся напряжение на ИВ будет определяться суммой напряжений этих контуров, а индуктивность — суммой индуктивностей. Для ГВ в силу относительно невысокого восстанавливающегося напряжения (50–60 кВ) более целесообразно использовать схему с параллельным наложением тока. Схема прямых испытаний позволяет испытать ГВ в трехфазном исполнении, но требует больших затрат на использование до четырех УГ большой мощности с учетом трудности их синхронизации.

СИНТЕТИЧЕСКАЯ СХЕМА ИСПЫТАНИЙ ГВ

ССИ ГВ представлена на рис. 2. В отличие от прямых методов синтетические методы испытаний являются более экономичными и основаны на применении двух контуров: ГИТ с пониженным напряжением и ГИН с повышенным напряжением и малым током. Идея синтетических испытаний состоит в том, чтобы нагрузить испытуемый ГВ большим током от ГИТ, а после перехода тока через ноль отключить ГВ и приложить между его контактами напряжение от ГИН, одновременно защитив ГИТ от повышенного напряжения ГИН.

На рис. 2 приведена схема КИ ГВ с использованием ГИТ и ГИН, а также быстродействующих выключателей: S1 ГИТ, S2 ГИТ и S ГИН, в качестве которых могут быть использованы разрядники вакуумные управляемые (РВУ) [17]. Системы зарядки и управления стенда на рис. 2 не показаны. Реализация контура ГИН также не вызывает особых проблем, а вот реализация контура ГИТ достаточно проблематична из-за огромной емкости C ГИТ при минимальной индуктивности L ГИТ и периоде колебаний 50 Гц. Например, для разработки стенда на импульсный ток 800 кА частотой 50 Гц с восстанавливающимся напряжением 50 кВ частотой 500 Гц необходимо обеспечить для ГИТ:

период колебаний $T = 2\pi\sqrt{LC}$;

волновое сопротивление $\rho = \sqrt{(L/C)} = U_{зар.} / I_{ампл}$.

Задав напряжение заряда $U_{зар.}$ = 1,6 кВ, амплитуду тока $I_{ампл}$ = 800 кА, по вышеприведенным формулам получим:

ρ = 0,002 Ом; C = 1,6 Ф; L = 6,4 мкГн.

Запасаемая энергия батареи равна $E = CU^2/2$ и в зависимости от комплектации составляет от 2 до 6 МДж.

Для учета апериодической и периодической составляющих тока короткого замыкания (КЗ) контур ГИТ (см. рис. 2) преобразуется в двухконтурный, как показано в статье Р.Н. Шульги и соавторов [17, рис. 12].

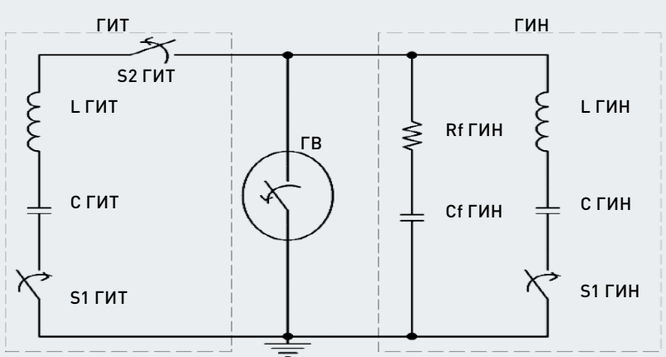
Переходные процессы в двухконтурном ГИТ при учете апериодической и периодической составляющих тока КЗ также приведены в статье Р.Н. Шульги и соавторов [17].

Схемы КИ ГВ, по данным доклада Р.П.П. Свитса и соавторов [12], в ИЦ KEMA для элегазового ГВ фирмы «Альстом», как по прямой схеме (синий пунктир), так и по синтетической схеме (красный пунктир) приведены на рис. 3 для ГИТ, а схема ГИН ПВН (зеленый пунктир) показана справа от токового контура. В нижней части рис. 3 слева показаны измеренные токи (кА) и напряжения (кВ), красным цветом ток и синим цветом восстанавливающееся напряжение ГВ на ИВ, а справа — начальная часть ПВН, которая на графике слева выделена пунктиром синего цвета. Временной масштаб слева — мс, справа — мкс. Анализ начальной части кривой ПВН показывает частоту восстановления напряжения на уровне 10 кГц, что на порядок превышает аналогичное значение для СВ.

Для математического моделирования с использованием программного комплекса ATP [13] в схеме на рис. 4а [1] в ОСТ 16.0.688.010-71 рекомендовано применять следующие параметры:

R = 3600/I (Ом); $R1$ = 5850/I (Ом);

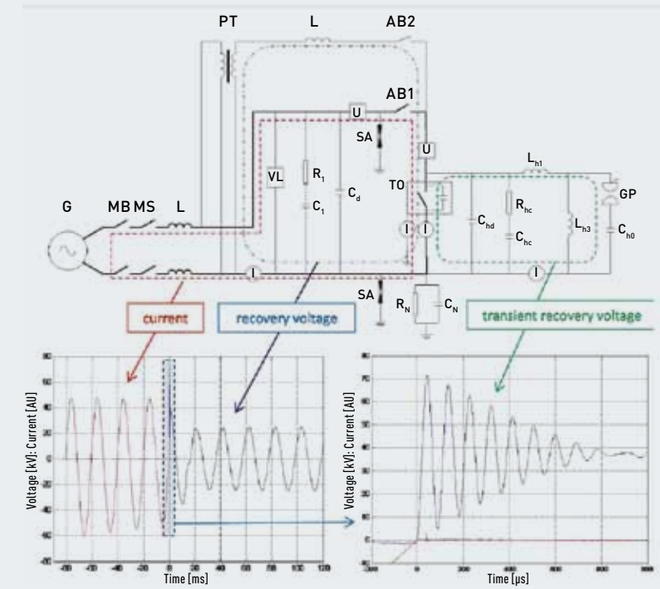
СИНТЕТИЧЕСКАЯ СХЕМА КИ ГВ



Источник: [17]

Рис. 2

СХЕМЫ КИ ГВ: ПРЯМАЯ (СИНИЙ ПУНКТИР), СИНТЕТИЧЕСКАЯ (КРАСНЫЙ ПУНКТИР) ДЛЯ КОНТУРА ГИТ И СИНТЕТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПВН (ЗЕЛЕНЫЙ ПУНКТИР) ДЛЯ КОНТУРА ГИН, А ТАКЖЕ ГРАФИКИ ТОКА (КРАСНЫЙ ЦВЕТ) И НАПРЯЖЕНИЯ (СИНИЙ ЦВЕТ) ВО ВРЕМЕНИ: СЛЕВА — МС, СПРАВА — МКС



Обозначения: G — ударный генератор; MB — главный выключатель; MS — рабочий выключатель; AB — вспомогательный выключатель; TO — испытуемый выключатель; PT — силовой трансформатор; ML — переключатель; GP — разрядник управляемый; SA — разрядник; R, L, C — резистор, реактор, конденсатор; U, I — измеренные напряжение и ток.
Источник: [12]

Рис. 3

ССИ (А) И НАПРЯЖЕНИЕ НА ГВ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ТОКА 240 КА (Б, В)

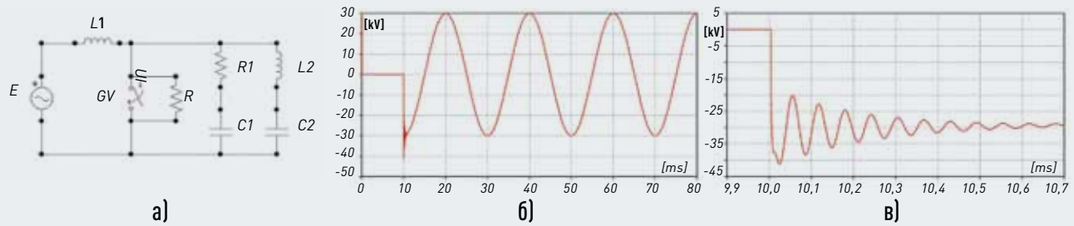


Рис. 4

$L1 = E/314 \times I$ (Гн); $L2 = E/628 \times I$ (Гн);
$C1 = (8 – 12)\ 10^{-6} \times E \times I$ (мкФ);
$C2 = 18{,}9 \times 10^{-6} \times E \times I$ (мкФ),

где E — восстанавливающееся напряжение; I — отключаемый ток; GV — испытуемый выключатель, напряжение на котором $U1$ показано на рис. 4б, а начальная часть — время в долях (мс) соответствует показанному на рис. 4в. Высокая частота ПВН (примерно 14 кГц) обусловлена наличием короткого токопровода между ВГ и ЭГ и малой индуктивностью $L1$ последнего.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РВУ

Параметр	РВУ-57	РВУ-63
$U_{раб.}$, кВ	25	55
$I_{раб.}$, кА	200–300	700
Q, Кл	150	300
$I_{подж.}$, А	300	500
Δt, °С	от –40 до +100	от –40 до +100
Габариты, мм	126/122	163/216
Масса, кг	3,0	10,5

Таблица 1

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ГВ И СТЕНДУ ССИ

Технические требования к стенду ССИ определяются типажом испытуемого оборудования и, в частности, должны соответствовать электрооборудованию синхронных генераторов АЭС мощностью 1200 МВт, а в перспективе и 1400–1600 МВт.

В соответствии с техническим заданием на ГВ предполагается реализовать макет и опытный образец ГВ на номинальное напряжение 24 кВ (наибольшее рабочее напряжение 30 кВ), номинальный ток 37 500–42 500 А, номинальный ток отключения и ток термической стойкости 3 с — 300 кА, ток электродинамической стойкости до 480 кА. Собственное время отключения составляет 40 мс, полное время отключения — 60 мс. В условиях подпитки со стороны сети или других генераторов АЭС ударный ток при отключении трехфазного КЗ на выводах генератора в месте КЗ может достигать амплитуды 800 кА.

В статьях Р.Н. Шульги и соавторов [16, 17] приведены данные по результатам исследования и разработки ГГВ с указанными параметрами. Разработка предполагает использование трехступенчатого ГГВ, состоящего из параллельного соединения горячих главных контактов — воздушных или газовых, холодных вакуумных выключателей или их сборок, а также сборок РВУ.

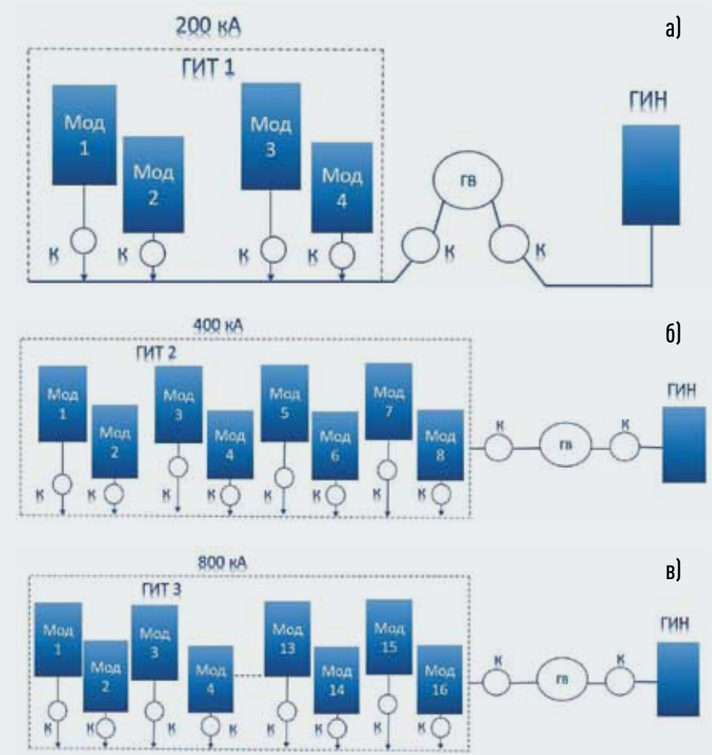
На основе математической модели синхронного турбогенератора ТВВ-1200 4У3 напряжением 24 кВ с блочным трансформатором ОДЦ-533000/750 (330)-У1 были выполнены исследования отключения трехфазного КЗ в схеме ГГВ [13]. Амплитуда ударного тока при этом достигает 370 кА, при аналитическом расчете без затухания периодической составляющей — 390 кА, а с учетом затухания — 330 кА. Спустя шесть периодов частоты сети устройство релейно-защитной автоматики (РЗА) дает сигнал на отключение одной из фаз, в которой отсутствует апериодическая составляющая тока КЗ, а спустя примерно период отключаются в момент перехода тока через нуль обе оставшиеся фазы.

Для реализации указанных воздействий требуется создание стенда ССИ на ток до 800 кА частотой 50 Гц в виде схемы рис. 2, содержащей, наряду с двумя батареями конденсаторов (для ГИТ и ГИН) с запасаемой энергией до 10 МДж, три быстродействующих сильноточных выключателя, предположительно на базе сборок РВУ, два зарядных устройства, системы управления, защиты, блокировок, измерений и другие вспомогательные устройства. Указанный стенд ССИ целесообразно создавать по специальному проекту на базе, например, ВЭИ с обеспечением достаточным финансированием, квалифицированными кадрами и современным оборудованием.

В ССИ входят:

- ГИТ на токи 200, 400, 800 кА соответственно;
- зарядные устройства для ГИТ каждого из вариантов;
- ГИН;

ССИ ДЛЯ ТРЕХ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ГИТ СООТВЕТСТВЕННО НА ТОКИ 200 (А), 400 (Б) И 800 КА (В) И ГИН НА НАПРЯЖЕНИЕ 50 КВ



Обозначения: Мод — модули конденсаторов; ГВ — генераторный выключатель; К — коммутатор (РВУ)

Рис. 5

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА: ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ЭНЕРГИЯ ЕДИНОЙ СЕТИ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
МЕДИАКИТ 2020
УЧРЕДИТЕЛЬ: ПАО «ФСК ЕЭС» ИЗДАТЕЛЬ: АО «НТЦ ФСК ЕЭС»
+ 7 (495) 268-04-79 (доб. 104)
editor@ntc-power.ru

УМНЫЙ ЖУРНАЛ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ЦЕЛЕВАЯ АУДИТОРИЯ
СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР
ЛИЧНО В РУКИ
ФСК ЕЭС
ИНЖЕНЕРЫ
СЕТЕВЫЕ КОМПАНИИ
РОССЕТИ
НИИ
МРСК
МЕНЕДЖЕРЫ
МИНЭНЕРГО
ЦЕЛЕВАЯ РАССЫЛКА
РАН
ГЛАВНЫЕ ИНЖЕНЕРЫ
СПЕЦИАЛИСТЫ
СТУДЕНТЫ
ВУЗЫ
ПРОИЗВОДИТЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ
ЭНЕРГОХОЛДИНГИ
МЭС
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ
РУКОВОДИТЕЛИ
ПОСТАВЩИКИ ОБОРУДОВАНИЯ
ПМЭС
МОЛОДЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ
ПРОЕКТИРОВЩИКИ
WWW.ЭНЕРГИЯ-ЕДИНОЙ-СЕТИ.РФ

- зарядное устройство для ГИН;
- коммутационные устройства разных типов, включая испытуемый ГВ;
- приводы коммутационных устройств;
- системы управления приводами;
- система измерения напряжений;
- система питания ССИ;
- системы защиты от перенапряжений и сверхтоков;
- системы блокировок.

На рис. 5 приведена ССИ для трех вариантов реализации ГИТ на токи 200, 400 и 800 кА и ГИН на напряжение 50 кВ.

В качестве коммутационных устройств предполагается использование РВУ, которые с помощью электронной системы поджига могут быть достаточно просто синхронизированы в отличие от вакуумных дугогасительных камер (ВДК). На рис. 6 показана внутренняя структура и внешний вид РВУ.

В табл. 1 приведены характеристики РВУ-57 и РВУ-63, которые могут быть использованы в ССИ.

Наряду с РВУ основными элементами ССИ являются импульсные конденсаторы (ИК), собираемые в модули, как было показано на рис. 5. Ниже приведена оценка объема и затрат на конденсаторы для комплектации ГИТ и ГИН в составе ССИ.

ОЦЕНКА ОБЪЕМА И ЗАТРАТ НА КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ ГИТ

Исходными для расчета ГИТ являются:

- период колебаний тока T = 0,02 с (включение, отключение и электродинамическая стойкость);
- напряжение заряда конденсаторов U из данных каталога завода-изготовителя [20] в диапазоне 1, 5, 10 кВ;
- ток разряда батареи конденсаторов I в диапазоне 200, 400, 800 кА;
- мощности энергоблоков S в диапазоне 300, 600, 1200 МВА.

В результате расчетов необходимо получить емкость *(C)*, индуктивность *(L)*, энергию заряда *(W)*, число конденсаторов *(m)*, массу *(M)* батареи, стоимость конденсаторов (S_1), занимаемую площадь $(\sum_{площ.})$. Для расчета используем соотношения (1) и (2) для волнового сопротивления ГИТ — ρ и периода колебаний — *T*:

$$\rho = U/I = \sqrt{(L/C)}; \quad (1)$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2)$$

Совместно решая уравнения (1) и (2), получаем:

емкость $C = TI / 2\pi U$; (3)

индуктивность $L = TU / 2\pi I$. (4)

На основе формул (3) и (4) получаем:

$C = 0{,}02I / 2\pi U = 3{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot (I/U)$;

$L = 0{,}02U / 2\pi I = 3{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot (U/I)$.

Энергия заряда *(W)* рассчитывается по формуле $W = (CU^2)/2$, число конденсаторов *m* — по формуле $m = C/C_1$, энергия заряда одного конденсатора W_1 — по формуле $W_1 = W/m$, индуктивность одного конденсатора L_1 — по формуле $L_1 = Lm$, ток одного конденсатора I_1 — по формуле $I_1 = I/m$, масса конденсаторов *M* — по формуле $M = M_1m$, где индексы 1 относятся к одному конденсатору.

Результаты расчета приведены на рис. 7 для трех вариантов ГИТ.

Полученные результаты расчетов ГИТ представлены в табл. 2, где принимаются $\sum S'_{площ.}$ — суммарная площадь ГИТ без зазоров между конденсаторами (м²). Принимаются такие габариты одного конденсатора: Д = 310 мм, Ш = 150 мм, В = 590 мм, исходя из оптимального напряжения заряда 5 кВ (как следует из рис. 7):

$S'_{1конд.} = 0{,}31 \cdot 0{,}15 = 0{,}0465$ м²;

$\sum S'_{площ.} = m \cdot S'_{1конд.}$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВАРИАНТОВ ГИТ

S, МВА	I, кА	C, Ф	W, МДж	m, шт.	M, т	S_1, млн руб.	$\sum S'_{площ.}$, кв. м
1200	800	0,5	6,25	2500	120	125	116,25
600	400	0,25	3,125	1250	60	65,5	58,125
300	200	0,125	1,56	625	30	31,25	29,06

Обозначения: S — мощность генератора, МВА; I — ударный ток, кА; C — емкость конденсаторов ГИТ, Ф; W — энергия заряда, МДж; m — число конденсаторов, шт.; M — масса конденсаторов, т; S_1 — стоимость конденсаторов ГИТ, млн руб. (в соответствии с письмом КВАР №263М-01 от 20.09.2019 — 20 тыс. руб./кДж).

Таблица 2

ВНЕШНИЙ ВИД РАЗРЯДНИКА ВАКУУМНОГО УПРАВЛЯЕМОГО (РВУ)

Рис. 6а

ОЦЕНКА ОБЪЕМА И ЗАТРАТ НА КОНДЕНСАТОРЫ ГИН

В качестве исходных данных принимаются следующие данные из технического задания на ГВ:

$U_{ном} = 24$ кВ; $U_{пвн} = 48$ кВ; $dU_{пвн}/dt = 6$ кВ/мкс.

В соответствии с ГОСТ Р 52565-2006 (раздел 6, табл. 4), следует обеспечить следующие показатели: $U_{ном}/U_{нр} = 20/24$ кВ; $U_c = 41$ кВ; $t_з = 87$ мкс; $t_d = 13$ мкс; $U' = 14$ кВ; $t' = 43$ мкс;

$dU_{пвн}/dt = U_c/t_з = 0{,}47$ кВ/мкс (скорость нарастания ПВН).

В итоге получаем заниженные относительно технического задания показатели ПВН.

В соответствии с IEC/IEEE 62271-37-013 (табл. 3), для энергоблоков мощностью более 1000 МВА установлены следующие показатели: $U_c = 1{,}84U_г = 44{,}16$ кВ; $t_з = 0{,}31U_г = 7{,}44$ мкс; $dU_{пвн}/dt = 6$ кВ/мкс; $t_d = 1$ мкс. Исходными для расчета ГИН являются такие параметры: $I_p = 60$ кА; $U_c = 44$ кВ; $t_з = 7{,}44$ мкс.

Для расчета параметров ГИН используются следующие формулы

$\rho_н = \sqrt{(L_н/C_н)} = U_c/I_p$;

$L_н = C_н \cdot \rho_н^2$; $C_н = (I_p^2 \cdot L_н)/U_c^2$;

$W_н = C_н \cdot U_c^2/2$; $T = 6{,}28 \cdot \sqrt{(C_н \cdot L_н)}$.

На основании указанных формул получают такие значения параметров:

$\rho_н = 0{,}73$ Ом; $L_н = 1{,}74$ мкГн; $C_н = 3{,}28$ мкФ; $W_н = 3{,}2$ кДж; T=15 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен обзор ранее выполненных исследований КИ применительно к СВ и ГВ. Показаны особенности последних в условиях значительно более высоких токовых нагрузок номинальным током и током отключения с учетом апериодической составляющей, более высокого нагрева и механических нагрузок, более высокой частоты переходного восстанавливающегося напряжения.

Приведены данные по мировым и отечественным испытательным

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА РАЗРЯДНИКА ВАКУУМНОГО УПРАВЛЯЕМОГО (РВУ)

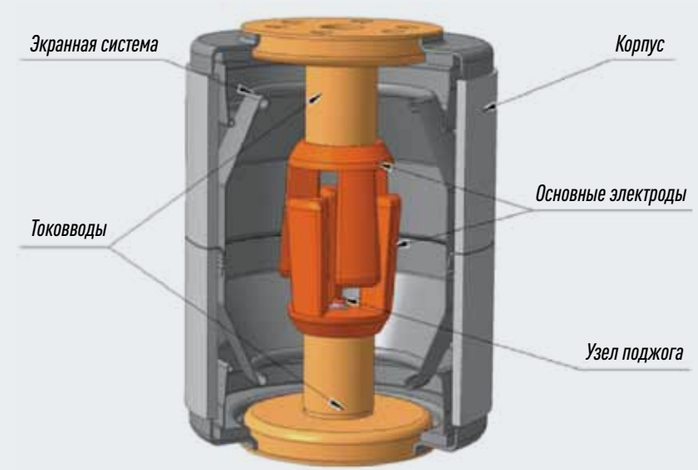


Рис. 6б

ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГИИ (W), КОЛИЧЕСТВА КОНДЕНСАТОРОВ (M) И МАССЫ (M) БАТАРЕИ КОНДЕНСАТОРОВ ГИТ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ ЗАРЯДА U: А) ДЛЯ I = 800 КА; Б) ДЛЯ I = 400 КА; В) ДЛЯ I = 200 КА

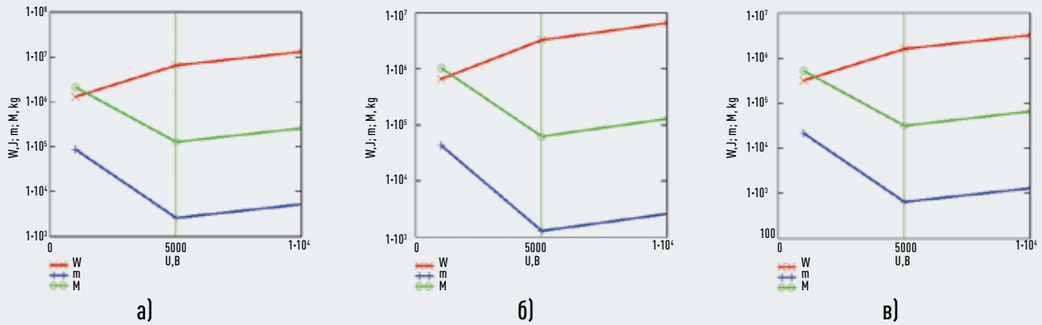


Рис. 7

центрам и показано отсутствие в них установок для испытаний электрооборудования и ГВ для генераторов мощностью 1200 МВт и более.

Даны схемы прямых и синтетических испытаний ГВ и сформированы предварительные требования к синтетическому стенду для проведения КИ, электрооборудованию, существующим и вновь разрабатываемым ГВ, имея в виду необходимость их применения не только в энергетике, но и в лазерной, ускорительной и других видах техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каплан В.В., Нашатырь В.М. Синтетические испытания высоковольтных выключателей. Л.: Энергия, 1980, с. 200.
2. Агафонов Г.Е. Схемы испытаний электрических аппаратов на коммутационную способность, НИИВА. URL: http://www.new.abb.com (дата обращения 05.09.2019).
3. ГОСТ Р 52565-2006 «Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Общие технические условия».
4. IEC/IEEE 62271-37-013 « High Voltage Alternating Current-Breakers».
5. Technical Application. Paper № 22. Medium voltage generator circuit-breaker. URL: https://www.library.e.abb.com/public/2017.03/pdf (дата обращения 05.09.2019).
6. Элегазовые генераторные распределительные устройства НЕС, с. 6. URL: http://www.new.abb.com (дата обращения 05.09.2019).
7. Генераторные распределительные устройства НВ3-80 с автоматическими выключателями. Каталог НВ3-80. 2015. С. 28. URL: http://www/siemens.ru/lmv (дата обращения 05.09.2019).
8. Генераторные выключатели. Высоковольтный союз. URL: http:// www.vsoyuz.com (дата обращения 05.09.2019).
9. АО ВО «Электроаппарат». URL: http://www.ea.spb.ru/catalog/4/14/ (дата обращения 05.09.2019).
10. Испытательный центр ВЭИ. Всероссийский электротехнический институт — филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ». URL: https://dostup1.ru/ (дата обращения 05.09.2019).
11. Испытательный центр НТЦ ФСК. URL: https://an-babushkin.livejournal.com/ (дата обращения 05.09.2019).
12. Sweets R. P. P., te Paske L.H., Kuivenhoven S., Thomas R., Royot V., Robin-Joan P., Willieme J.M., Jacquer F. Interruption Phenomena and Testing of Very Large SF6 Generator Circuit-Breaker. CIGRE 2014. A3-306. P. 1–10.
13. Программный комплекс ATP Rule Book. 1992. С. 247.
14. Программный комплекс ETAP. URL: https://etap.com (дата обращения 05.09.2019).
15. Шульга Р.Н., Лавринович В.А., Иванов В.П., Сидоров В.А., Смирнова Т.С. Разработка гибридного генераторного выключателя, XXVIII Международная научно-техническая конференция TPAVEK «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования», 5–6 июня 2019, Москва.
16. Шульга Р.Н., Лавринович В.А., Иванов В.П., Сидоров В.А., Смирнова Т.С. Исследования и разработка гибридного генераторного выключателя // Энергия единой сети. 2019. № 3 (45). С. 63–72.
17. Шульга Р.Н., Лавринович В.А., Иванов В.П., Сидоров В.А., Смирнова Т.С. Гибридный генераторный выключатель и испытательный стенд // Энергоэксперт. 2019. № 3. С. 14–20.
18. Шульга Р.Н., Смирнова Т.С., Глушков Д.А. Стандарты и коммутационные испытания генераторных выключателей // Энергия единой сети. 2019. № 6 (49). С. 56–64.
19. Шульга Р.Н., Смирнова Т.С. Коммутационные испытания генераторных выключателей // Энергоэксперт. 2020. № 1.
20. Каталог конденсаторов КВАР. URL: https://kvar.su (дата обращения 05.09.2019).

ПРИБОРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ
Челэнергоприбор
Вам необходимо:

1

Миллиомметр ТРОМ-1
Измерить электрическое сопротивление постоянному току низкоиндуктивных и высокоиндуктивных цепей, в первую очередь обмоток трансформаторов, в том числе большой мощности (до 1000 МВА).
Возможность двухканального режима работы (пропускание тока одновременно через обмотку ВН и НН)
Быстрый сброс тока в обмотке после измерения
Возможность работы совместно с коммутатором ЧЭП2320 для измерения сопротивления обмоток поочередно по трем фазам

2

Устройство размагничивания трансформатора ЧЭП3601
Размагнитить трансформатор от остаточного намагничивания, возникающего вследствие внезапного сброса питающего напряжения (отключения трансформатора от сети) и обрыва тока при его переходе не через ноль, для его последующего включения или перед проведением опыта ХХ. Соответствует п. 6.2 ГОСТ 3484.1.
Быстрое размагничивание трансформаторов большой мощности
Малая масса и габариты прибора
Работа от сети переменного тока 220 В, 50 Гц

3

Измеритель параметров силовых трансформаторов СЭИТ-4М-К540
Провести электромагнитные испытания трансформатора в соответствии с ГОСТ 3484.1-88:
- измерить потери и ток ХХ;
- измерить потери и напряжение КЗ;
- определить коэффициент трансформации и группу соединения обмоток;
- измерить сопротивление обмоток постоянному току.
Наличие двух вариантов интерфейса связи с ПК (Bluetooth или оптоволокно)
Возможность расширения диапазона измерения по току до 60 А за счет использования блока трансформаторов тока ЧЭП3905 (который также подвергается поверке)
Формирование протокола испытаний

реклама
тел.: +7 (351) 211-54-01
e-mail: info@limi.ru
Internet: www.limi.ru
ООО "ЧЕЛЭНЕРГОПРИБОР" - ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ ПРИБОРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ В ЭНЕРГЕТИКЕ