

Авторы:

Александрова М.И.²,
к.т.н. Наумов В.А.²,
д.т.н. Антонов В.И.^{1,2},
Иванов Н.Г.^{1,2},
Солдатов А.В.^{1,2},
к.т.н. Васильева В.Я.¹,

¹ ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

² ООО НПП «ЭКРА»,
г. Чебоксары, Россия.

Alexandrova M.I.²,
Ph.D. Naumov V.A.²,
D.Sc. Antonov V.I.^{1,2},
Ivanov N.G.^{1,2},
Soldatov A.V.^{1,2},
Ph.D. Vasilieva V.J.¹,

¹ Chuvash State University,

² EKRA Research and
Production Enterprise LTD,
Cheboksary, Russia.

Abstract: controlled switching
of power equipment is
intended to reduce a transients
in order to prevent network

Ключевые слова: управляемая коммутация электрооборудования, точность управляемой коммутации, RDDS, RRDS.

disruption and equipment damage. Reducing the transients' intensity is achieved by appropriate choice of switching moment, taking into account the switched equipment operation mode. Efficient controlled switching require an accurate prediction of the circuit breaker operating time. The controlled switching algorithms must take into account not only the circuit breaker operating time, but also the dynamic characteristics of dielectric strength of contact gap, the deviations of circuit breaker operating time due to ambient temperature, stored energy of drive, control voltage, idle time, and wear of contact system. All controlled switching devices have same information structure because of universality of controlled switching principles.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

UNIVERSAL PRINCIPLES OF POWER EQUIPMENT CONTROLLED SWITCHING

Аннотация: управляемая коммутация силового электрооборудования предназначена для ослабления переходных процессов и предотвращения нарушений работы сети и повреждения оборудования. Снижение интенсивности переходных процессов достигается надлежащим выбором момента коммутации с учетом режима работы коммутируемого электрооборудования.

Необходимым условием эффективности управляемой коммутации является точное прогнозирование времени работы выключателя. Алгоритмы управляемой коммутации должны учитывать не только собственное время включения и отключения выключателя, но и динамические характеристики электрической прочности контактного промежутка, изменение собственного времени включения и отключения при изменении температуры окружающей среды, давления рабочей жидкости или газа в приводе, напряжения питания электромагнитов управления, время простоя и износ контактной системы.

Все устройства управляемой коммутации обладают единством информационной структуры благодаря универсальности основ принципов управляемой коммутации.

Введение

Коммутация силового оборудования (батарей конденсаторов, шунтирующих реакторов и трансформаторов) в электрической сети сопровождается переходными процессами, которые могут нарушить ее работу или привести к повреждениям [1, 2].

Влияние коммутации различных типов электрооборудования на режим сети проявляется по-разному.

Включение батарей конденсаторов в неблагоприятный момент может вызывать значительные броски тока и перенапряжения. Большие токи включения приводят к эрозии контактов выключателя, а перенапряжения – к повреждению изоляции оборудования сети. Кроме того, при неконтролируемом отключении на батареях конденсаторов сохраняется остаточный заряд, что является причиной быстрого повышения напряжения на контактах выключателя до значений, превышающих номинальное напряжение, вызывая повторные пробои контактного промежутка. В результа-

те повторные зажигания дуги в выключателе приводят к износу контактов и перенапряжениям в сети.

Включение шунтирующих реакторов может сопровождаться появлением значительной аperiodической составляющей в токе и, вследствие этого, возникновением ударных токов, оказывающих электродинамическое воздействие на оборудование сети. В то же время аperiodическая составляющая является причиной насыщения силовых и измерительных трансформаторов, приводя к ухудшению качества электроэнергии и повышению вероятности ложной работы релейной защиты. Отключение шунтирующих реакторов во множестве случаев также вызывает повторные зажигания дуги на контактах выключателя, что вызывает перенапряжения в сети и неблагоприятно сказывается на ресурсе коммутационного оборудования [3].

При включении силового трансформатора, особенно ненагруженного, велика вероятность возникновения значительных бросков



Keywords: controlled switching of power equipment, controlled switching accuracy, RDDS, RRDS.



**Александрова
Марина Ивановна**

Получила степень магистра по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Автоматика энергосистем» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2018 г.
Инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА».



**Иванов
Николай Геннадьевич**

Получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электроэнергетика и электротехника» в 2013 г. на кафедре ТОО и РЗА электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова.
Руководитель группы разработки интеллектуальных электронных устройств департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», аспирант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы».

тока намагничивания, которые оказывают неблагоприятное динамическое воздействие на его обмотки, сокращая срок его службы и снижая устойчивость функционирования релейной защиты [3].

Для предотвращения негативного влияния переходных процессов на электрооборудование необходимо предпринимать специальные технические мероприятия при их коммутации. Одним из таких современных мероприятий, призванных снизить интенсивность переходных процессов, является выбор оптимальной фазы коммутации. Такой способ коммутации получил название управляемой [4].

В настоящей статье рассматриваются принципы управляемой коммутации, способы прогнозирования собственного времени включения и отключения выключателя, факторы, влияющие на точность коммутации, и структура устройства управляемой коммутации. Принцип управляемой коммутации иллюстрируется примером включения шунтирующего реактора.

Процессы при включении реактора и выбор оптимальной фазы включения

Рассмотрим процесс включения реактора (рис. 1) в сеть синусоидального напряжения $u_s(t) = U \sin(\omega t + \psi)$, принимая в момент включения $t = 0$.

Ток в реакторе после коммутации содержит принужденную

$$i_{st}(t) = \frac{U}{Z_{\Sigma}} \sin(\omega t + \psi - \phi) \quad (1)$$

и свободную

$$i_{fr}(t) = I_0 e^{-t/\tau} \quad (2)$$

составляющие, где $Z_{\Sigma} = (R_s + R_R) + j\omega(L_s + L_R) = Z_{\Sigma} e^{j\phi}$ – суммарное сопротивление всей цепи включения реактора.

Сопротивление реактора намного больше сопротивления системы $Z_R \gg Z_S$, поэтому ток определяется, в основном, сопротивлением реактора. Существующие реакторы имеют невысокий уровень активных потерь (согласно данным [5] $R_R \leq 0,0036 X_R$), поэтому можно считать, что модуль суммарного сопротивления

$$Z_{\Sigma} \approx X_R = \omega L_R \quad (3)$$

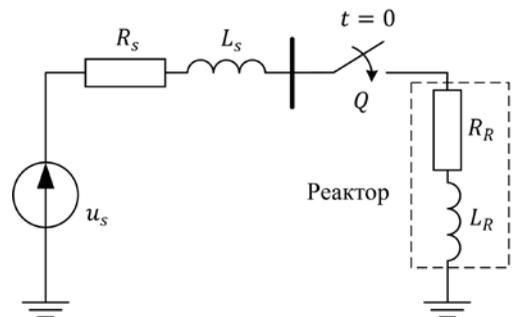


Рис. 1. Эквивалентная схема сети при включении реактора

и угол

$$\phi = \arg\{Z_{\Sigma}\} \approx \pi / 2. \quad (4)$$

До включения реактора ток в нем равен нулю, поэтому в начальный момент замыкания электрической цепи выполняется равенство $i(0) = i_{fr}(0) + i_{st}(0) = 0$.

Поэтому

$$i_{fr}(0) = -i_{st}(0). \quad (5)$$

Из (1), (2) и (5) с учетом (3) и (4) следует, что начальное значение свободной составляющей тока реактора

$$I_0 = -\frac{U}{X_R} \cos \psi. \quad (6)$$

Оптимальным будет включение выключателя в моменты, соответствующие фазам напряжения $\psi = \pi / 2$ или $\psi = 3\pi / 2$. В этом случае создаются условия, предотвращающие

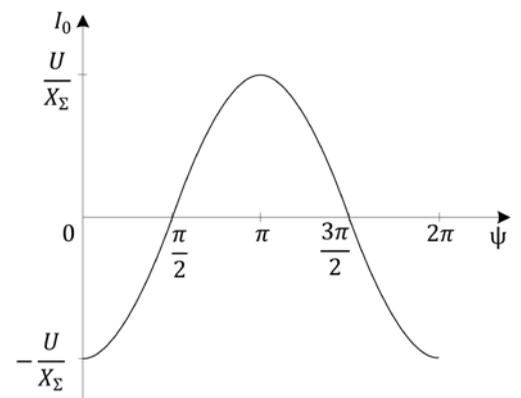


Рис. 2. Зависимость начального значения свободной составляющей тока реактора (6) от фазы питающего напряжения в момент включения



Антонов

Владислав Иванович

Получил диплом инженера-электрика в 1978 г. на факультете электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2018 г. защитил в докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматизации ЧГУ им. И.Н. Ульянова, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА».



Солдатов

Александр Вячеславович

Получил диплом инженера на электроэнергетическом факультете ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2006 г. Заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА».

возникновение апериодической слагаемой в токе реактора (рис. 2). Обычно в качестве уставки принимается угол

$$\psi_{set} = \pi / 2. \quad (7)$$

Учет динамических характеристик электрической прочности контактного промежутка выключателя

В ходе сближения контактов выключателя электрическая прочность промежутка снижается, и при достижении напряжением электрической прочности промежутка между контактами зажигается электрическая дуга. Электрическая дуга горит до момента механического касания контактов выключателя.

Скорость снижения электрической прочности промежутка выключателя характеризуется параметром, называемым RDDS (Rate of Decay of Dielectric Strength)

$$RDDS = \frac{u(t_{elec})}{t_{mech} - t_{elec}} [\text{кВ/мс}], \text{ где } t_{elec} - \text{ момент}$$

замыкания электрической цепи (момент зажигания дуги), t_{mech} – момент механического касания контактов выключателя. Для идеального выключателя RDDS равен бесконечности. Это означает, что в идеальном выключателе замыкание электрической цепи наступает строго в момент механического касания контактов t_{elec} (рис. 3). Электрическая прочность контактного промежутка реального выключателя снижается с конечной скоростью [6], вследствие чего момент замыкания элек-

трической цепи не совпадает с механическим замыканием контактов: он наступает при пересечении линии снижения электрической прочности контактного промежутка с кривой напряжения на контактах выключателя. Поэтому это обстоятельство следует принять во внимание при предсказании момента включения, поскольку реальное время включения выключателя уменьшится

$$\text{на величину } T_{arc} = t_{mech} - t_{elec} = \frac{U_m}{RDDS}.$$

Таким образом, интервал времени от момента приведения выключателя в действие и до момента замыкания электрической цепи будет равен

$$T_{make} = T_{close} - T_{arc}, \quad (8)$$

где T_{close} – собственное время включения выключателя, т.е. интервал времени между моментом поступления команды включения и моментом механического соприкосновения контактов выключателя [9].

В случае управляемого отключения расчет времени размыкания электрической цепи коммутируемого электрооборудования осуществляется аналогично с учетом собственного времени отключения выключателя и параметра RRDS (Rate of Rise of Dielectric Strength), нормируемых производителями выключателей [10].

Принцип управляемой коммутации

Момент поступления команды на включение реактора t_{cmd} произволен. Устройством управляемой коммутации момент t_{cmd} принимается за начало отсчета времени коммутации, т.е. $t_{cmd} = 0$. В момент t_{cmd} оценивается фаза ψ опорного сигнала (рис. 4) и с учетом собственного времени включения выключателя T_{close} прогнозируется время замыкания электрической цепи T_{make} согласно формуле (8). При оценке фазы ψ используются методы структурного анализа [7].

Отсчет времени замыкания T_{make} должен завершиться на максимуме U_m напряжения $u_s(t)$ с целью выполнения условия (7) в момент электрического замыкания цепи (в момент t_{elec}). Для этого устройство определяет расчетное время задержки T_{delay} выдачи команды на электромагнит включения выключателя t_{start} с таким расчетом, чтобы $t_{start} + T_{make} = t_{elec}$.

Интервал времени T_{make} включает в себя несколько периодов опорного сигнала, т.е.

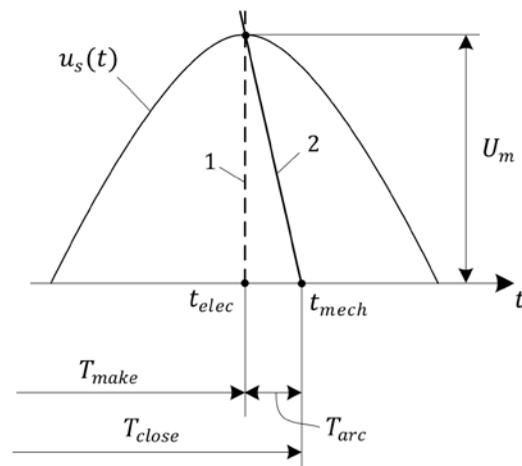


Рис. 3. Влияние RDDS идеального (1) и реального (2) выключателей на момент замыкания электрической цепи



Наумов Владимир Александрович
Получил диплом инженера в 2001 г., защитил магистерскую диссертацию в 2002 г. на электроэнергетическом факультете ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2005 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор».



Васильева Валентина Яковлевна
Получила диплом инженера-электрика на факультете электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1972 г. В 1978 г. защитила в Московском энергетическом институте кандидатскую диссертацию «Исследование электрических цепей с переменной структурой при вероятностном задании параметров».

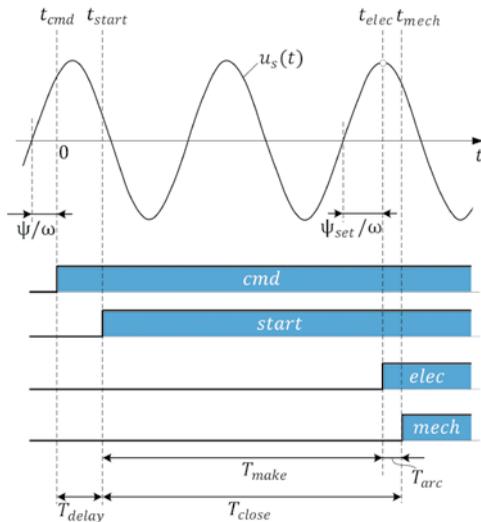


Рис. 4. Иллюстрация принципа управляемого включения реактора:

- t_{cmd} – момент получения команды включения;
- t_{start} – момент выдачи команды включения выключателем устройством управляемой коммутации;
- t_{elec} – момент замыкания электрической цепи;
- t_{mech} – момент механического касания контактов выключателя;
- T_{close} – собственное время включения выключателя;
- T_{delay} – задержка команды включения;
- T_{arc} – время горения дуги;
- cmd – внешняя команда на включение реактора;
- $start$ – команда включения, формируемая устройством управляемой коммутации;
- $elec$ – замыкание электрической цепи;
- $mech$ – замыкание контактов выключателя

$$\psi + \omega T_{make} = \pi m + \Delta\psi,$$

где

$$\Delta\psi = \psi + \omega T_{make} - \pi \left\lfloor \frac{\psi + \omega T_{make}}{\pi} \right\rfloor.$$

В то же время справедливо следующее равенство:

$$\psi + \omega (T_{make} + T_{delay}) = \psi_{set} + \pi n.$$

Таким образом, время задержки T_{delay} вычисляется как

$$T_{delay} = \frac{\psi_{set} - \Delta\psi}{\omega} + \zeta \frac{T}{2}, \quad (9)$$

где ψ_{set} – уставка (фаза включения), в данном

случае $\psi_{set} = \pi / 2$; $T = 2\pi / \omega$ – период опорного сигнала;

$$\zeta = \begin{cases} 1, & \Delta\psi > \psi_{set}, \\ 0, & \Delta\psi \leq \psi_{set}. \end{cases}$$

Устройство действует на электромагнит выключателя в момент времени t_{start} отстоящий от момента прихода команды t_{cmd} на время T_{delay} (9). Включение реактора произойдет в момент t_{elec} когда напряжение на реакторе достигнет максимума.

Факторы, влияющие на точность коммутации

Время действия выключателя зависит от многих факторов [6]: 1) температуры окружающей среды; 2) давления рабочей жидкости или газа в приводе; 3) напряжения питания цепей электромагнитов управления выключателя; 4) времени безоперационного простоя выключателя; 5) износа контактов выключателя в процессе эксплуатации. Для обеспечения заданной точности коммутации требуется учет влияния упомянутых факторов. Поэтому в оценку времени действия выключателя нужно вносить корректирующие поправки:

$$\hat{T}_{oper} = T_{nom} + \Delta T_{cond} + \Delta T_{prev} + \Delta T_{idle},$$

где T_{nom} – номинальное время работы выключателя; ΔT_{cond} – поправка, учитывающая влияние условий работы выключателя; ΔT_{prev} – поправка, корректирующая время действия выключателя с учетом работы в цикле предыдущей коммутации; ΔT_{idle} – поправка, учитывающая влияние времени простоя выключателя.

Рассмотрим особенности учета влияния факторов на точность управляемой коммутации.

Учет условий работы выключателя

К условиям работы выключателя относят температуру окружающей среды, давление рабочей жидкости или газа и напряжения питания электромагнитов включения и отключения выключателя. Их влияние учитывают, используя сигналы с датчиков температуры и давления (в аналоговой форме в виде тока в диапазоне от 4 до 20 мА или цифровой форме), измерения напряжения питания цепей электромагнитов аналоговым входом устройства [8]. При использовании выключателей, не имеющих обогрева привода, измеряют температуру окружающего воздуха, а в выключателях с

обогревом привода – температуру в приводе.

Обычно поправки по температуре окружающей среды t_{amb} , давлению в приводе p и напряжению оперативного питания U_{DC} задаются автономно (без взаимного учета остальных факторов) в форме таблиц или в виде коэффициентов аппроксимирующего полинома [8, 11]. Поэтому суммарная поправка, учитывающая условия окружающей среды, вычисляется как

$$\Delta T_{cond} = f(t_{amb}) + f(p) + f(U_{DC}).$$

Автономный учет условий работы выключателя обеспечивает необходимую точность лишь в пределах малого диапазона изменения влияющих факторов. При расчете поправки для случаев изменения указанных факторов в широких пределах рекомендуется использовать функции нескольких переменных $\Delta T_{cond} = f(t_{amb}, p, U_{DC})$ [12].

Учет времени работы выключателя в цикле предыдущей коммутации

В процессе эксплуатации выключателя неизбежен износ рабочей поверхности контактов и элементов привода, вследствие чего время действия выключателя изменяется. Учет этого изменения устройство осуществляет с помощью поправки, рассчитанной на основе анализа отклонения фактических времени действия выключателя T_{oper}^{prev} от ожидаемого \hat{T}_{oper}^{prev} в цикле предыдущих коммутаций [13]

$$\Delta T_{prev} = f(T_{oper}^{prev} - \hat{T}_{oper}^{prev}).$$

Учет времени простоя выключателя

Во время безоперационного простоя выключателя, например с гидравлическим приводом, в рабочей жидкости появляются воздушные пузырьки [14]. В результате увеличивается сжимаемость жидкости и появляется дополнительная задержка в действии привода выключателя. Эта задержка становится заметной уже через несколько часов безоперационного простоя выключателя [4].

С целью учета времени простоя устройство отсчитывает время с момента последней операции t_{idle} и рассчитывает поправку $\Delta T_{idle} = f(t_{idle})$ в соответствии с заданной характеристикой для коммутационного электрооборудования.

Информационные потоки в устройствах управляемой коммутации

Выпускаемые в настоящее время устройства управляемой коммутации являются едиными для всех видов коммутируемого оборудования и могут использоваться для коммутации конденсаторных батарей, шунтирующих реакторов, трансформаторов и ЛЭП. Настройка устройств на конкретный тип оборудования выполняется выбором соответствующего алгоритма и уставками.

Момент коммутации синхронизируется с фазами

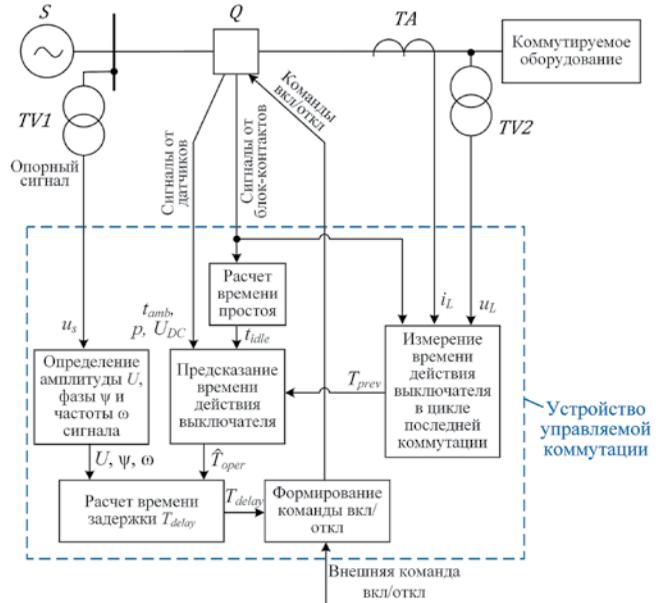


Рис. 5. Информационные потоки в устройствах управляемой коммутации

опорного сигнала. При включении в качестве опорного сигнала обычно используют сигнал напряжения со стороны источника питания. При операциях отключения фазу коммутации определяют по кривой тока, но, принимая во внимание (4), за опорный сигнал может быть принят сигнал напряжения.

Кроме опорного сигнала к устройству подводят сигналы обратной связи (рис. 5), к которым в общем случае относятся сигнал тока, сигнал напряжения со стороны коммутируемого электрического объекта и дискретные сигналы от блок-контактов каждой фазы выключателя. Информация, получаемая по каналам обратной связи, используется устройствами управляемой коммутации для коррекции расчетного времени действия выключателя и оценки успешности проведенной коммутации. Измерения тока и напряжения со стороны нагрузки используются для контроля момента коммутации, регистрации повторных пробоев контактного промежутка и оценки времени горения дуги. При коммутации силовых трансформаторов на холостом ходу в качестве сигнала обратной связи для подтверждения расчетного момента коммутации удобно использовать сигнал напряжения, поскольку ток холостого хода трансформатора относительно невелик.

Выводы

1. Принципы управляемой коммутации имеют универсальную основу, заключенную в выборе оптимальной фазы коммутации. В связи с этим информационные потоки и функциональная схема устройств управляемой коммутации едины для всех типов коммутируемых электрических объектов (трансформатор, линия электропередачи, конденсаторная батарея и шунтирующий реактор).



2. В алгоритмах управляемой коммутации должны учитываться не только собственное время включения (отключения) выключателя, но и динамические характеристики электрической прочности контактного промежутка выключателя в процессе коммутации (характеристики RRDS и RRDS).

3. Для обеспечения высокой точности и стабильности работы устройств управляемой коммутации их алгоритмы должны прогнозировать время действия выключателя с учетом различных факторов, таких как температура окружающей среды, давление рабочей жидкости или газа в приводе, напряжение питания электромагнитов управления выключателя, время безоперационного простоя выключателя и время его действия в цикле предыдущей коммутации.

4. Успешность проведенной коммутации контролируется в устройствах на основе анализа сигналов тока и напряжения со стороны коммутируемых электрических объектов.

Литература:

1. CIGRE WG 13.07, «Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers». 1st Part, «ELECTRA», No. 183, April 1999, pp. 65–96.
2. CIGRE WG 13.07, «Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers». 2nd Part, «ELECTRA», No. 185, August 1999, pp. 36–61.
3. CIGRE WG A3.07, «Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Planning, Specification and Testing Of Controlled Switching Systems». CIGRE Technical

Brochure No. 264, December 2004, 55 p.

4. CIGRE Study Committee A3: High Voltage Equipment. Switching Equipment. CIGRE Green Books, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019, 584 p.
5. СТО 56947007-29.180.078-2011 Стандарт организации. Типовые технические требования к шунтирующим реакторам 110, 220, 330, 500 кВ. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2018.
6. Gabriel Benmouyal, Normann Fischer, Douglas Taylor, Mark Talbott-Williams, Ritwik Chowdhury. A unified approach to controlled switching of power equipment // 44th Annual Western Protective Relay Conference, October 2017.
7. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В.И. Антонов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2018. – 334 с.
8. Switchsync PWC600. Technical manual [Электронный ресурс]. 2017. – Режим доступа: <http://search-ext.abb.com/library>
9. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия : ГОСТ Р 52565-2006. – ОАО "ВНИИЭ", ГУП "ВЭИ", 2006.
10. Журавлев Д.М., Нудельман Г.С., Балашов С.В., Pierre Taillefer. Технология управляемой коммутации и мониторинга выключателей для электроэнергетики и промышленности. Особенности применения и перспективы внедрения // Релейная защита и автоматика энергосистем: сборник докладов XXII конференции. – М., 2014. – С. 34-42.
11. MASY-0141-C SynchroTeq Reference Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vizimax.com/support/download>
12. Dan Goldsworthy, Tom Roseburg, Demetrios Tziouvaras, Jeff Pope. Controlled switching of HVAC circuit breakers: application examples and benefits // 34th Annual Western Protective Relay Conference, October 2017.
13. H. Tsutada, T.Hirai, H.Kohyama, H. Ito and K. Sasaki. Development of Synchronous Switching Controller for Gas Circuit Breakers. // Proceedings of IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Vol. 2, pp. 807-812, 2002.
14. Sadayuki Kinoshita, Hiroki Ito. Factory and Field Tests of Controlled Switching in Accordance with IEC62271-302 Standard. Mitsubishi Electric Advance, Vol. 117, March, 2007.

ASTANA

Powerexpo

8-я КАЗАХСТАНСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

ЭНЕРГЕТИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ



2019
22-24 мая
ВЦ "Корме", Астана, Казахстан

www.POWEREXPO.kz

ОРГАНИЗАТОРЫ:




Тел. +7 (727) 2583434
E-mail: power@iteca.kz

ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА :

