

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2020 4

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Опыт масштабирования конструкции МЭКС для применения в ГТУ разной мощности

Расширение регулировочного диапазона на основе промышленных исследований надёжности работы оборудования энергоблока большой мощности

Модернизация автоматического химического контроля энергоблоков ТЭС на основе измерений электропроводности и pH

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Анализ динамических характеристик вариантов САРЧМ энергоблока 800 МВт № 1 Пермской ГРЭС при выделении на изолированный энергорайон

Система защиты воздушных линий напряжением 0,38 и 6 – 10 кВ от обрывов проводов

ОБОРУДОВАНИЕ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Методологические принципы управления активами при эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше электрических сетей

Оптимальные условия управляемого отключения трёхфазного шунтирующего реактора

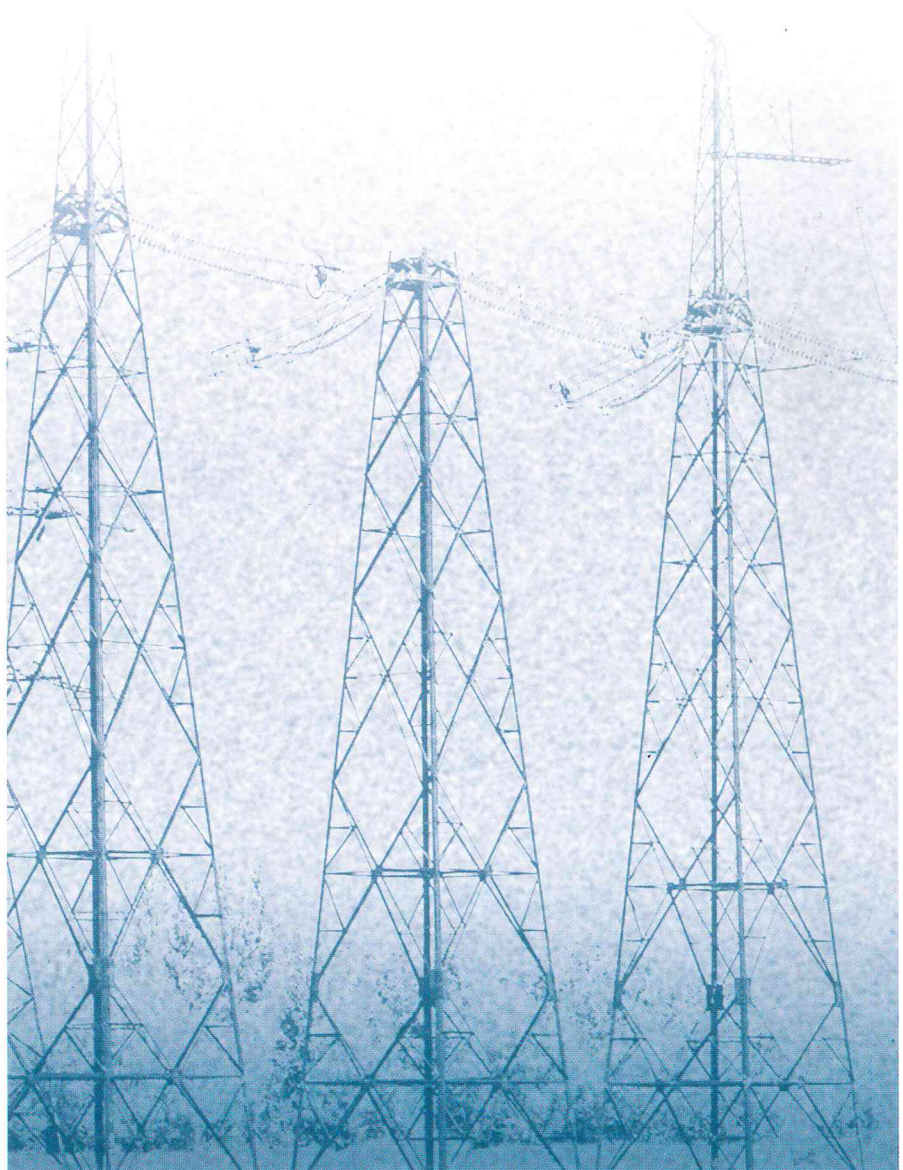
Диагностические обследования экранированных токопроводов

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Решение проблемы улавливания высокоомной золы электрофильтрами

ХРОНИКА

Новости электротехнических и электроэнергетических компаний





ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2020 4

УЧРЕДИТЕЛИ

МИНЭНЕРГО РОССИИ,
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ
КОМПАНИЯ ЕЭС,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АССОЦИАЦИЯ
"КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК",
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИРМА
"ЭНЕРГОПРОГРЕСС",
НП "НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС"

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **Ольховский Г.Г.**,
доктор техн. наук, чл.-кор. РАН
Зам. главного редактора **Сокур П.В.**,
канд. техн. наук
Антипов К.М., канд. техн. наук
Бондаренко А.Ф., Волков Э.П., академик РАН,
Воротницкий В.Э., доктор техн. наук,
Денисов В.И., доктор эконом. наук,
Долматов И.А., канд. эконом. наук,
Зорченко Н.В., канд. техн. наук, Касьянов Л.Н.,
Корниенко А.Г., Кошцев Л.А., доктор техн. наук,
Лачугин В.Ф., доктор техн. наук,
Лейзерович А.Ш., доктор техн. наук (США),
Львов М.Ю., доктор техн. наук,
Любарский Д.Р., доктор техн. наук,
Мисриханов М.Ш., доктор техн. наук,
Нечаев В.В., канд. техн. наук,
Новак В., доктор техн. наук (Польша),
Орфеев В.М., Пикин М.А., канд. техн. наук,
Савваитов Д.С., канд. техн. наук,
Седлов А.С., доктор техн. наук,
Соловьёва Т.И., Тулов В.Б., доктор техн. наук,
Широкова М.И., Шульгинов Н.Г., канд. техн. наук

РЕДАКЦИЯ

Зам. главного редактора
Соловьёва Т.И.
Ответственный секретарь, научный редактор
Широкова М.И.
Секретарь редакции
Васина С.А.
Компьютерный набор
Коновалова О.Ф.

АДРЕС РЕДАКЦИИ

115280, Москва,
3-й Автозаводский проезд, 4, корп. 1

ТЕЛЕФОНЫ

Редакция (495) 234-7417, 234-7419

Главный редактор (495) 234-7617

Internet www.elst.energy-journals.ru

E-mail

el-stantsii@rambler.ru
el.stantsii@gmail.com

Журнал включен в перечень ВАК.
Свидетельство о регистрации СМИ –
ПИ № ФС 77-37404 от 04.09.2009;
рег. орган – Роскомнадзор

Редакция не несёт ответственности за
достоверность информации, опубликованной
в рекламных объявлениях.
При перепечатке ссылка на журнал
«Электрические станции» обязательна.

Сдано в набор 17.03.2020

Подписано в печать 13.04.2020

Дата выхода в свет 27.04.2020

Формат 60×84 1/8

Бумага Galerie Art Silk. Печать офсетная
Усл. п. л. 9. Тираж 1800. Цена свободная

Оригинал-макет
выполнен в издательстве "Фолиум"
127411, Москва, Дмитровское ш., 157
Тел/факс: (499) 258-0828
Internet: www.folium.ru
E-mail: prepress@folium.ru

Отпечатано
в типографии издательства "Фолиум"
127411, Москва, Дмитровское ш., 157

Адрес учредителя и издателя: 109044, Москва,
Воронцовский пер., д. 2, стр. 1

© НТФ "Энергопрогресс",
"Электрические станции", 2020

Издаётся
с января 1930 г.
1065-й выпуск
с начала издания

Содержание

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	
Бульсова Л. А., Тумановский А. Г., Гутник М. Н., Васильев В. Д. Опыт масштабирования конструкции МЭКС для применения в ГТУ разной мощности	2
Сомова Е. В., Гомболевский В. И., Мешков А. В., Крылов А. В., Морозов М. А. Расширение регулировочного диапазона на основе промышленных исследований надёжности работы оборудования энергоблока большой мощности	8
Ларин А. Б., Ларин Б. М., Савинов М. П., Киет С. В. Модернизация автоматического химического контроля энергоблоков ТЭС на основе измерений электропроводности и pH	14
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ	
Черномзав И. З., Нефедов К. А., Биленко В. А. Анализ динамических характеристик вариантов САРЧМ энергоблока 800 МВт № 1 Пермской ГРЭС при выделении на изолированный энергорайон	23
Ершов А. М., Хлопова А. В., Сидоров А. И. Система защиты воздушных линий напряжением 0,38 и 6 – 10 кВ от обрывов проводов	28
ОБОРУДОВАНИЕ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ	
Львов М. Ю., Львов Ю. Н. Методологические принципы управления активами при эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше электрических сетей	33
Александрова М. И., Наумов В. А., Антонов В. И., Иванов Н. Г. Оптимальные условия управляемого отключения трёхфазного шунтирующего реактора	41
Долин А. П. Диагностические обследования экранированных токопроводов	48
ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	
Чекалов Л. В., Гузаев В. А., Смирнов М. Е. Решение проблемы улавливания высокоомной золы электрофильтрами	54
ХРОНИКА	
А. Ф. Бондаренко (К 75-летию со дня рождения)	60
Новости электротехнических и электроэнергетических компаний	62
Content, Abstracts, Keywords	69
Правила оформления рукописи статьи	71

110 кВ и выше электрических сетей [Текст] / А. В. Майоров, М. Ю. Львов, Ю. Н. Львов, В. Б. Комаров, Б. Г. Ершов // Энергетик. – 2019. – № 9. – С. 10 – 16.

11. *Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации.* – М.: СПО ОРГРЭС, 2003.
12. *Объём и нормы испытаний электрооборудования* [Текст]: РД 34.45-51.300-97. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 1998.
13. *Майоров, А. В.* Методологические аспекты предотвращения внутренних коротких замыканий, взрывов и пожаров силовых трансформаторов при эксплуатации [Текст] / А. В. Майоров, М. Ю. Львов, Ю. Н. Львов, В. Б. Комаров // Энергетик. – 2018. – № 5. – С. 19 – 22.
14. *Майоров, А. В.* Методология принятия решений при оценке технического состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей с учётом фактора риска повреждения [Текст] / А. В. Майоров, М. Ю. Львов, Ю. Н. Львов // Электрические станции. – 2019. – № 9. – С. 14 – 20.
15. *Львов, М. Ю.* Методологические аспекты развития частичных разрядов и контроля изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации [Текст] / М. Ю. Львов, Ю. Н. Львов, В. Б. Комаров, С. А. Кулюхин, Ю. А. Митькин, В. П. Вдовико // Энергетик. – 2017. – № 9. – С. 16 – 20.
16. *Львов, М. Ю.* Мониторинг аварийного режима силовых трансформаторов и автотрансформаторов [Текст] / М. Ю. Львов, Ю. Н. Львов // Энергия единой сети. – 2019. – № 5(48). – С. 62 – 66.

DOI: 10.34831/EP.2020.1065.4.007

Оптимальные условия управляемого отключения трёхфазного шунтирующего реактора

- **Александрова М. И.¹**, ООО НПП “ЭКРА”, Чебоксары
- **Наумов В. А.**, канд. техн. наук, ООО НПП “ЭКРА”, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары
- **Антонов В. И.**, доктор техн. наук, ООО НПП “ЭКРА”, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары
- **Иванов Н. Г.**, ООО НПП “ЭКРА”, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чебоксары

Отключение шунтирующих реакторов в электрической сети во множестве случаев сопровождается повторным зажиганием дуги на контактах выключателя и возникновением опасных перенапряжений в сети. Для ограничения подобных перенапряжений применяются устройства управляемой коммутации, осуществляющие отключение реактора в оптимальную фазу тока. С целью выбора оптимальных условий отключения проанализированы процессы при коммутации шунтирующего реактора. Принято во внимание интуитивно ясное отличие условий отключения трёхфазных шунтирующих реакторов от условий отключения однофазных реакторов, связанное с взаимной электрической и/или магнитной связью между обмотками фаз. Универсальность метода анализа условий отключения трёхфазных шунтирующих реакторов обеспечивается использованием схемы замещения в виде четырёхлучевой звезды. Отключения фаз реактора синхронизируются относительно кривой напряжения фазы A и производятся в последовательности $A \rightarrow C \rightarrow B$, обеспечивая тем самым сокращение времени коммутации.

Ключевые слова: управляемое отключение оборудования, трёхфазный шунтирующий реактор.

Контролируемое отключение шунтирующих реакторов применяется с целью уменьшения вероятности появления опасных перенапряжений в сети [1, 2]. Возникающие при отключении перенапряжения могут привести к повреждению изоляции реактора и к неоправданному износу элементов выключателя. Повышенный износ выключателей реакторов подтверждается статистикой: число отказов выключателей шунтирующих реакторов на порядок больше числа отказов выключателей линий электропередачи и трансформаторов [3].

Устройства управляемой коммутации настраиваются на отключение шунтирующего реактора в

оптимальную фазу тока. Очевидно, что выбор оптимальных условий коммутации фаз трёхфазного реактора требует учёта особенностей его конструкции, поскольку обмотки реактора объединены одним магнитопроводом и подвержены влиянию соседних фаз из-за магнитной связи. Другими словами, выбор оптимальных фаз коммутации трёхфазных шунтирующих реакторов зависит от схемы соединения обмоток и конструкции магнитопроводов.

В настоящей работе анализируются процессы, сопровождающие отключение шунтирующего реактора, и разрабатывается универсальный метод определения оптимальных условий отключения всех видов трёхфазных шунтирующих реакторов.

¹ Александрова Марина Ивановна: alexandrova_mi@ekra.ru

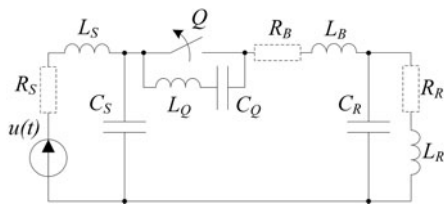


Рис. 1. Эквивалентная расчётная схема сети

Процессы при отключении шунтирующего реактора. Перенапряжения во время отключения шунтирующих реакторов возникают по двум причинам. Первая из них заключается в явлении “среза” тока в выключателе, под которым понимается досрочное прерывание тока до его естественного перехода через нуль. Вторая причина кроется в повторном зажигании дуги на контактах выключателя [3].

Для анализа перенапряжений воспользуемся схемой, изображённой на рис. 1. Реактор представлен индуктивностью L_R и ёмкостью C_R , учитывающей межвитковую ёмкость и ёмкость участка воздушной или кабельной линии между выключателем и реактором. Электрическая система замещена источником ЭДС $u(t) = U \sin(\omega t + \psi)$, индуктивностью рассеяния L_S и ёмкостью C_S . Включённые параллельно контактам индуктивность L_Q и ёмкость C_Q – параметры выключателя. Соединительные провода от реактора до выключателя представлены индуктивностью L_B . На практике электрическая система, соединительные провода и реактор имеют некоторое активное сопротивление (R_S , R_B и R_R), обуславливающее затухание переходных процессов. Однако из-за его относительной малости при рассмотрении процессов отключения шунтирующего реактора им можно пренебречь.

Высоковольтные выключатели рассчитаны на отключение больших токов короткого замыкания и сравнительно малые рабочие токи шунтирующего реактора отключают за короткий промежуток времени. При малых токах дуга в выключателе горит нестабильно, и поэтому при отключении реактора она может быть погашена досрочно при значении тока среза I_{ch} ещё до естественного перехода кривой тока через нуль. Вследствие этого в индуктивности реактора сохраняется энергия магнитного поля

$$W_L = \frac{L_R I_{ch}^2}{2},$$

а в ёмкости – энергия электрического поля

$$W_C = \frac{C_R U_{ch}^2}{2},$$

где U_{ch} – напряжение среза.

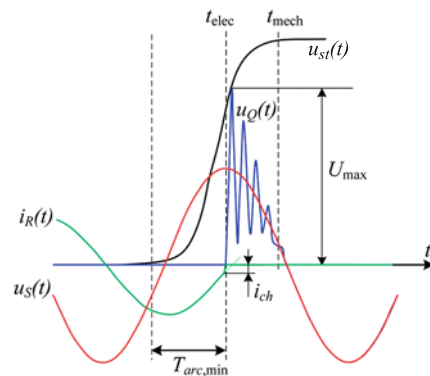


Рис. 2. Иллюстрация принципа выбора минимального времени грейня дуги при отключении реактора:

$i_R(t)$ – ток реактора; i_{ch} – ток среза; $T_{arc, min}$ – время горения дуги; $u_Q(t)$ – напряжение на контактах выключателя; $u_{st}(t)$ – электрическая прочность межконтактного промежутка; t_{elec} – момент погасания дуги (момент среза тока); t_{mech} – момент полного механического расхождения контактов выключателя; U_{max} – уровень перенапряжения; $u_S(t)$ – напряжение источника питания

После отключения реактора в контуре, образованном индуктивностью L_R и ёмкостью C_R , возникают колебания с частотой (рис. 2)

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}}.$$

Для масляных реакторов частота f_R составляет от 1 до 5 кГц [4].

Амплитуда возникающих перенапряжений находится из закона сохранения энергии

$$\frac{C_R U_{max}^2}{2} = \frac{C_R U_{ch}^2}{2} + \frac{L_R I_{ch}^2}{2}$$

и достигает значения

$$U_{max} = \sqrt{U_{ch}^2 + \frac{L_R}{C_R} I_{ch}^2}. \quad (1)$$

В вакуумных выключателях ток среза определяется главным образом материалом контактов. Для всех остальных типов выключателей значение тока среза зависит от параметров выключателя и параметров сети и может быть вычислено по формуле

$$I_{ch} = \lambda \sqrt{N C_t}, \quad (2)$$

где $C_t = C_Q + \frac{C_S C_R}{C_S + C_R}$ – ёмкость всей сети относи-

тельно контактов выключателя (рис. 1); N – число включённых последовательно дугогасительных модулей на каждом полюсе выключателя; λ – коэффициент, характеризующий уровень тока среза выключателя, отнесённый к одному дугогасительному модулю (определяется в ходе лабораторных испытаний).

У большинства выключателей коэффициент λ зависит от времени горения дуги. Если для коэффициента λ линейная зависимость от времени горения дуги явно не прослеживается, допускается использовать среднее статистическое значение λ . Характерные значения коэффициента λ для высоковольтных выключателей с различными дугогасящими средами, согласно стандарту, находятся в диапазоне от $0,39 \cdot 10^4$ до $20 \cdot 10^4$ А·Ф^{-0,5} [4].

С учётом уравнения (2) формула (1) перепишется в виде

$$U_{\max} = \sqrt{U_{ch}^2 + N\lambda^2 L_R \left(\frac{C_Q}{C_R} + \frac{C_S}{C_S + C_R} \right)}. \quad (3)$$

Наибольшие кратности перенапряжений достигаются при $C_S > C_R$, поэтому в приближённых расчётах допустимо использование формулы

$$U_{\max} \approx \sqrt{U_{ch}^2 + N\lambda^2 L_R \left(\frac{C_Q}{C_R} + 1 \right)}.$$

Если к моменту прерывания тока уровень перенапряжения, вызванного срезом тока, превысит уровень электрической прочности межконтактного промежутка, то происходит повторное зажигание дуги, сопровождающееся высокочастотными колебаниями напряжения на реакторе и тока в выключателе. Для предотвращения повторного зажигания дуги при отключении шунтирующего реактора важно, чтобы к моменту разрыва электрической цепи время её замкнутого состояния через дугу было не меньше минимального времени $T_{arc,min}$ (рис. 3). За это время контакты выключателя разойдутся на расстояние, достаточное для восстановления электрической прочности межконтактного промежутка до значения, необходимого для предотвращения повторного пробоя. Таким образом, момент размыкания контактов должен выбираться ранее естественной точки перехода тока через нуль на время, не меньшее чем $T_{arc,min}$.

Минимальное время горения дуги $T_{arc,min}$ определяется по данным, полученным из испытаний для каждого типа выключателя с учётом условия (рис. 3)

$$U_{\max}(T_{arc,min}) = T_{arc,min} \text{RRDS},$$

где RRDS (Rate of Rise of Dielectric Strength) – скорость нарастания электрической прочности межконтактного промежутка выключателя.

Хотя повышение времени горения дуги приводит к увеличению уровня перенапряжений в результате среза тока (рис. 3), но перенапряжения при повторном зажигании дуги, как правило, более опасны. Поэтому устройства управляемой коммутации настраивают на отключение таким образом, чтобы избежать повторного зажигания, выбирая время замкнутого состояния электриче-

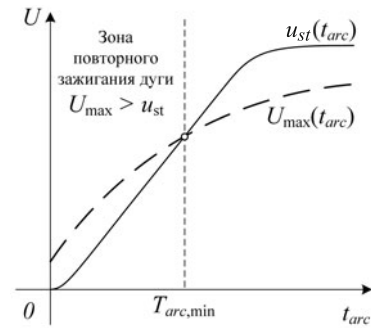


Рис. 3. Определение минимального времени горения дуги (все кривые условные):

$u_{st}(t_{arc})$ – электрическая прочность межконтактного промежутка; $U_{\max}(t_{arc})$ – уровень перенапряжений; t_{arc} – время горения дуги

ской цепи за счёт горения дуги больше минимального $T_{arc,min}$ по условию:

$$T_{arc} = k_s T_{arc,min}$$

где k_s – коэффициент запаса; T_{arc} – уставка по времени горения дуги.

Тем не менее решение об относительной опасности повторного зажигания дуги по сравнению с перенапряжениями при срезе тока должно быть принято с учётом конструкции выключателя [3].

Принцип управляемого отключения шунтирующего реактора. Момент поступления команды на отключение реактора t_{cmd} произволен, но устройство управляемой коммутации принимает его за начало отсчёта времени коммутации, полагая $t_{cmd} = 0$. В момент t_{cmd} оценивается фаза ψ опорного сигнала (универсальный метод для этого – адаптивный структурный анализ сигнала [5, 6]).

При управляемом отключении (рис. 4) прогнозируется суммарное время размыкания электрической цепи с учётом собственного времени отключения выключателя T_{open} и времени горения дуги T_{arc} . Отсчёт суммарного времени размыкания должен завершиться на максимуме U_{\max} напряжения $u_s(t)$, обеспечивая оптимальность коммутации, выраженную условием [7]

$$\psi_{set} = \pi / 2 \quad (4)$$

и удовлетворяемую в момент электрического размыкания цепи или, что то же самое, в момент погасания электрической дуги (в момент t_{elec}). Для этого устройству необходимо определить расчётное время задержки T_{delay} перед выдачей команды на электромагнит отключения выключателя t_{start} с таким расчётом, чтобы

$$t_{elec} = t_{start} + T_{open} + T_{arc}.$$

Интервал времени $(T_{open} + T_{arc})$ включает в себя несколько периодов опорного сигнала, поэтому

$$\psi + \omega(T_{open} + T_{arc}) = m\pi + \Delta\psi, \quad (5)$$

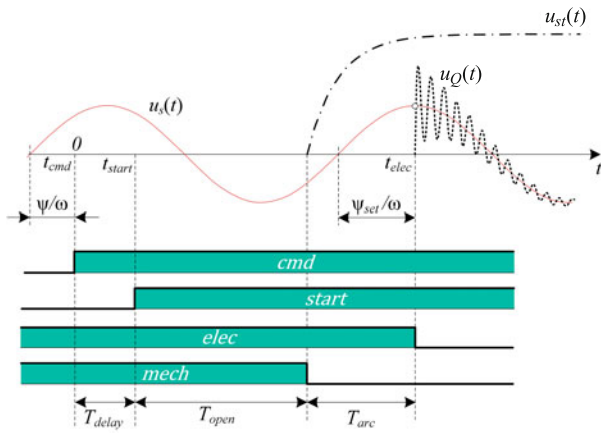


Рис. 4. Иллюстрация принципа управляемого отключения шунтирующего реактора:

t_{cmd} – момент получения команды отключения; t_{start} – момент выдачи команды отключения выключателя устройством управляемой коммутации; t_{elec} – момент размыкания электрической цепи; T_{open} – собственное время отключения выключателя; T_{delay} – задержка команды отключения; T_{arc} – время горения дуги; cmd – внешняя команда на отключение реактора; $start$ – команда отключения, формируемая устройством управляемой коммутации; $elec$ – условный сигнал, обозначающий замкнутое состояние электрической цепи; $mech$ – условный сигнал, обозначающий замкнутое положение контактов выключателя

где

$$m = \left\lfloor \frac{\psi + \omega(T_{open} + T_{arc})}{\pi} \right\rfloor.$$

В то же время для момента включения справедливо следующее равенство:

$$\psi + \omega(T_{open} + T_{arc} + T_{delay}) = \psi_{set} + n\pi, \quad (6)$$

где n – число полупериодов опорного сигнала.

Таким образом, время задержки T_{delay} вычисляется согласно выражению (6) с учётом уравнения (5) как

$$T_{delay} = \frac{\psi_{set} - \Delta\psi}{\omega} + \zeta \frac{T}{2}, \quad (7)$$

где $\psi_{set} = \pi/2$ – уставка (фаза отключения); $T = 2\pi/\omega$ – период опорного сигнала; а коэффициент

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

обеспечивает синхронизацию отключения в пределах полупериода опорного сигнала.

Устройство действует на электромагнит выключателя в момент времени t_{start} , отстоящий от момента прихода команды t_{cmd} на время T_{delay} по выражению (7). Отключение реактора произойдёт в момент t_{elec} , когда напряжение на реакторе достигнет максимума.

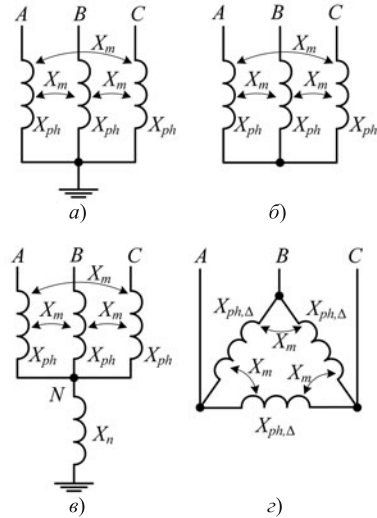


Рис. 5. Схемы соединения обмоток шунтирующего реактора:

a – звезда с заземлённой нейтралью; b – звезда с изолированной нейтралью; c – четырёхлучевая звезда; d – треугольник; X_m – сопротивление взаимной индукции; X_{ph} – сопротивление фазы реактора; X_n – индуктивное сопротивление нейтрального реактора

Виды трёхфазных шунтирующих реакторов и их особенности.

Выбор оптимальных моментов отключения трёхфазных реакторов зависит от схемы соединения обмоток и конструкции магнитопровода. Наиболее распространены четыре схемы соединения обмоток трёхфазного шунтирующего реактора с единым магнитопроводом: звезда с заземлённой нейтралью, звезда с изолированной от земли нейтралью, четырёхлучевая звезда и треугольник (рис. 5). Очевидно, что схемы рис. 5, a и b могут рассматриваться как частные случаи схемы рис. 5, c , если принять индуктивное сопротивление нейтрального реактора $X_n = 0$ и $X_n = \infty$ соответственно.

Схему соединения в треугольник можно преобразовать в звезду с изолированной нейтралью по известным формулам. При этом сопротивления звезды будут равны

$$X_{ph} = \frac{X_{ph,\Delta} - X_m}{3}.$$

Поэтому анализ процессов при коммутации шунтирующего реактора, обмотки фаз которого соединены в треугольник, также можно рассматривать в эквивалентной схеме реактора с соединением обмоток фаз в четырёхлучевую звезду.

Отношение индуктивного сопротивления нейтрального реактора к сопротивлению фазы обозначим как

$$k_n = \frac{X_n}{X_{ph}},$$

а отношение сопротивления взаимной индукции к сопротивлению фазы как

$$k_m = \frac{-X_m}{X_{ph}}$$

Сопротивление взаимной индукции X_m всегда имеет отрицательный знак, поскольку магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции прямо противоположны.

Для реакторов с четырёх- и пятистержневым магнитопроводом взаимное влияние фаз отсутствует, поэтому $k_m = 0$. В шунтирующих реакторах с трёхстержневым магнитопроводом включение одной фазы приводит к появлению напряжения на двух других из-за магнитной связи фаз. Коэффициент k_m такого реактора находится в диапазоне от $-0,09$ до $-0,11$ [8].

Таким образом, трёхфазные реакторы всех видов могут быть приведены к реактору с соединением обмоток в четырёхлучевую звезду. Следовательно, оптимальные условия отключения всех видов шунтирующих реакторов могут быть определены путём анализа процессов при отключении трёхфазного реактора со схемой четырёхлучевой звезды (рис. 5, в) [9].

Процессы при отключении реактора с соединением обмоток в четырёхлучевую звезду. Прием для определённости, что источник питания представлен трёхфазной симметричной системой с прямым чередованием фаз. Синхронизация отключения осуществляется по напряжению фазы \underline{U}_A и производится в последовательности $A \rightarrow C \rightarrow B$. Такая последовательность отключения обусловлена тем, что при этом полное время отключения всех трёх фаз будет наименьшим.

Оптимальный момент отключения соответствует нулевому значению аргумента тока выключателя $\underline{I}_{Q,\sigma}$, $\sigma = A, B, C$ отключаемой фазы

$$\arg(\underline{I}_{Q,\sigma}) = 0^\circ. \quad (8)$$

Ток в выключателе каждой фазы можно выразить через напряжение \underline{U}_A :

$$\underline{I}_{Q,\sigma} = \underline{U}_A \xi_\sigma, \quad (9)$$

где коэффициент пропорциональности ξ_σ вычисляется для соответствующей схемы отключения реактора. Искомая фаза отключения следует из условия оптимальности (8):

$$\psi_{opt,\sigma} = \arg(\underline{U}_A) = -\arg(\xi_\sigma). \quad (10)$$

Пока все фазы реактора в работе (перед отключением первой фазы, рис. 6, а) потенциал общей точки звезды $\underline{U}_N = 0$. Приводя схему рис. 6, а к схеме рис. 6, б по методу “развязывания” цепей со взаимной индуктивностью, получаем

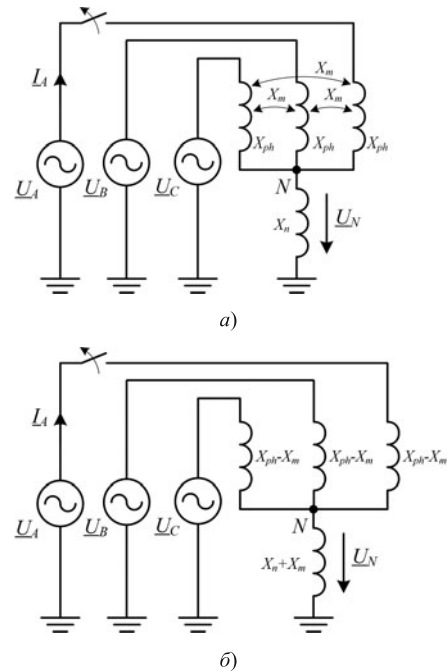


Рис. 6. Схемы перед отключением фазы A шунтирующего реактора:

а – исходная; б – эквивалентная с развязанными индуктивными связями

$$\xi_A = \frac{1}{j(X_{ph} - X_m)}$$

Следовательно, оптимальное отключение фазы A согласно выражению (10) будет обеспечиваться при фазе напряжения \underline{U}_A

$$\psi_{opt,A} = -\arg\left(\frac{e^{-j90^\circ}}{X_{ph} - X_m}\right) = 90^\circ.$$

Определим коэффициент пропорциональности ξ_C в схеме отключения фазы C (рис. 7, а). Схема отключения фазы C после развязывания индуктивных связей преобразуется в схему рис. 7, б. Учтём, что отключение первой фазы (фазы A) поднимет потенциал общей точки N до значения

$$\underline{U}_N = (\underline{I}_B + \underline{I}_C)(jX_n + jX_m) = -\underline{U}_A \frac{X_n + X_m}{X_{ph} + X_m + 2X_n}.$$

Тогда ток в выключателе фазы C реактора будет равен

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_N}{j(X_{ph} - X_m)}.$$

Следовательно, комплексный коэффициент пропорциональности схемы отключения фазы C будет равен

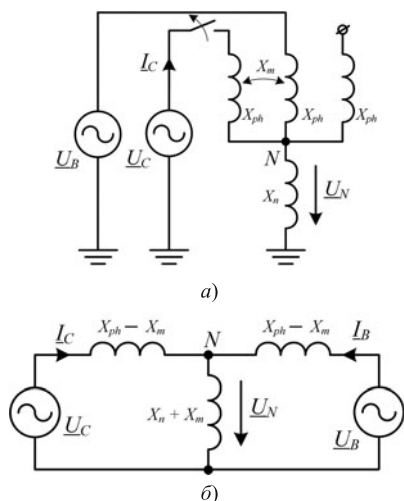


Рис. 7. Схема отключения фазы C шунтирующего реактора:

a – исходная; б – эквивалентная с развязанными индуктивными связями

$$\xi_C = \frac{e^{j\psi_C} + \frac{k_n + k_m}{2k_n + k_m + 1}}{j(X_{ph} - X_m)},$$

а оптимальная фаза отключения согласно выражению (10)

$$\psi_{opt,C} = 90^\circ - \arg\left(e^{j120^\circ} + \frac{k_n + k_m}{2k_n + k_m + 1} \right).$$

Поскольку оптимальный угол отключения второй фазы не может быть меньше угла отключения первой фазы $\psi_{opt,A} = 90^\circ$, то в качестве уставки принимается угол

$$\psi_{opt,C} = 270^\circ - \arg\left(e^{j120^\circ} + \frac{k_n + k_m}{2k_n + k_m + 1} \right).$$

В схеме отключения третьей фазы (рис. 8) фазный ток

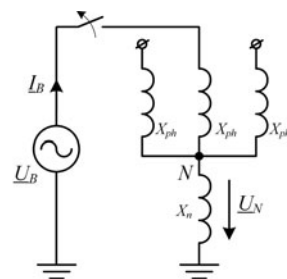


Рис. 8. Схема отключения фазы B шунтирующего реактора

$$I_B = \frac{U_A e^{-j120^\circ}}{j(X_{ph} + X_n)},$$

а коэффициент пропорциональности

$$\xi_B = \frac{e^{-j210^\circ}}{X_{ph} + X_n}.$$

Оптимальная фаза отключения

$$\psi_{opt,B} = 210^\circ.$$

Сводка оптимальных условий отключения трёхфазных шунтирующих реакторов. Оптимальные фазы отключения трёхфазных шунтирующих реакторов для различных схем соединения его обмоток приведены в таблице.

Отметим, что после отключения первой фазы реактора, обмотки которой соединены в звезду с изолированной нейтралью, оставшиеся обмотки реактора оказываются включёнными последовательно и создаются условия для их одновременного отключения. Поэтому отключение второй и третьей фаз реактора осуществляют одновременно при фазе опорного напряжения, равной 180° (на пике междофазного напряжения). Это положение широко используется в устройствах управляемой коммутации и других производителей [10].

Оптимальные фазы отключения шунтирующего реактора

Соединение обмоток	Число стержней магнитопровода	Фаза A	Фаза B	Фаза C
Звезда с заземлённой нейтралью	4 или 5	90°	210°	150°
	3	90°	210°	$270^\circ - \arg\left(e^{j120^\circ} + \frac{k_m}{k_m + 1} \right)$
Звезда с изолированной нейтралью	3 – 5	90°	180° (фазы B и C отключаются синхронно)	
Треугольник				
Четырёхлучевая звезда	4 или 5	90°	210°	$270^\circ - \arg\left(e^{j120^\circ} + \frac{k_n}{2k_n + 1} \right)$
	3	90°	210°	$270^\circ - \arg\left(e^{j120^\circ} + \frac{k_n + k_m}{2k_n + k_m + 1} \right)$

Выводы

1. Современные технологии управляемой коммутации обеспечивают существенное ограничение перенапряжений при отключении шунтирующего трёхфазного реактора. Оптимальные моменты отключения шунтирующего реактора в большинстве случаев должны выбираться исходя из условий предотвращения повторных зажиганий дуги на контактах выключателя, как источников наиболее опасных перенапряжений в сети.

2. Универсальность метода анализа условий отключения трёхфазных шунтирующих реакторов обеспечивается при использовании схемы замещения трёхфазных реакторов в виде четырёхлучевой звезды.

3. Операции отключения обмоток трёхфазного шунтирующего реактора синхронизируются относительно напряжения фазы A и преимущественно осуществляются в последовательности $A \rightarrow C \rightarrow B$ с целью минимизации полного времени коммутации реактора.

Список литературы

1. Fröhlich, K. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers. 1st Part [Text] / K. Fröhlich [et al.] // ELECTRA. – 1999. – № 183. – P. 65 – 96.
2. Fröhlich, K. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers. 2nd Part [Text] / K. Fröhlich [et al.] // ELECTRA. – 1999. – № 185. – P. 36 – 61.
3. Hiroki Ito. Switching Equipment [Text] / Edit. Hiroki Ito. – Springer International Publishing AG, 2019. – 584 p.
4. Guide for the Application of Shunt Reactor Switching [Text]: IEEE Standard C37.015 – 2017.
5. Антонов, В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике [Текст] / В. И. Антонов. – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2018. – 334 с.
6. Антонов, В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера [Текст] / В. И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2 (35). – С. 18 – 27.
7. Александрова, М. И. Универсальные принципы управляемой коммутации силового электрооборудования [Текст] / М. И. Александрова, В. А. Наумов, В. И. Антонов, Н. Г. Иванов, А. В. Солдатов, В. Я. Васильева // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1 (34). – С. 49 – 54.
8. Power transformers. Part 6: Reactors [Text]: IEC 60076-6 International Standard, 2007.
9. Aleksandrova, M. I. A Development of Shunt Reactor Controlled Energizing Theory [Text]: 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA) / M. I. Aleksandrova, V. A. Naumov, V. I. Antonov, N. G. Ivanov. – Moscow: IEEE, 2019. – P. 1 – 14. – DOI: 10.1109/RPA47751.2019.8958105.
10. Switchsync PWC600. Technical manual [Electronic resource]. – (<http://search-ext.abb.com/library>).

Уважаемые читатели!

На сайте журнала www.elst.energy-journals.ru, в разделе «Подписки» вы можете приобрести статьи, уже хранящиеся в базе данных журнала (база будет пополняться), оплатив их через систему PayPal.

Кроме этого, здесь же вы можете заказать и приобрести любую статью, опубликованную в журнале «Электрические станции», начиная с 1930 г., но пока не попавшую в базу данных.

Для этого необходимо сообщить в редакцию el.st.podpiska@gmail.com все известные вам данные о статье (номер журнала, год, автора, название статьи, страницы) и дождаться ответа с подтверждением о возможности выполнения вашего заказа. После этого вы сможете оплатить статью через систему PayPal или запросить счёт. Как только редакция получит уведомление об оплате, вам будут направлены либо pdf-файлы статей, опубликованных в 2001 – 2013 гг., либо сканкопии статей, опубликованных в 1930 – 2000 гг.