

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»  
«Академия электротехнических наук Чувашской Республики»  
Ассоциация «Инновационный территориальный  
электротехнический кластер Чувашской Республики»

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Материалы  
IV Международной научно-технической  
конференции**

Чебоксары  
2020

УДК 621.3(06)  
ББК 31я43  
П781

*Редакционная коллегия:*

**В.Г. Ковалев**, канд. техн. наук, профессор (гл. редактор);  
**Г.С. Нудельман**, канд. техн. наук, профессор;  
**В.А. Щедрин**, канд. техн. наук, профессор (зам. гл. редактора);  
**В.В. Афанасьев**, д-р техн. наук, профессор;  
**Ю.М. Миронов**, д-р техн. наук, профессор;  
**Г.П. Свинцов**, д-р техн. наук, профессор;  
**А.А. Ильин**, канд. техн. наук, доцент;  
**О.А. Онисова**, канд. техн. наук, доцент

*Печатается по решению Научно-технического совета  
Чувашского государственного университета*

**Проблемы** и перспективы развития энергетики, электротехники и  
**П781** энергоэффективности: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. –  
Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – 284 с.

ISBN 978-5-7677-3189-3

Представлены статьи и доклады четвертой Международной научно-технической конференции, проведенной совместно с «Академией электротехнических наук Чувашской Республики», в которых приводятся и обсуждаются результаты актуальных научных исследований в области энергетики, электротехники и энергоэффективности, а также рассматриваются вопросы подготовки инженерных кадров.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем.

ISBN 978-5-7677-3189-3

УДК 621.3(06)  
ББК 31я43

© Издательство  
Чувашского университета, 2020

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОММУТАЦИИ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**Александрова М.И.**, ООО НПП «ЭКРА», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация:** В докладе приводится обзор современных технологий снижения интенсивности переходных процессов при коммутации оборудования, основанных на управляемой коммутации. Описываются основные принципы управляемой коммутации и формулируются условия, необходимые для достижения высокой точности времени коммутации. Рассматриваются методы оценки успешности коммутации, приводится обобщённая структура устройств управляемой коммутации.*

***Ключевые слова:** управляемая коммутация, успешность управляемой коммутации, адаптивный структурный анализ тока.*

### **Введение**

Коммутация силового электрооборудования в электроэнергетической сети сопровождается переходными процессами, которые часто становятся причиной значительных перенапряжений и бросков тока и приводят к нежелательным последствиям [1, 2]. Так, например, большие токи включения батарей конденсаторов приводят к эрозии контактов выключателя, а перенапряжения – к повреждению изоляции оборудования сети. Кроме того, при отключении в неблагоприятный момент на батареях конденсаторов сохраняется остаточный заряд, что может привести к быстрому повышению напряжения на контактах выключателя до значений, превышающих номинальное напряжение. Это, в свою очередь, вызывает повторные пробой контактного промежутка выключателя и приводит к износу контактов и перенапряжениям в сети.

Включение шунтирующих реакторов может сопровождаться появлением значительной апериодической составляющей в токе, которая может привести к негативному электродинамическому воздействию на оборудование сети и к насыщению силовых и измерительных трансформаторов. Это является причиной ухудшения качества электроэнергии и повышения 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.

Включение силового трансформатора, особенно ненагруженного, в большинстве случаев сопровождается значительными бросками тока намагничивания, которые оказывают неблагоприятное динамическое воздействие на его обмотки, сокращая срок его службы и снижая устойчивость функционирования релейной защиты.

Снижения интенсивности переходных процессов при коммутации и, таким образом, предотвращения их негативного влияния на электрооборудование можно добиться путем надлежащего выбора оптимальной фазы коммутации. Такой способ коммутации получил название управляемой [1, 3].

Целью настоящего доклада является обзор технологии управляемой коммутации. В докладе рассматриваются её основные принципы, структура устройств управляемой коммутации и факторы, влияющие на точность коммутации.

### ***Принцип управляемой коммутации***

Принцип действия устройства управляемой коммутации основан на выборе времени выдачи команды управления выключателем с таким расчетом, чтобы коммутация оборудования произошла в заданный – оптимальный с точки зрения смягчения переходных процессов – момент времени. Схема, иллюстрирующая информационные потоки в устройствах управляемой коммутации, приведена на рис. 1.

Кроме опорного сигнала и сигналов от датчиков к устройству подводят сигналы обратной связи (рис. 1), 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 также для коррекции расчетного времени действия выключателя и, кроме того, для оценки успешности проведенной коммутации.

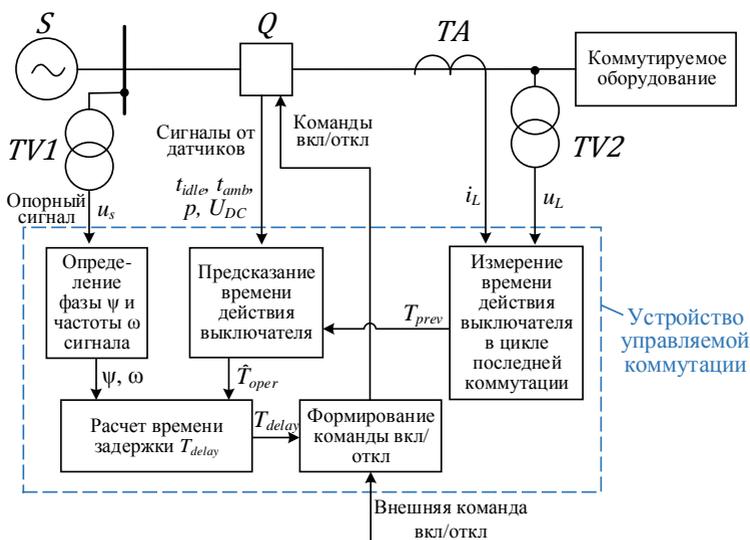


Рис. 1. Информационные потоки в устройствах управляемой коммутации

Измерения тока и напряжения со стороны нагрузки используются для контроля момента осуществленной 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.

### **Выбор момента коммутации**

Момент коммутации синхронизируется с фазой опорного сигнала, в качестве которого могут использоваться сигналы тока или напряжения. По значениям фазы  $\psi$  и частоты  $\omega$  опорного сигнала в текущий момент времени и оценке времени действия выключателя  $\hat{T}_{oper}$  устройство управляемой коммутации рассчитывает время задержки команды управления по формуле [1, 4]

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

где  $\psi_{set}$  – уставка (фаза включения или отключения);

$$\Delta\psi = \left( \psi + \omega T_{make} - \pi \frac{\psi + \omega T_{make}}{\pi} \right),$$

$$T_{make} = \begin{cases} \hat{T}_{oper} - T_{arc}, & \text{для операции включения,} \\ \hat{T}_{oper} + T_{arc}, & \text{для операции отключения;} \end{cases}$$

$T_{arc}$  – время горения дуги на контактах выключателя;

$T = 2\pi / \omega$  – период опорного сигнала;

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

### **Факторы, влияющие на точность управляемой коммутации**

На время действия выключателя, главным образом, влияют следующие факторы [1]: 1) температура окружающей среды; 2) давление рабочей жидкости или газа в приводе; 3) напряжение питания цепей электромагнитов управления выключателем; 4) время безоперационного простоя выключателя; 5) износ контактов выключателя в процессе эксплуатации. Для достижения высокой точности управляемой коммутации устройство должно учитывать их влияние путем мониторинга параметров процесса коммутации и параметров состояния выключателя с помощью специальных датчиков. С учетом этого время действия выключателя прогнозируется по формуле

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

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

### ***Оценивание реального момента коммутации***

В современных устройствах управляемой коммутации для обеспечения высокой точности оценивания момента осуществленной коммутации используются цепи сигналов обратной связи с высокой частотой опроса (порядка 10 кГц) [5]. Это обстоятельство сопряжено с усложнением реализации функции управляемой коммутации в устройствах автоматики, имеющих, как правило, невысокую частоту дискретизации. Более простым является новый способ определения реального момента коммутации на основе адаптивного структурного анализа тока переходного режима [6 – 8]. Структурный анализ тока коммутируемого оборудования позволяет реализовать прецизионную оценку фактического момента включения без необходимости увеличения частоты дискретизации.

### ***Заключение***

1. Интенсивность переходных процессов при коммутациях может быть значительно снижена с помощью устройств управляемой коммутации, которые имеют возможность настроить алгоритм для конкретного объекта: трансформатора, линии электропередачи, конденсаторной батареи и шунтирующего реактора.

2. Для обеспечения высокой точности и стабильности работы устройств управляемой коммутации в их алгоритмах должны учитываться параметры процесса коммутации и параметры состояния выключателя.

3. Успешность функционирования устройств управляемой коммутации должна контролироваться путем анализа сигналов тока и напряжения со стороны коммутируемых объектов. Высокую точность и простоту оценки успешности может обеспечить структурный анализ тока оборудования.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Александрова М.И.* Универсальные принципы управляемой коммутации силового электрооборудования / М.И. Александрова [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1 (34) – С. 49-54.

2. 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.

3. *Иванов Н.Г.* Теоретические основы интеллектуального АПВ протяженных ЛЭП с шунтирующими реакторами / Н.Г. Иванов [и др.] // *Электротехника*. – 2019. – № 8 – С. 15–21.

4. *Александрова М.И.* Оптимальные условия управляемого отключения трёхфазного шунтирующего реактора / М.И. Александрова, В.А. Наумов, В.И. Антонов, Н.Г. Иванов // *Электрические станции*. – 2020. – № 4. – С. 41 – 47.

5. Aleksandrova, M.I. A Development of Shunt Reactor Controlled Energizing Theory: 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.

6. Александрова, М.И. Структурный анализ тока для оценки успешности управляемой коммутации / М.И. Александрова, В.А. Наумов, В.И. Антонов // *Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов, прошедшей в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2019»*. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. 2019. С. 50 – 55.

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. *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов [и др.] // *Релейная защита и автоматизация*. – 2019. – № 2 (35) – С. 18–27.

***Автор***

***Александрова Марина Ивановна***, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», аспирант Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова по профилю 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы». E-mail: *aleksandrova\_mi@ekra.ru*.