

Актуальные вопросы развития устройств синхронной коммутации

Краячич А.В. к.т.н., Сушок Ю.В., Страдомский А.Ю.

ООО «АСУ-ВЭИ»

ВВЕДЕНИЕ

В современных энергетических системах уделяется недостаточно внимания проблемам, возникающим при коммутации высоковольтных выключателей (ВВ) [1]. В общем случае при коммутации ВВ в электрической сети могут возникать переходные токи и напряжения большой амплитуды, которые приводят к дополнительным электрическим и механическим нагрузкам на коммутируемое высоковольтное оборудование и способны вызвать его повреждение. Так же при возникновении переходных токов и напряжений большой амплитуды контакты выключателя подвергаются повышенному износу и в контроллерах управления и защиты, системах связи и телемеханики могут наводиться мощные помехи.

Традиционно для ограничения переходных процессов и перенапряжений при коммутации используют такие методы, как установка предвключаемых резисторов, демпфирующих реакторов или разрядников, а также усиление изоляции. Однако традиционные решения в большинстве случаев оказываются неэффективными или дорогими и полностью проблему не решают, так как коммутация ВВ может произойти и в наихудший с точки зрения возникновения переходных процессов момент, когда ток или напряжение близки к максимальному значению.

Значительного облегчения процесса коммутации можно достигнуть синхронизацией момента размыкания или замыкания контактов выключателя с моментом прохождения тока или напряжения через ноль. Такую коммутацию ВВ называют синхронной или управляемой.

Это подтверждают и результаты анализа применения методов ограничения перенапряжений при коммутации для существующих энергосистем. К примеру, подобный анализ [2] был проведен для Северо-Восточной бразильской электроэнергетической системы при коммутациях высоковольтных линий с шунтирующей компенсацией. Применение управляемой коммутации привело к снижению максимальных значений перенапряжений в 1,5-2 раза по сравнению с традиционными разрядниками, а также к снижению в 1,2-1,3 раза по сравнению с применением предвключаемых резисторов.

ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ

Рассмотрим наиболее неблагоприятные ситуации, возникающие при коммутации первичного высоковольтного оборудования в произвольные моменты времени относительно сигналов протекающего тока или приложенного напряжения.

Включение *силовых трансформаторов* в случайные моменты времени может вызывать мощные и медленно затухающие броски тока (до 5-10 раз превышающие номинальное значение; полное затухание происходит за несколько секунд). Негативный эффект в данной ситуации связан с повышенным механическим воздействием на обмотки трансформатора, искажением тока при появлении высших гармоник, а также наведением помех в измерительных цепях и цепях управления из-за токов нулевой последовательности [1]. Для того чтобы приведенные негативные явления не возникали, наиболее оптимальным будет включение полюсов выключателя вблизи *максимального значения опорного напряжения* соответствующих фаз сети с требуемой очередностью их включения.

Включение в сеть *шунтирующего реактора* аналогично подключению ненагруженного трансформатора и также может вызывать броски тока с соответствующими электромеханическими нагрузками [1]. Включение полюсов должно происходить вблизи *максимального значения опорного напряжения* соответствующих фаз сети с требуемой очередностью их включения.

Отключение *шунтирующих реакторов* может приводить к повторному зажиганию дуги в полюсах выключателя. Возникающий при этом крутой фронт переходного напряжения может вызвать частичное повреждение изоляции реактора из-за неравномерного распределения по обмоткам или повредить твердую изоляцию реактора или соседнего оборудования, что, в свою очередь, может привести к полному пробое. При отключении реактора размыкание полюсов должно происходить *за достаточный промежуток времени (1-2 мс) перед прохождением нулевого значения тока* соответствующих фаз с заданной очередностью их отключения.

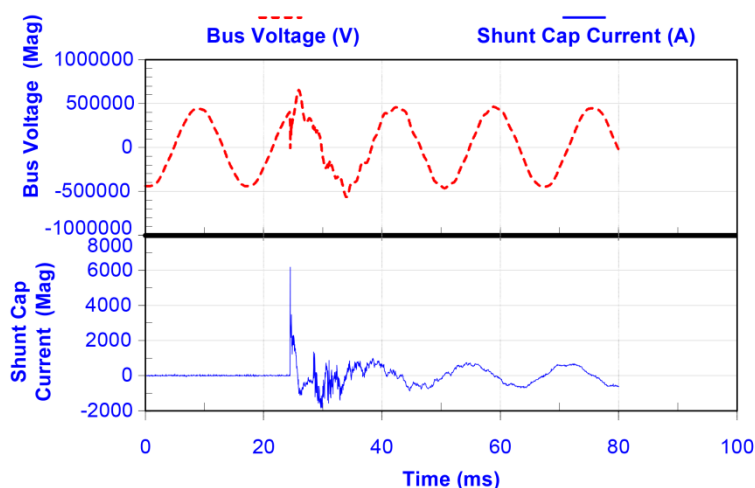
При подаче питания на разряженную *конденсаторную батарею* будут возникать значительные переходные токи (до 4 раз превышающие номинальное значение) [3]. Возникающие в высоковольтной сети перенапряжения могут вызвать пробой изоляции, что может привести к выходу из строя низковольтной аппаратуры. При подключении параллельных конденсаторных батарей пусковые токи могут стать опасными для механической прочности как подключаемых конденсаторов, так и коммутируемых выключателей. Включение полюсов выключателя должно происходить *вблизи нулевого значения опорного напряжения* соответствующих фаз сети.

При коммутации *высоковольтных линий* могут возникать значительные перенапряжения (до 2-3 раз превышающие номинальное напряжение). Наибольшую сложность имеет коммутация линий сверхвысокого напряжения большой протяжен-

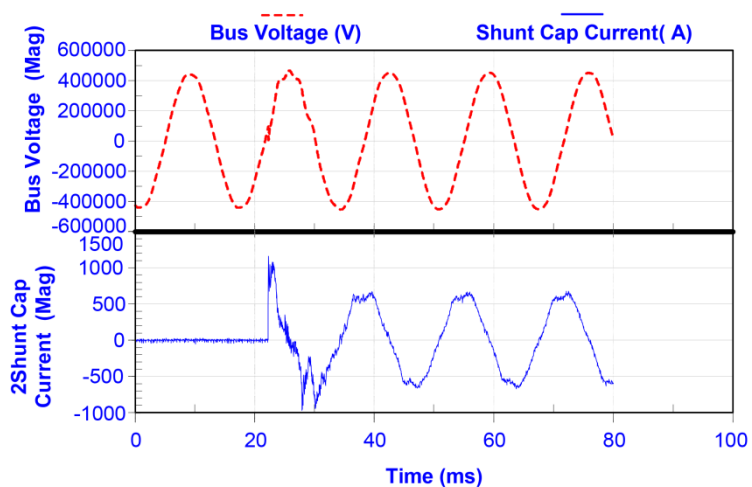
ности [1]. Для снижения перенапряжений при подключении ненагруженной линии включение полюсов выключателя должно происходить *в моменты времени, при которых напряжение на разомкнутых контактах каждого из полюсов выключателя минимально*.

Для реализации перечисленных выше алгоритмов подключения первичного электротехнического оборудования применяются устройства синхронной (управляемой) коммутации. Использование устройств синхронной коммутации позволяет:

- снизить уровень воздействия неблагоприятных переходных процессов, которые могут возникать в сети при коммутации выключателем нагрузок различного характера (пример для включения конденсаторной батареи на рис. 1);
- повысить надежность работы высоковольтного выключателя и сети в целом, за счет облегчения условий эксплуатации подключенного к сети оборудования;
- повысить уровень эксплуатационной безопасности в энергосистеме;
- сохранять данные о выполненных коммутациях для их последующего анализа.



a



б

Рис. 1. Включение конденсаторной батареи при неконтролируемой коммутации вблизи максимума напряжения (*a*) и при использовании устройства синхронной коммутации (*б*)

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ УСТРОЙСТВ

В настоящее время на российском рынке представлены следующие устройства [4–8], выполняющие функцию управляемой коммутации:



Switchsync E113, E213 («ABB»)



Switchsync F236, T183, L183 («ABB»)



PSD02 («Siemens»)



RPH2 («Schneider Electric»)



Switchsync PWC 600 («ABB»)



SynchroTeq («Vizimax»)

Проведенный сравнительный анализ функций и технических характеристик представленных устройств позволил выделить характерные особенности, приведенные в следующей таблице.

Параметр	Switchsync E113, E213 («ABB»)	Switchsync F236 («ABB»)	Switchsync T183 («ABB»)	Switchsync L183 («ABB»)	Switchsync PWC 600 («ABB»)	PSD02 («Siemens»)	RPH2 («Schneider Electric»)	SynchroTeq («Vizimax»)
Типы коммутируемых нагрузок								
Конденсаторные батареи	+	+	-	-	+	+	+	+
Шунтирующие реакторы	+	+	-	-	+	+	+	+
Трансформаторы	-	+	+	-	+	+	+	+
Линии электропередачи	-	-	-	+	+	+	+	+
Характерные особенности								
Использование для операций	Отключение; включение		Включение		Отключение; включение	Отключение; включение	Отключение; включение	Отключение; включение
Регистрация осциллограмм	Нет сведений				Да	Да	Нет сведений	Да
Точность выдачи управляющих команд, мс	Нет сведений				0,1 мс	Нет сведений	0,3 мс	Нет сведений
Защита от «зависания» выходных цепей	Нет				Нет	Нет	Нет	Нет
Защита от ложных срабатываний	Да				Да	Нет сведений	Да	Нет сведений
Прогнозирование времени срабатывания выключателя	Да				Да	Да	Да	Да
Расчет ресурса выключателя	Нет				Да	Нет	Нет	Нет
Контроль соленоидов выключателя	Нет				Нет	Нет	Нет	Нет
Синхронизация с системой астрономического времени	Нет				SNTP; IRIG-B; PPS	Нет	Нет	Нет
Интерфейсы связи с верхним уровнем	Нет				Ethernet	Нет	Нет	Ethernet
Протоколы связи с верхним уровнем	Нет				IEC 61850-8-1; IEC 61850-9-2LE; HTTP	Нет	Нет	DNP3; Modbus; IEC 60870-5-101; IEC 60870-5-104; IEC 61850
Визуальная индикация на лицевой панели	Дисплей, светодиоды				Дисплей; светодиоды	Светодиоды	Дисплей; светодиоды	Светодиоды
Диапазон рабочих температур, °C	-30...+55	-30...+55	-30...+55	-30...+55	-25...+55	-40...+70	-55...+55	-40...+55
Степень защиты	IP21	IP21	IP21	IP21	IP20	IP20	Нет сведений	Нет сведений
Габаритные размеры (ШxВxГ), мм	146x146x298	290x146x298	290x146x298	290x146x298	442x132x249,5	219x133x269	269x132x270	444x177x299
Масса, кг	6	7	7	7	10	4	Нет сведений	7,5
Не распространяются в России								

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ

Сравнительный анализ существующих в настоящее время устройств синхронной коммутации позволил определить современные тенденции их технического и функционального развития, а также сформировать ряд актуальных нерешенных вопросов. Также авторы настоящей статьи предлагают некоторые пути решения обозначенных вопросов.

1. Универсальность устройства

Использование устройства для всех возможных вариантов коммутируемых нагрузок вызывает необходимость приема и обработки сигналов различных типов, в том числе сигналов, применяемых для адаптивных алгоритмов прогнозирования времени коммутации выключателя. Разработка универсального устройства, содержащего в своем составе каналы приема различных сигналов в требуемом количестве, затруднительна и экономически нецелесообразна. Кроме того, применение универсального устройства для ВВ разных производителей осложняется различиями в характеристиках цепей управления высоковольтных выключателей.

Решением данной задачи может стать возможность модифицирования конструкции устройства под конкретные требования: компоновка устройства на базе ПЛК с набором модулей ввода-вывода, соответствующим требуемому набору сигналов, и конфигурируемым для различных задач программным обеспечением. Положительными эффектами такого решения станут уменьшение габаритов и стоимости устройства и возможность стандартизации конструктива для облегчения установки устройства в шкафах управления выключателями любых производителей.

2. Повышение надежности работы цепей управления выключателем

В целях повышения надежности необходимо исключение влияния сбоев в работе устройства («зависаний») на выполнение коммутации ВВ. Авторами предлагается применять специальные схемотехнические решения, связанные с самодиагностикой устройства. По данным самодиагностики устройство должно переходить в режим работы, позволяющий команде управления выключателем быть исполненной при неработоспособности устройства «в обход» его выходных каналов.

Дополнительно предлагается использовать контроль целостности соленоидов выключателя, который может выполняться выходными каналами устройства синхронной коммутации.

3. Интеграция устройства в систему верхнего уровня энергообъекта, поддержка стандарта IEC 61850

Для устройств автоматизации, устанавливаемых на подстанциях, приоритетной задачей является поддержка современных протоколов обмена данными и интеграция в системы верхнего уровня (например, АСУ ТП) энергообъекта по существующим интерфейсам. Интеграция устройства синхронной коммутации предполагает наличие интерфейсов Ethernet или ВОЛС с поддержкой протоколов ModBus TCP, IEC 60870-5-104.

Кроме того, развитие «умных сетей» требует поддержки устройствами автоматизации современных стандартов, в том числе стандарта IEC 61850. В части устройств синхронной коммутации требуется поддержка стандартов IEC 61850-8-1 и IEC 61850-9-2LE.

4. Синхронизация с системой астрономического времени

Авторами предлагается дополнить устройство системой точного астрономического времени. Это позволит привязать метки времени значений измеренных сигналов, рассчитанных значений, событий аварийной и предупредительной сигнализации в устройстве синхронной коммутации к единому времени подстанции. Синхронизация может быть выполнена посредством протокола SNTP или с использованием подключаемой антенны GPS/Глонасс.

5. Развитие адаптивных алгоритмов прогнозирования времени срабатывания выключателя

Анализ наработанных данных по коммутациям и информации по заводским испытаниям выключателей позволяет вводить дополнительные зависимости времени срабатывания выключателя от таких факторов, как напряжения питания цепей соленоидов выключателя, температура и давление элегаза, время безоперационного простоя выключателя и др.

В связи с вышесказанным становятся возможным разработка и введение в устройство дополнительных адаптивных алгоритмов, улучшающих результаты работы устройств синхронной коммутации.

6. Расширение диагностики выключателя

Одним из перспективных направлений развития функциональных возможностей устройства может стать расширение диагностики высоковольтного выключателя за счет совмещения функций синхронной коммутации и полноценного мониторинга высоковольтного выключателя.

Подробная диагностика данных, требующихся для выполнения алгоритма синхронной коммутации, может быть введена за счет расширения программного обеспечения. Дополнительно может быть применен контроль состояния выключателя, параметров его соленоидов, привода, изоляции, расчет выработанного и остаточного ресурса, а также диагностика подключаемых устройств и датчиков.

7. Анализ эффективности работы устройства

Для оценки эффективности применения устройства синхронной коммутации в его программное обеспечение могут быть введены алгоритмы сравнительного анализа процесса коммутации при работе устройства и при его отсутствии. Оценка может строиться на контроле остаточного ресурса выключателя, косвенной оценке ресурса первичного оборудования.

УСТРОЙСТВО АВМ-СК

С учетом обозначенных вопросов и возможных путей их решения, дополнительной информации, представленной в работе [9], а также в виду отсутствия российских аналогов подобного оборудования, актуальной задачей становится разработка современного отечественного устройства синхронной (управляемой) коммутации.

Авторами настоящей статьи поставлена задача, сформирован список основных требований к такому устройству и начата работа по его реализации.

Устройство синхронной (управляемой) коммутации АВМ-СК предназначено для обеспечения коммутаций высоковольтного выключателя в наиболее оптимальные с точки зрения первичного оборудования моменты времени посредством формирования временных задержек на команды включения и отключения ВВ, поступающие в режиме оперативного управления или в цикле АПВ (только для операции включения). Устройство предназначено для применения совместно с высоковольтными выключателями классов 110-750 кВ, выполненных с функционально независимыми полюсами.

Устройство АВМ-СК представляет собой ПЛК и имеет набор модулей ввода-вывода, необходимый для выполнения следующих функций.

- Прием и обработка сигналов от датчиков и систем, установленных на коммутационном оборудовании;
- Регистрация осциллограмм токов и напряжений при коммутации (с записью предшествующего режима) с дискретизацией 0,1 мс;

- Реализация режимов оперативного управления коммутационными аппаратами с управлением моментом коммутации (включение и отключение выключателя с пофазным приводом);
- Выдача управляющих команд в приводы коммутационных аппаратов с точностью до 0,1 мс;
- Аппаратное и программное исключение возможности «зависания» устройства, ложных включений и отключений выключателя;
- Прогнозирование фактических значений времени включения и отключения выключателя (адаптивный алгоритм);
- Расчет выработанного и остаточного ресурса выключателя;
- Контроль целостности цепей соленоидов выключателя;
- Формирование предупредительной и аварийной сигнализации при выходе контролируемых параметров за допустимые пределы и общей сигнализации по устройству;
- Архивирование информации по всем операциям (не менее 100 операций), в том числе, архивирование осциллограмм (длительность записи 300 мс);
- Синхронизация с системой единого астрономического времени от внешней антенны GPS/Глонасс или по протоколу SNTP;
- Интеграция в АСУ ТП объекта по интерфейсам ВОЛС, Ethernet или RS-485 по протоколам ModBus TCP, IEC 60870-5-104 или ModBus RTU, а также IEC 61850(MMS) (опционально);
- Визуальная индикация текущего состояния устройства, выключателя, предупредительной и аварийной сигнализации на лицевой панели устройства;
- Конфигурирование устройства с лицевой панели или с использованием сервисного ПО через подключаемый персональный компьютер;
- Самодиагностика внутренних узлов устройства, диагностика подключаемых устройств и датчиков.

В настоящий момент проводятся опытные испытания макетного образца устройства АВМ-СК. Начало серийного производства устройства намечено на середину 2017 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tom Roseburg, Dan Goldsworthy. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Applications Examples and Benefits, 2007.
2. On Applying Controlled Switching to Transmission Lines: Case Studies. / Karcus M. C. Dantas, Washington L. A. Neves, Damásio Fernandes Jr., Gustavo A. Cardoso, Luiz C. Fonseca. IPST Conference, Kyoto, Japan, 2009.
3. Управление коммутацией батареями статических конденсаторов в электроэнергетических системах / Pierre Taillefer, Г.С. Нудельман, С.В. Балашов, Д.М. Журавлев. – Релейщик, №1, 2014.
4. ABB. Switchsync. Устройство управляемой коммутации для высоковольтных выключателей (<http://new.abb.com/high-voltage/ru/monitoring-usloviy-i-upravlyayemaya-commutacii/ustroystvo-switchsync>).
5. Switchsync™ PWC600. User manual. 2015-12.
6. Руководство по эксплуатации RPH2. 3-я редакция. 2004-02.
7. Блок управления PSD02. Руководство по эксплуатации. 2006.
8. SynchroTeq Plus Datasheet. V1.5.1. 2013.
9. Разработка универсального устройства синхронной пофазной коммутации выключателя ВН. Магистерская диссертация / Ю.В. Сушок. – НИУ «МЭИ», 2011.