



Автор:

Александрова М.И.,
ЧГУ им. И.Н. Ульянова –
ООО НПП «ЭКРА»,
г. Чебоксары, Россия.

Alexandrova M.I.,
Chuvash State University –
EKRA RPE Ltd,
Cheboksary, Russia.

Abstract: the controlled switching of power electrical equipment is intended to reduce transients and prevent network disruption and equipment damage. The reduction of the transition processes intensity is achieved by an appropriate choice of the switching moment, taking into account the operating mode of the switched electrical equipment.

МЕТОДЫ УЧЕТА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

ACCOUNTING METHODS OF FACTORS AFFECTING THE ACCURACY OF POWER ELECTRICAL 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. В работе показывается, что для достижения необходимого качества управляемой коммутации необходимо 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. Предлагаются способы компенсации постоянной составляющей ошибки коммутации и оценки момента фактической коммутации на основе методов адаптивного структурного анализа сигналов.

Ключевые слова: управляемая коммутация электрооборудования, точность управляемой коммутации, факторы, влияющие на точность коммутации, адаптивный структурный анализ сигналов.

A prerequisite for the controlled switching efficiency is accurate forecasting of the circuit breaker operating time. It is shown that to achieve the required quality of the controlled switching is necessary to consider not only operating time but also the dynamic characteristics of the dielectric strength of the contact gap and the operating time variation influenced by the ambient temperature, the pressure of the working fluid or gas in the drive, the DC operating voltage, the

Введение

Технология управляемой коммутации подразумевает управление выключателем с целью включения или отключения силового электрооборудования в оптимальный момент времени, обеспечивая снижение уровня возникающих коммутационных перенапряжений или предотвращая ударные токи при включении и повторные зажигания дуги при отключении оборудования. Все это, в свою очередь, позволяет уменьшить негативное электродинамическое воздействие на оборудование сети, снизить износ коммутационного оборудования и повысить срок его службы [1].

Основные принципы управляемой коммутации силового электрооборудования и, в частности, выбор оптимальных условий коммутации шунтирующих реакторов были рассмотрены в работах [1–3]. Однако

вопросы обеспечения необходимой точности управляемой коммутации в условиях изменения окружающей среды, старения механизмов привода выключателя, а также других факторов, так или иначе влияющих на точность времени исполнения команды коммутации, остались нераскрытыми.

В настоящей статье рассматриваются факторы, влияющие на точность коммутации, и способы их учета. Оценивается степень влияния этих факторов на время действия выключателя.

Факторы, влияющие на точность коммутации

Высоковольтный выключатель имеет некоторый разброс времени действия, зависящий от типа выключателя и различных внешних факторов. Выделяют следующие основные факторы [4]:



idle time and wear of the contact system. Methods for compensation of the static component of the operation time error and estimation of the actual switching moment based on adaptive structural analysis of signals are proposed.

Keywords: controlled switching of power electrical equipment, controlled switching accuracy, factors affecting the accuracy of controlled switching, adaptive structural analysis of signals.



**Александрова
Марина Ивановна**

В 2018 г. получила степень магистра по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по специальности «Автоматика энергосистем» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Аспирант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы». Инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА».

- 1) температура окружающей среды;
- 2) давление рабочей жидкости или газа в приводе;
- 3) напряжение питания цепей электромагнитов управления выключателя;
- 4) время безоперационного простоя выключателя;
- 5) износ контактов выключателя в процессе эксплуатации.

Обычно влияние этих факторов может быть описано характерными кривыми, которые определяются экспериментально отдельно для операций включения и отключения. В тех случаях, когда время действия высоковольтных выключателей зависит от них существенно, и эта зависимость не может быть определена некоторой функцией, выключатель не может быть пригодным для целей управляемой коммутации.

Для обеспечения заданной точности коммутации требуется учет влияния упомянутых факторов. Поэтому в оценку времени действия выключателя нужно вносить корректирующие поправки:

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

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

Рассмотрим особенности влияния различных факторов на точность управляемой коммутации.

Учет условий работы выключателя

К условиям работы выключателя относят температуру окружающей среды, энер-

гию, запасенную в приводе выключателя, и напряжение питания электромагнитов включения и отключения выключателя.

Влияние температуры обнаруживается, в первую очередь, в изменении сопротивления обмоток катушек электромагнитов управления выключателем. Кроме того, с повышением температуры снижается вязкость смазочных материалов и существенно уменьшается их плотность. Это приводит к улучшению их смазочных свойств и уменьшению силы трения между движущимися частями механизма высоковольтного выключателя.

Зависимость отклонения времени включения выключателя от температуры приведена на рис. 1,а, а зависимость отклонения времени отключения выключателя от температуры – на рис. 1,б. Здесь и далее все приведенные зависимости условные и иллюстрируют лишь характер изменения отклонения времени действия выключателя. Эти графики выполнены на основе характеристик, приведенных в работе [5]. При разработке устройства управляемой коммутации все упомянутые характеристики выключателей должны быть экспериментально определены и внесены в память устройства.

Отметим, что в выключателях, не имеющих обогрева привода, измеряют температуру окружающего воздуха, а в выключателях с обогревом привода – температуру в приводе.

Очевидно, что влияние энергии, запасенной в приводе выключателя, главным образом определяется типом его привода. В настоящее время существует большое количество различных приводов выключателя [6]:

- 1) пружинные приводы, в которых энергия запасается во взведенных пружинах;

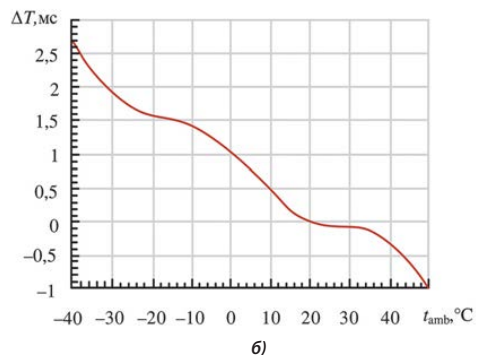
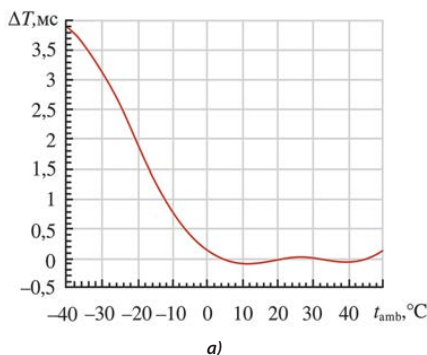


Рис. 1. Зависимость отклонения времени включения (а) и времени отключения (б) выключателя от температуры



2) грузовые приводы, в которых энергия запасается в виде потенциальной энергии поднятого груза;

3) пневматические приводы, в которых запасается энергия сжатого воздуха (газа);

4) гидравлические приводы, в которых энергия аккумулируется в жидкости (сосуд с жидкостью находится под большим давлением), и т.п.

Энергия, запасенная в пружинных и грузовых приводах, практически не изменяется. Поэтому устройству управляемой коммутации, установленному на этих выключателях, необходимо сообщить лишь о том, взведена ли пружина (поднят ли груз).

Время действия выключателей с гидравлическими и пневматическими приводами зависит от давления рабочей жидкости или газа в приводе. Примеры таких зависимостей отклонений времени включения и времени отключения выключателя от давления рабочей жидкости в приводе выключателя приведены на рис. 2.

Напряжение питания электромагнитов управления выключателем напрямую влияет на время его действия. Чем меньше напряжение оперативного питания, тем больше времени занимает операция включения или отключения. Пример характеристик, иллюстрирующих влияние напряжения оперативного питания на отклонение времени включения выключателя, приведен на рис. 3,а, а на отклонение времени отключения выключателя – на рис. 3,б.

Все характеристики времени действия выключателя, приведенные на рис. 1–3, получают из типовых испытаний выключателя при его изготовлении.

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 [7, 8]. Поэтому суммарная поправка, учитывающая условия окружающей среды, вычисляется как

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

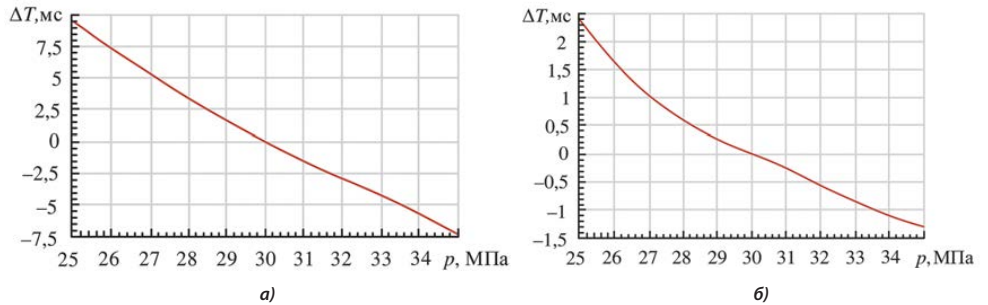


Рис. 2. Зависимость отклонения времени включения (а) и времени отключения (б) выключателя от давления рабочей жидкости

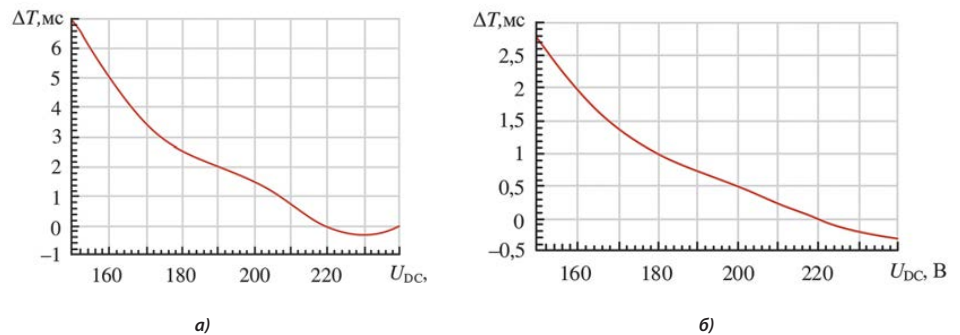


Рис. 3. Зависимость отклонения времени включения (а) и времени отключения (б) выключателя от напряжения оперативного питания электромагнитов управления выключателем

Однако 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 $\Delta T_{cond} = f(t_{amb}, p, U_{DC})$ [9]. Для выключателей, имеющих пружинный привод, эта зависимость замет-

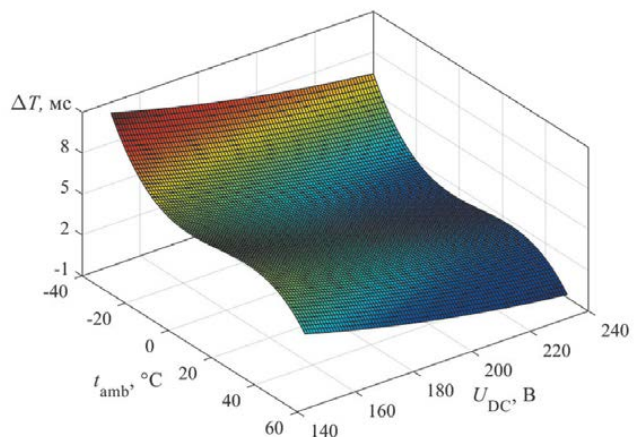


Рис. 4. Зависимость отклонения времени включения выключателя от температуры и напряжения оперативного питания электромагнитов управления выключателем

но упрощается, поскольку время действия выключателя выражается функцией двух переменных. Пример двумерного графика характеристики времени включения выключателя в зависимости от температуры и напряжения оперативного питания приведен на рис. 4.

Учет времени безоперационного простоя выключателя

Под временем безоперационного простоя выключателя понимают промежуток времени между коммутациями, в течение которого привод выключателя оставался в бездействии. Влияние, оказываемое временем безоперационного простоя на время действия выключателя, существенно зависит от типа его привода. Наиболее стабильное время

действия среди всех типов приводов высоковольтных выключателей имеют пружинные приводы. Отклонение времени действия выключателя с пружинным приводом от номинальной величины для различных значений времени безоперационного простоя составляет, как правило, ± 1 мс, в то время как для выключателей с гидравлическим приводом оно может достигать значения свыше 2 мс в зависимости от времени простоя выключателя (рис. 5). Это связано с тем, что во время безоперационного простоя выключателя с гидравлическим приводом в рабочей жидкости появляются воздушные пузырьки [10]. В результате увеличивается сжимаемость жидкости и появляется дополнительная задержка в действии привода выключателя. Эта задержка становится заметной уже через несколько часов безоперационного простоя выключателя [11].

На рис. 5 приведены области допустимых значений отклонений времени включения для различных времен безоперационного простоя высоковольтного выключателя с учетом случайного разброса. Красной линией показано среднее значение, которое должно задаваться в устройстве в виде поправочной характеристики.

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.

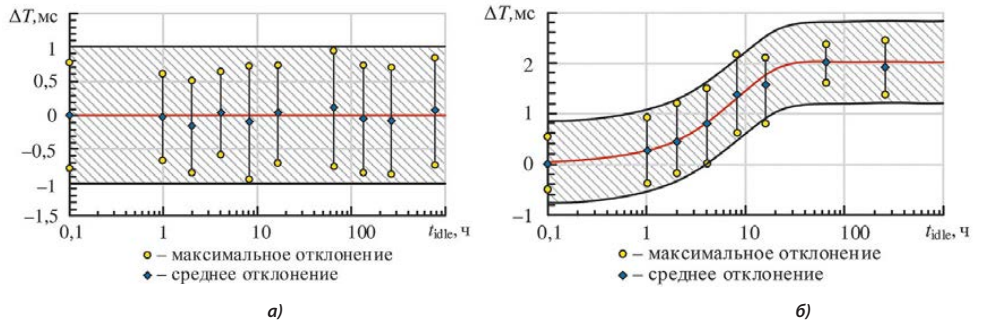


Рис. 5. Зависимость отклонения времени включения от времени безоперационного простоя выключателя: а – с пружинным приводом; б – с гидравлическим приводом

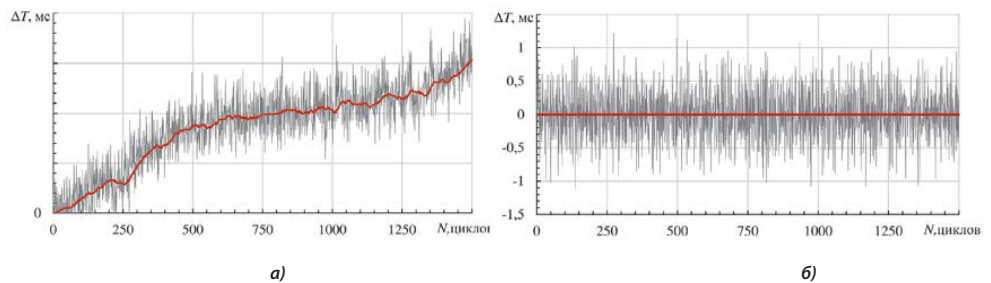


Рис. 6. Типичное отклонение времени включения выключателя от количества операций для управляемой коммутации: а – без адаптивного алгоритма компенсации ошибки; б – с адаптивным алгоритмом компенсации ошибки

Учет времени работы выключателя в цикле предыдущей коммутации

В процессе эксплуатации выключателя неизбежны старение и износ рабочей поверхности контактов и элементов привода, вследствие чего время действия выключателя изменяется. Эта ошибка носит постоянный характер и должна учитываться устройством с помощью поправки, рассчитанной на основе анализа отклонения фактического времени действия выключателя T_{oper}^{prev} от ожидаемого \hat{T}_{oper}^{prev} в цикле предыдущих коммутаций [12]

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

Значимость формирования упомянутой поправки хорошо видна из зависимостей отклонения времени включения выключателя с пружинным приводом от количества операций при использовании управляемой коммутации с адаптивным алгоритмом компенсации ошибки и без него (рис. 6). Разброс отклонения времени включения выключателя при адаптивной поправке не зависит от числа циклов включения и составляет $\pm 1,2$ мс, в то время как без поправки имеет явную тенденцию к накоплению ошибки.

Алгоритм компенсации ошибки должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обеспечивать максимальное удаление постоянной составляющей ошибки;



2) обеспечивать необходимое быстродействие при удалении постоянной составляющей ошибки;

3) алгоритм не должен увеличивать величину случайной составляющей ошибки.

Первому требованию полностью удовлетворяют алгоритмы, основанные на интегральном принципе компенсации ошибки (рис. 7):

$$\Delta T_{prev}(k) = k_{pr} e(k-1) + \Delta T_{prev}(k-1), \quad (1)$$

где $e(i) = e_{st}(i) + e_r(i)$ – ошибка времени действия выключателя на i -ом цикле коммутации, включающая в себя постоянную $e_{st}(i)$ и случайную составляющие $e_r(i)$; k_{pr} – коэффициент усиления ошибки.

Этот алгоритм компенсации имеет один настроечный параметр – коэффициент усиления k_{pr} . С увеличением значения коэффициента k_{pr} повышается быстродействие алгоритма, но одновременно растет влияние случайной составляющей ошибки $e_r(k)$, что приводит к увеличению общей ошибки (рис. 8).

Характеристики алгоритма (рис. 8) получены путем математического моделирования при следующих допущениях: случайная составляющая ошибки имеет нормальное распределение со средним значением, равным $\bar{E}=0$, и с дисперсией, равной $\sigma^2=1/9$. Допустимая погрешность компенсации статической ошибки принята равной 5%.

Коэффициент усиления k_{pr} выбирается исходя из допустимого значения максимальной случайной ошибки и необходимой длительности настройки системы.

Из схемы алгоритма (рис. 7) видно, что успешность его работы зависит от точности оценки девиации фактического времени действия выключателя $T_{op,real}$ относительно расчетного времени $\hat{T}_{op,calc}$. Для этого устройство должно оценивать фактический момент коммутации с высокой точностью. В современных устройствах момент включения определяется по появлению тока в цепи коммутируемого оборудования. Обычно для обеспечения высокой точности ток коммутируемого оборудования осциллографируется с высокой частотой дискретизации, намного превышающей частоту дискретизации выпускаемых устройств РЗА. Поэтому реализация функции управляемой коммутации в устройствах автоматики требует установки дополнительного оборудования.

Во избежание усложнения и удорожания устройства управляемой коммутации в работе [3] предлагается новый метод определения фактической фазы включения шунтирующего реактора. В основе алгоритма лежит использование зависимости оптимальной фазы включения от отношения начального значения свободной и амплитуды принужденной составляющих тока реактора. Точность этого метода зависит от точности оценки упомянутых составляющих тока. Для обеспечения высокой точности их оценивания применяют метод

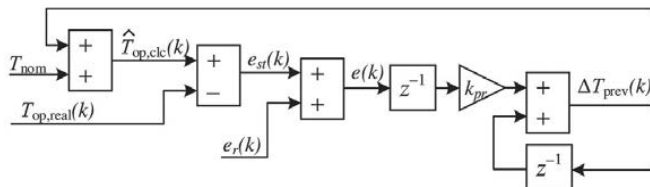


Рис. 7. Блок-схема интегрального принципа компенсации статической ошибки

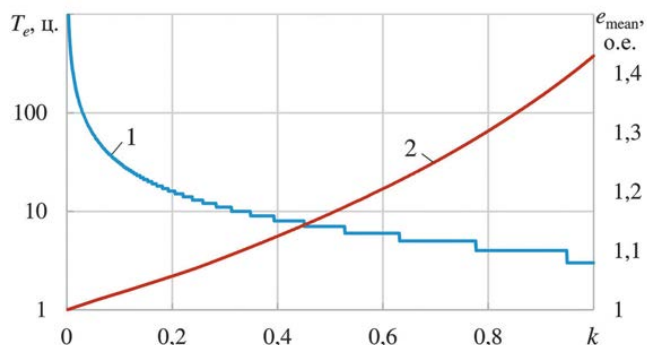


Рис. 8. Зависимость времени T_e устранения статической ошибки алгоритмом компенсации (1) и относительного среднего значения ошибки e_{mean} (2) от значения коэффициента интегрирования k_{pr}

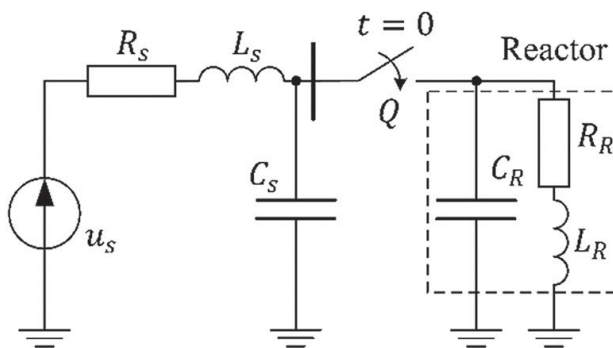


Рис. 9. Схема сети при включении реактора. Параметры схемы: $R_R = (0,0017 \div 0,0036) X_R \text{ Ом}$; $L_S = 1,4 \div 10,35 \text{ Гн}$; $C_S = 1,3 \div 4,1 \text{ нФ}$; $R_S = 1,45 \div 10,4 \text{ Ом}$; $L_R = 0,05 \text{ Гн}$; $C_R = 10CR$

чателей достигает 2 мс (36°), поэтому фактическая фаза коммутации находится в диапазоне углов включения $90^\circ \pm 36^\circ$. Необходимую точность оценки фактической фазы коммутации нужно регламентировать именно для этого диапазона изменения фазы.

Зависимость ошибки оценки фазы коммутации от угла включения и различных параметров приведена на рис. 10.

Анализ зависимости на рис. 10 показывает, что погрешность оценки фактического момента коммутации достигает наибольшего значения при максимальном

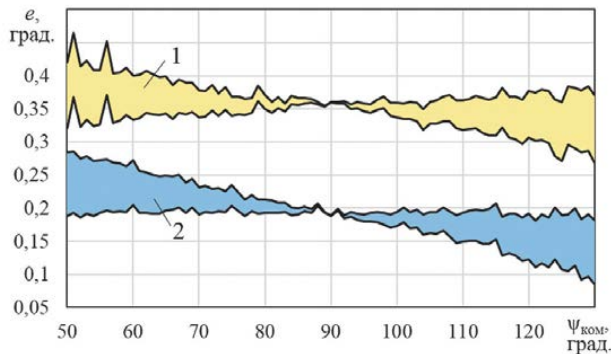


Рис. 10. Области погрешности оценки фазы коммутации в зависимости от угла включения шунтирующего реактора при локализации момента коммутации в пределах интервала дискретизации $T_s = 1/1000$ с:
1 – при максимальных емкостях и активном сопротивлении;
2 – при отсутствии емкостей и минимальном активном сопротивлении

отличии параметров сети от алгоритмической модели, т.е. при малых индуктивностях и больших значениях активного сопротивления и емкости шунтирующего реактора. Максимальная погрешность предложенного способа оценки фактического момента коммутации в рабочем диапазоне углов включения от 54° до 126° довольно мала и не превышает $0,5^\circ$.

Выводы

1. Успешность управляемой коммутации обеспечивается учетом множества факторов, таких как условия работы выключателя (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. Учет влияния различных факторов осуществляется введением в алгоритм устройства управляемой коммутации различных поправок в форме таблиц или в виде коэффициентов аппроксимирующего полинома. Поправки, учитывающие условия работы выключателя, целесообразно задавать в виде одной многомерной характеристики.

2. Высокая стабильность работы устройств управляемой коммутации в течение всего срока эксплуатации обеспечивается адаптивными алгоритмами компенсации ошибки, формируемыми на основе измерения времени его действия в цикле предыдущей коммутации. Наиболее приемлемым является алгоритм, основанный на интегральном принципе компенсации ошибки.

3. Прецизионную оценку фактического момента включения шунтирующего реактора позволяет реализовать структурный анализ тока коммутируемого оборудования. Предложенный метод обеспечивает высокую точность без необходимости увеличения частоты

дискретизации, что открывает возможность реализации функции управляемой коммутации в интеллектуальных электронных устройствах, выполняющих функции РЗА.

Литература:

1. Александрова М.И. Универсальные принципы управляемой коммутации силового электрооборудования / 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.
2. Александрова М.И. Оптимальные условия управляемого отключения трехфазного шунтирующего реактора / М.И. Александрова, В.А. Наумов, В.И. Антонов, Н.Г. Иванов // Электрические станции. – 2020. – № 4 – С. 41-47.
3. Aleksandrova M. I. A Development of Shunt Reactor Controlled Energizing Theory / M. I. Aleksandrova, V. A. Naumov, V. I. Antonov, N. G. Ivanov // 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA) – Moscow: IEEE, 2019. – P. 1-14. – DOI: 10.1109 / RPA47751.2019.8958105.
4. 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.
5. CIGRE Study Committee A3: Transmission and distribution equipment. Guidelines and best practices for the commissioning and operation of controlled switching projects. CIGRE Technical Brochure No. 757, February 2019, 369 p.
6. Баптиданов Л.Н., Тарасов В.И. Электрооборудование электрических станций и подстанций. В 2-х т. Т. 1 / Л.Н. Баптиданов, В.И. Тарасов. – М-Л: Госэнергоиздат. – 1960. – 408 с.
7. Switchsync PWC600. Technical manual [Электронный ресурс]. 2017. – Режим доступа: <http://search-ext.abb.com/library>.
8. MAS5-0141-C SynchroTeq Reference Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vizimax.com/support/download>.
9. 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.
10. Sadayuki Kinoshita, Hiroki Ito. Factory and Field Tests of Controlled Switching in Accordance with IEC62271-302 Standard. Mitsubishi Electric Advance, Vol. 117, March, 2007.
11. CIGRE Study Committee A3: High Voltage Equipment. Switching Equipment. CIGRE Green Books, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019, 584 p.
12. 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.
13. 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.
14. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов, В.А. Наумов, М.Н. Кудряшова, М.И. Александрова, Д.А. Степанова // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2 (35). – С. 18-27.