

Н.Г. Иванов, Е.С. Воробьев, Антонов В.И.,  
Наумов В.А., Солдатов А.В.  
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

## УЧЁТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ (КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ)\*

Управляемая коммутация является одной из современных технологий смягчения опасных коммутационных перенапряжений и базируется на прецизионном управлении моментом коммутации силового оборудования [1–3]. Снижение уровня перенапряжений при включении оборудования достигается благодаря коммутации его вблизи точки перехода кривой напряжения через нуль, расположенной на интервале времени с минимальным мгновенным значением напряжения на контактах выключателя [3–5]. Однако реальный момент замыкания электрической цепи, как правило, не совпадает с моментом замыкания контактов выключателя из-за электрического пробоя межконтактного промежутка, да и сам момент замыкания контактов может отклоняться от расчётного из-за разброса времени действия механизма привода выключателя. Поэтому выбор расчётного момента замыкания контактов выключателя должен рассматриваться как задача минимизации напряжения на контактах выключателя в момент включения с учётом особенностей электромеханических характеристик выключателя. Решению этой задачи посвящен настоящий доклад.

Изменение электрической прочности межконтактного промежутка выключателя при включении характеризуется скоростью снижения диэлектрической прочности – RDDS (Rate of Decay of Dielectric Strength). Сближение контактов выключателя приводит к снижению электрической прочности межконтактного промежутка. Очевидно, что если напряжение на контактах выключателя превышает величину электрической прочности межконтактного промежут-

---

\* Работа выполнена при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договор № 15030ГУ/2020).

ка, то происходит его пробой, и ток в цепи начинает течь через дугу ещё до момента замыкания контактов. Эту особенность процесса включения необходимо учитывать при выборе момента коммутации силового оборудования.

Рассмотрим принцип выбора момента коммутации цепи с учётом RDDS. Для придания принципу свойства универсальности примем амплитуду напряжения на контактах выключателя  $u_Q$  в качестве базисного значения напряжения. Поэтому далее все напряжения и RDDS приводятся в относительных единицах в базисе амплитуды напряжения  $u_Q$ . С этой же целью момент включения отсчитывается в электрических градусах и определяется как фаза включения  $\psi_c$ .

Учитывая, что цепь включения замыкается в момент зажигания дуги, момент коммутации электрической цепи должен рассматриваться как момент превышения абсолютным значением напряжения на контактах выключателя  $u_Q$  электрической прочности межконтактного промежутка

$$u_{DS}(\psi) = |-\psi RDDS + u_{DS}(0)|, \quad (1)$$

где  $\psi = \omega t$  – текущая фаза напряжения на контактах (рис. 1). Здесь принято, что при сближении контактов выключателя изменение электрической прочности межконтактного промежутка подчиняется линейному закону. Напряжение имеет синусоидальный характер

$$u_Q(\psi) = \sin \psi. \quad (2)$$

Тогда для момента коммутации выполняется равенство

$$u_{DS}(\psi_c) = |u_Q(\psi_c)|. \quad (3)$$

При  $RDDS \geq 1$  электрическая плотность  $u_{DS}$  превосходит  $|u_Q|$  на всем его полупериоде (рис. 1, а). Поэтому обеспечение коммутации линии или конденсаторной батареи при фазе  $\psi_c = 0$ , когда напряжение  $u_Q(0) = 0$ , и создаются оптимальные условия для коммутации с точки зрения минимизации перенапряжений на ЛЭП или тока включения конденсаторной батареи, не представляет сложности.

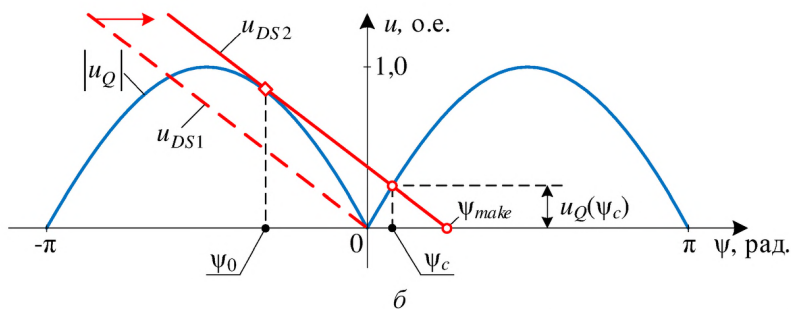
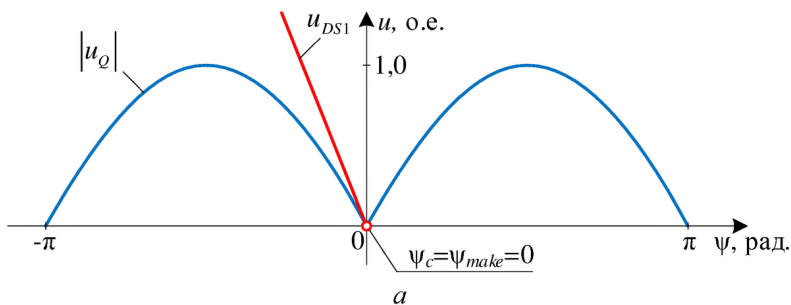


Рис. 1. Иллюстрация выбора оптимального момента замыкания контактов  $\psi_{make}$  выключателя при  $RDDS \geq 1$  (а) и  $RDDS < 1$  (б) с точки зрения снижения уровня перенапряжений; в случае (а) крутизна линии электрической прочности  $u_{DS1} = u_{DS}(\psi)$  позволяет совместить момент коммутации  $\psi_c$  с моментом замыкания контактов  $\psi_{make}$ ; при невысокой крутизне  $u_{DS1} = u_{DS}(\psi)$  (б) коммутация осуществляется путем смещения линии  $u_{DS}(\psi)$  вправо, и момент коммутации  $\psi_c$  наступает в момент зажигания дуги, т.е. раньше, чем замкнутся контакты в момент  $\psi_{make}$

Для выключателей с  $RDDS < 1$  включение цепи при  $\psi = 0$  в принципе невозможно, поскольку попытка выполнить это условие приведет к появлению на полупериоде  $|u_Q|$  интервала, в течение которого напряжение на контактах  $u_Q$  превысит её электрическую прочность  $u_{DS}$  (линия  $u_{DS1}$  на рис. 1, б).

Стратегия управления коммутацией в этом случае будет заключаться в смещении момента включения выключателя на оси

времени вправо (на рис. 1, б показано стрелкой) таким образом, чтобы на текущем полупериоде линия изменения электрической прочности  $u_{DS}(\psi)$  оказалась выше полуволны напряжения  $|u_Q|$ . Ее минимально возможное положение совпадает с касательной к кривой  $u_Q(\psi)$  в точке с  $\psi_0$ . Это же положение линии изменения электрической прочности является оптимальным с точки зрения смягчения перенапряжений.

Момент замыкания контактов  $\psi_{make}$  может быть найден из системы уравнений

$$\begin{aligned} u_{DS}(\psi_{make}) &= 0, \\ u_{DS}(\psi_0) &= u_Q(\psi_0), \\ u_{DS}(\psi_0) &= du_Q(\psi_0) / d\psi. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя выражения (1) и (2) в систему (4), получаем фазу замыкания контактов

$$\psi_{make} = -\arccos(RDDS) - \sqrt{\frac{1}{RDDS^2} - 1}. \quad (5)$$

Фаза коммутации  $\psi_c$  электрической цепи следует из условия (3) с учетом выражения (5) и геометрических соотношений, следующих из рис. 1, б:

$$\sin \psi_c + \psi_c RDDS + RDDS \arccos(RDDS) + \sqrt{1 - RDDS^2} = 0.$$

Напряжение на контактах выключателя в момент коммутации, обуславливающее эффективность принятой стратегии управляемой коммутации, определится согласно уравнению (2) как

$$|u_Q(\psi_c)| = \sin \psi_c.$$

Выбор оптимальной фазы  $\psi_{make}$  замыкания контактов выключателя и определение напряжения на контактах выключателя в момент коммутации  $u_Q(\psi_c)$  удобно выполнять графически (рис. 2). Пример графического решения иллюстрирует определение оптимальной фазы  $\psi_{make}$  замыкания контактов выключателя и напряжения на контактах выключателя  $u_Q(\psi_c)$  для выключателя с  $RDDS = 0,5$ .

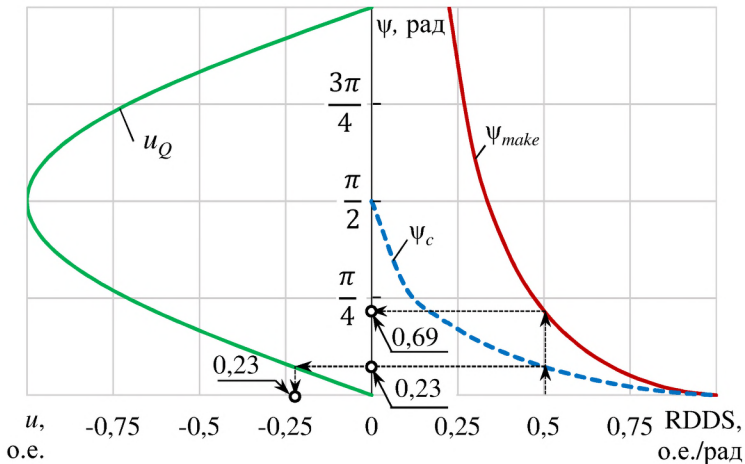


Рис. 2. Определение момента замыкания контактов  $\psi_{make}$ , момента коммутации  $\psi_c$  и величины напряжения на контактах выключателя  $u_Q$  в момент коммутации для заданной RDDS

Как видно из рис. 2, снижение RDDS приводит к повышению напряжения в момент коммутации  $u_Q(\psi_c)$  и, следовательно, снижению эффективности управляемой коммутации. При  $\text{RDDS} < 0,22$  фаза замыкания контактов  $\psi_{make} \geq \pi$  и управляемое включение становится вовсе невозможным, поскольку линия изменения электрической прочности  $u_{DS}(\psi)$  будет иметь несколько точек пересечения с кривой напряжения на контактах  $u_Q(\psi)$ .

#### Выводы

1. Управляемое включение линии электропередачи (конденсаторной батареи) призвано смягчить перенапряжения (броски тока заряда) за счёт осуществления коммутации в окрестности точки перехода кривой напряжения через нуль. Учитывая, что реальный момент замыкания электрической цепи не совпадает с моментом замыкания контактов выключателя из-за электрического пробоя межконтактного промежутка, необходимо выбор расчётного момента замыкания контактов выключателя осу-

ществлять с учетом скорости изменения электрической прочности контактного промежутка (RDDS).

2. Выключатели со скоростью изменения электрической прочности контактного промежутка, превышающей скорость изменения напряжения ( $RDDS > 1$ ), при любых прочих условиях обеспечивают включение при переходе кривой напряжения через нуль. Для выключателей с электрической прочностью, уступающей скорости изменения напряжения ( $RDDS < 1$ ), момент замыкания контактов выключателя должен лежать на касательной к кривой напряжения, параллельной линии изменения электрической прочности во времени.

#### Литература

1. *Ivanov N.G.* Fundamentals of Intelligent Automatic Reclosing of Long-Distance Transmission Lines with Shunt Reactors / N.G. Ivanov, V.A. Naumov, V.I. Antonov, E.N. Kadyshchev // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90, No. 8. – PP. 558–564. – DOI: 10.3103/S1068371219080066.

2. 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. 43–73.

3. *Александрова М.И.* Универсальные принципы управляемой коммутации силового электрооборудования / М.И. Александрова, В.А. Наумов, В.И. Антонов и др. // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 49–54.

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

5. *Aleksandrova M.I.* A Development of Shunt Reactor Controlled Energizing Theory / M.I. Aleksandrova, V.A. Naumov, V.I. Antonov, N.G. Ivanov // Proceedings – 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), 2019. – PP. 1–14. – DOI: 10.1109/RPA47751.2019.8958014.