

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

## ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ПРИ КОММУТАЦИИ МАЛОНАГРУЖЕННОЙ ЛЭП С ШУНТИРУЮЩИМИ РЕАКТОРАМИ\*

Режим включения в работу малонагруженной линии электропередачи сверхвысокого напряжения с шунтирующими реакторами характеризуется двумя существенными особенностями тока включения. Во-первых, уровень принужденной составляющей тока включения сравнительно мал из-за малой нагруженности линии, и во-вторых, значительную часть его свободного процесса составляет аperiodическая слагаемая тока шунтирующего реактора с малым коэффициентом затухания. Поэтому ток включения, протекающий через выключатель, состоит преимущественно из аperiodической слагаемой, график которой длительно не имеет точек перехода через нуль. Это утяжеляет условия работы выключателя при отключении линии, форсированного непредвиденным коротким замыканием или неправильным действием релейной защиты сразу после включения линии.

В то же время на режим форсированного отключения ЛЭП сразу после её включения влияет и тип используемого выключателя, что в основном связано с характером процесса гашения дуги.

Так, например, в традиционных воздушных выключателях интенсивность сдувания дуги не зависит от тока. Воздушным выключателям свойственен значительный ток среза, в связи с чем они могут отключать токи, не содержащие точек перехода через нуль. Однако при отключении цепи с индуктивной нагрузкой это свойство воздушных выключателей создаёт опасные для изоляции перенапряжения. Нередко при отключении шунтирующих реакторов перенапряжения вызывают пробой межконтактного промежутка с последующим повреждением воздушного выключателя [1, 2].

---

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

В то же время, в элегазовых выключателях интенсивность гашения дуги находится в непосредственной зависимости от тока, поэтому при отключении ими малой нагрузки дутьё в камере будет слабым, благодаря чему отключение малых синусоидальных индуктивных токов производится ими без среза тока и, следовательно, перенапряжений. Но в случае отключения мало-нагруженной ЛЭП с шунтирующими реакторами это свойство элегазовых выключателей становится основным недостатком, поскольку при отключении тока с преобладающей аperiodической составляющей выключатель теряет способность к гашению дуги и дуга между контактами горит до тех пор, пока в кривой тока не появятся точки перехода через нуль [2, 3]. Длительное горение дуги приводит к оплавлению контактов, вызывает перегрев элегаза и катастрофический рост давления в дугогасительной камере выключателя. Характерными примерами подобных аварий являются аварии на ПС 1150 кВ «Алтайская» (26.02.2007 г.) и ПС 750 кВ «Новобрянская» (13.07.2011 г.) [4].

Принципы безопасной коммутации цепи с шунтирующим реактором довольно подробно рассмотрены в работах [5, 6]. Однако в них рассматриваются режимы, когда реактор перед коммутацией находится в уравновешенном электромагнитном состоянии (переходный процесс отсутствует). В настоящей работе рассматриваются принципы предотвращения опасных для выключателя режимов при форсированном отключении линии сразу же после её включения, основанные на технологии управляемой коммутации [7, 8].

Нас интересуют факторы, приводящие к росту начального значения аperiodической составляющей по отношению к амплитуде принужденной составляющей в токе через выключатель при включении мало-нагруженной двухпроводной линии с шунтирующими реакторами (рис. 1, *a*). Рассматривая процессы в схеме сети будем иметь в виду, что в режиме включения выключатель удаленного конца разомкнут (ток нагрузки в линии отсутствует).

Рассмотрим факторы, влияющие на уровень аperiodической составляющей. Внутреннее сопротивление питающей системы обычно мало по сравнению с сопротивлением реактора ( $\omega_0 L_S \cdot \omega_0 L_{SR}$ ) и входным сопротивлением всей схемы (рис. 1, *b*) на промышленной частоте  $\underline{Z}_m(\omega_0) = z_m(\omega_0) \angle \varphi(\omega_0)$ .

Поэтому напряжения на входе линии и на реакторе SR  $u_S(t)$  практически равны ЭДС системы

$$e_S(t) = u_S(t) = U_S \sin(\omega_0 t + \psi_S). \quad (1)$$

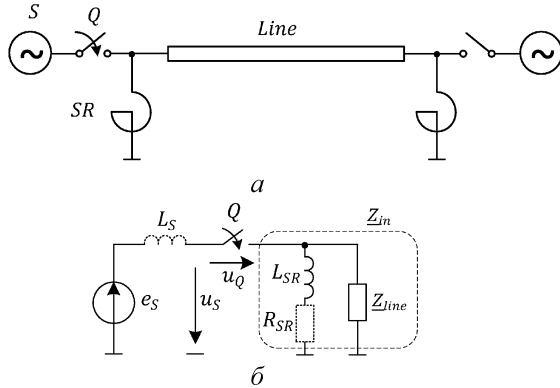


Рис. 1. Схема ЛЭП с шунтирующими реакторами в режиме включения (а) и её схема замещения (б)

Эта особенность схемы, возникающая при включении линии с шунтирующим реактором, позволяет рассматривать процессы в реакторе и линии автономно, хотя при этом через выключатель протекают обе составляющие тока включения – и ток реактора, и ток линии.

Структурно ток включения

$$i_Q(t) = i_f(t) + i_a(t) + \sum_{q=1}^{\infty} i_{d,q}(t) \quad (2)$$

состоит из принужденной составляющей  $i_f(t)$  и составляющих свободного процесса – аperiodической составляющей  $i_a(t)$  в реакторе SR и суммы высокочастотных затухающих слагаемых линии (последний член уравнения). Аperiodическая составляющая тока через выключатель полностью определяется цепью шунтирующего реактора SR:

$$i_a(t) = \frac{U_S \cos \psi_S}{\omega_0 L_{SR}} e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

где  $\tau = L_{SR}/R_{SR}$  – постоянная времени, определяемая потерями в реакторе,  $U_S$  – амплитуда напряжения питающей системы,  $\omega_0$  и  $\psi_S$  – частота и начальная фаза соответственно. Хотя принуж-

денная составляющая тока  $i_f(t)$  включает в себя одноименные составляющие токов реактора и линии, её удобно определять через входное сопротивление всей схемы  $Z_{in}(\omega_0)$ :

$$i_f(t) = \frac{U_s}{Z_{in}(\omega_0)} \sin[\omega_0 t + \psi_s - \varphi(\omega_0)]. \quad (4)$$

Это удобно при анализе зависимости принужденной составляющей от степени компенсации зарядной мощности  $k_c$  и оценивании кратности начального значения аperiodической составляющей тока реактора относительно амплитуды принужденной составляющей тока включения.

Когда коэффициент компенсации зарядной мощности ЛЭП

$$k_c = \frac{2}{\omega_0^2 L_{SR} C_0 D} \quad (5)$$

приближается к единице, в линии создаются резонансные условия на частоте принужденной составляющей тока линии, поэтому входное сопротивление всей схемы растет ( $Z_{in}(\omega_0) \rightarrow \infty$ ), а принужденный ток уменьшается ( $i_f(t) \rightarrow 0$ , здесь  $D$  – длина линии,  $C_0$  – удельная ёмкость). Поэтому ток включения такой сильно компенсированной линии практически состоит только из аperiodической слагаемой, поскольку высокочастотные слагаемые тока ( $i_{d,q}(t)$  в (2)) обычно быстро затухают и имеют существенно меньшую амплитуду, чем аperiodическое слагаемое. Кроме того доля аperiodической составляющей в токе через выключатель становится подавляющей, если момент включения линии оказывается в окрестности точки перехода кривой напряжения через нуль. В связи с этим ток выключателя в течение длительного времени не имеет естественных точек перехода кривой через нуль (рис. 2), что вызывает длительное горение дуги в элегазовых выключателях. Известны случаи, когда между контактами выключателя электрическая дуга горела около 50 с, вызвав впоследствии повреждение выключателя [4].

Гарантированное предупреждение повреждения выключателя при коммутациях ЛЭП с ШР обеспечивается при условии, что начальное значение аperiodической слагаемой тока будет меньше амплитуды принужденной слагаемой. Из уравнения (3) следует, что

этого можно добиться управлением моментом коммутации выключателя таким образом, чтобы включение ЛЭП произошло как можно ближе к точке максимумов напряжения питающей системы (при оперативном включении) или напряжения на контактах выключателя (при повторном включении в цикле АПВ) [3, 9]. Однако это требование противоречит условию обеспечения допустимого уровня перенапряжений на ЛЭП, поскольку её включение в окрестности максимума напряжения приводит к повышению уровня коммутационных перенапряжений [7, 10]. Поэтому при выборе момента включения ЛЭП нужно идти на компромисс, выбирая его между точкой перехода кривой напряжения через нуль и точкой максимума напряжения, чтобы ни коммутационные перенапряжения, ни апериодическая слагаемая тока не представляли опасности для силового оборудования [9].

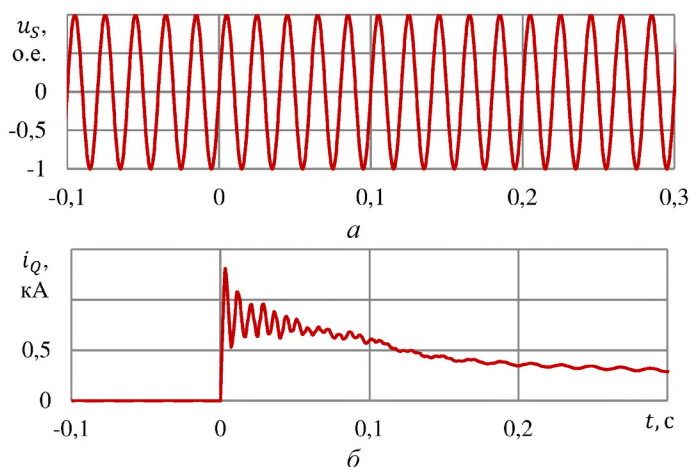


Рис. 2. Напряжение питающей системы (а) и ток через выключатель (б) при включении ЛЭП с ШР в момент перехода кривой напряжения через нуль (номинальное напряжение сети 500 кВ, длина линии 432 км, степень компенсации зарядной мощности  $k_c = 0,95$ )

Включение ЛЭП в оптимальную фазу  $\psi_{S,opt}$  должно, с одной стороны, предупредить повреждение выключателя, а с другой стороны, обеспечить максимально возможное снижение уровня коммутационных перенапряжений при этих ограничениях. Поэтому предлагается рассматривать задачу выбора момента

включения как задачу оптимизации уровня коммутационных перенапряжений с учетом ограничения, вызванного требованием обеспечения безопасности для выключателя. Следовательно, оптимизация уровня перенапряжений предполагает минимизацию фазы напряжения в момент включения  $\psi_s \rightarrow 0$  [7], а требование к безопасности коммутации будет заключаться в выборе такой фазы включения  $\psi_{s,opt}$ , которая обеспечивает появление в токе выключателя перехода через нуль уже на первом периоде его принужденной составляющей.

Для оптимальной фазы коммутации должно выполняться условие

$$\max |j_a(t)| \leq \max |j_f(t)|, \quad (6)$$

которое с учетом (3) и (4) может быть записано в виде неравенства

$$\psi_{s,opt} \geq \arccos \left[ \frac{\omega_0 L_{SR}}{z_{in}(\omega_0)} \right]. \quad (7)$$

Как видно из (7), оптимальная фаза включения зависит от соотношения сопротивления шунтирующего реактора  $\omega_0 L_{SR}$  и сопротивления неповрежденной фазы ЛЭП  $z_{in}(\omega_0)$  на частоте питающего напряжения. При аргументе арккосинуса, равном или больше 1, амплитуда принужденной составляющей будет больше начального значения апериодической слагаемой при любой фазе включения. Поэтому фаза включения ЛЭП должна выбираться исходя из условия ограничения перенапряжений, т.е.  $\psi_{s,opt} = 0$ .

Сопротивление неповрежденных фаз ЛЭП  $z_{in}(\omega_0)$  главным образом зависит от степени компенсации зарядной мощности  $k_c$ , и эта зависимость носит ярко выраженный резонансный характер (рис. 3, а). При этом наличие на линии повреждения, его вид и местоположение практически не влияют на сопротивление  $z_{in}(\omega_0)$  (кривые 1–4 практически совпадают).

Сопротивление шунтирующего реактора  $\omega_0 L_{SR}$  с ростом степени компенсации зарядной мощности  $k_c$  очевидным образом снижается (кривая 5 на рис. 3, а), оставаясь больше входного сопротивления неповрежденных фаз ЛЭП  $z_{in}(\omega_0)$  при изменении  $k_c$  от 0 до

0,7. Поэтому коммутация линии при такой степени компенсации не представляет угрозы для выключателя и оптимальная фаза включения должна быть принята исходя из условия смягчения перенапряжений и будет равной  $\psi_{S,opt} = 0$  (рис. 3, б).

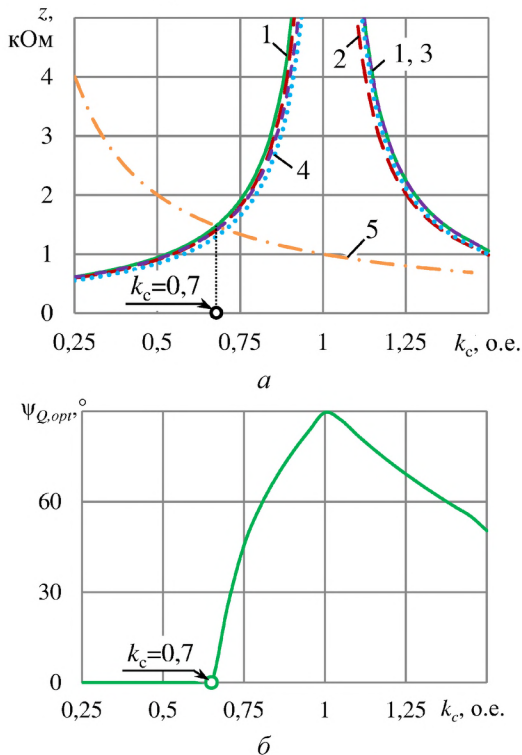


Рис. 3. Входное сопротивление неповрежденной фазы ЛЭП с шунтирующими реакторами  $z_m(\omega_0)$  (а) и оптимальная фаза включения ЛЭП  $\psi_{Q,opt}$  (б) при различных значениях коэффициента компенсации зарядной мощности  $k_c$  и разных видах повреждений на ЛЭП. Характер изменения  $z_m(\omega_0)$  мало зависит от вида повреждения (однофазного (кривая 1), двухфазного (2) и двухфазного на землю (3) коротких замыкания) и аналогичен зависимости сопротивления неповрежденной линии (4). Зависимость оптимальной фазы включения представляет собой результат компромисса требований по безопасности коммутации выключателя и требований по ограничению уровня перенапряжений в сети

При больших коэффициентах компенсации ( $k_c > 0,7$ ) входное сопротивление неповрежденных фаз  $z_{in}(\omega_0)$  начинает преобладать над сопротивлением реактора, что делает коммутацию такой ЛЭП с шунтирующими реакторами опасной для выключателя. Поэтому для снижения уровня апериодической составляющей до безопасного уровня должна применяться управляемая коммутация, обеспечивающая включение ЛЭП в оптимальную фазу  $\psi_{S,opt}$ . Изменение оптимальной фазы включения  $\psi_{S,opt}$  с ростом компенсирующей мощности шунтирующих реакторов зависит от коэффициента компенсации  $k_c$ : до резонансного значения  $k_c = 1$  оптимальная фаза  $\psi_{S,opt}$  растет, достигая  $\pi/2$  при резонансе в схеме ЛЭП–шунтирующие реакторы, а при  $k_c \geq 1$  – снижается (рис. 3, б).

#### Выводы

1. Опасность повреждения выключателя в процессе непредвиденного отключения ЛЭП с шунтирующими реакторами сразу же после её включения обусловлена подавляющим уровнем апериодической составляющей в токе через выключатель, из-за которого ток через выключатель на стадии его отключения длительное время не имеет точек перехода кривой тока через нуль.

2. Надлежащее снижение уровня апериодической составляющей тока включения возможно благодаря управлению фазой включения линии. Исследования показывают, что для ЛЭП со степенью компенсации зарядной мощности линии выше 0,7 управляемая коммутация является обязательной. Показано, что выбор фазы включения, оптимизирующей уровень коммутационных перенапряжений, должен учитывать отношение сопротивления реактора и входного сопротивления линии.

#### Литература

1. РД 153-34.3-47.501-2001 Рекомендации по эксплуатации и выбору выключателей, работающих в цепи шунтирующих реакторов. – М.: СПО ОРГРЭС, 2001. – 8 с.

2. Наумкин И.Е. Аварийные отказы элегазовых выключателей при коммутациях компенсированных ВЛ 500–1150 кВ / И.Е. Наумкин // Электричество. – 2012. – № 10. – С. 22–32.



3. *Panasetsky D.A.* On the Problem of Shunt Reactor Tripping during Single- and Three-Phase Auto-Reclosing / D.A. Panasetsky, A.B. Osak // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. – 2015. – PP. 1–6.

4. *Епифанов А.М.* Возникновение аperiodической составляющей при отключении реактированных ЛЭП и методы борьбы с ней [Электронный ресурс] / А.М. Епифанов, З.Е. Пугаченко, А.А. Коновалов // Электрические сети – 2016: докл, науч.-практ. конф. – Режим доступа: [http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/5.\\_Pugachenko\\_Z.E.\\_Vozniknovenie\\_aperiodicheskoi\\_sostavljajushchei\\_pri\\_otkl\\_reaktiro\\_vannykh\\_LEHP.pdf](http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/5._Pugachenko_Z.E._Vozniknovenie_aperiodicheskoi_sostavljajushchei_pri_otkl_reaktiro_vannykh_LEHP.pdf) (дата обращения: 13.04.2020).

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

6. *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.

7. *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.

8. *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.

9. Guidelines and best practices for the commissioning and operation of controlled switching projects // CIGRE TB757, Working Group A3.335. – 2019.

10. *Иванов Н.Г.* Анализ переходных процессов в компенсированной ЛЭП СВН в цикле интеллектуального АПВ / Н.Г. Иванов, В.А. Наумов, В.И. Антонов // РЕЛАВЭКСПО–2019: сб. докладов науч.-техн. конф. молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 201–211.