

Теоретические основы интеллектуального АПВ протяженных ЛЭП с шунтирующими реакторами

ИВАНОВ Н.Г., НАУМОВ В.А., АНТОНОВ В.И., КАДЫШЕВ Е.Н.

Fundamentals of intelligent auto-reclosing of long transmission lines with shunt reactors

IVANOV N.G., NAUMOV V.A., ANTONOV V.I., KADYSHEV E.N.

Одним из эффективных методов предотвращения опасных коммутационных перенапряжений, возникающих в цикле автоматического повторного включения (АПВ) протяженных ЛЭП сверхвысокого напряжения, является интеллектуальное АПВ. Основу метода составляет выбор момента повторного включения линии, оптимального для снижения интенсивности переходного процесса. В статье исследуются основные закономерности протекания переходных процессов в цикле АПВ и анализируются различные методы интеллектуального АПВ. Для анализа используются принцип наложения и предложенная универсальная модель электрической сети, описывающая процессы на всех этапах цикла АПВ. Показывается, что интенсивность свободного процесса при АПВ напрямую зависит от соотношения напряжений питающей системы и линии в момент повторного включения. Показано, что уменьшения уровня перенапряжений можно добиться благодаря включению линии в момент перехода напряжения на контактах выключателя через нуль, или в точке минимума огибающей этого напряжения, но эффективным является интеллектуальное АПВ, совмещающее в себе оба подхода и осуществляющее повторное включение в момент перехода напряжения через нуль вблизи минимума огибающей. Вычислительные эксперименты подтверждают, что решающее влияние на уровень перенапряжений при АПВ оказывает именно момент повторного включения, а влияние степени компенсации зарядной мощности и угла передачи не столь существенно.

Ключевые слова: линия электропередачи, автоматическое повторное включение, коммутационные перенапряжения, управляемая коммутация.

Протяженная линия электропередачи, оснащенная шунтирующими реакторами (ШР), в паузе цикла трехфазного автоматического повторного включения (АПВ) образует высокодобротную колебательную систему. К моменту повторного включения неповрежденные фазы сохраняют значительный остаточный заряд, в связи с чем включение линии может сопровождаться интенсивным волновым процессом с опасными пере-

One of the effective methods to prevent dangerous switching overvoltage during auto-reclosing of ultra-high voltage transmission lines is intelligent auto-reclosing. The method based on reduction of transient process by choice of optimal line energizing moment.

The main regularities of transients during auto-reclosing cycle and various methods of intelligent auto-reclosing are analyzed. The superposition theorem and universal electrical network model are used for analysis of transition process in all stages of auto-reclosing cycle. It is shown that intensity of transient process during auto-reclosing is directly dependent on the relations between source and line voltages at reclosing moment. A mitigation of overvoltage can be achieved by reclosing at moment of breaker voltage zero-crossing and at moment when breaker voltage envelope reaches a minimum. But the most efficient is an intelligent auto-reclosing combining two approaches, and reclosing at moment of breaker voltage zero-crossing near minimum of voltage envelope. Computational experiments confirmed that reclosing moment has decisive importance on overvoltage level, and that influence of compensation degree and transmission angle is not significant.*

Key words: transmission line, automatic reclosing of transmission line, switching overvoltage, controlled switching.

напряжениями в «заряженных» фазах.

Управление моментом коммутации для снижения интенсивности переходного процесса при АПВ некомпенсированных ЛЭП было предложено Е. Маури [1]. Этот принцип получил название управляемой или синхронной коммутации.

В паузе цикла АПВ линий с шунтирующими реакторами напряжение на контактах выключателя имеет форму биений. Развитие идеи Е. Маури

для управляемой коммутации таких линий было предложено в [2], в которой предписывалось включать линию в момент минимума огибающей напряжения на контактах выключателя.

Первые устройства управляемой коммутации компенсированных ЛЭП не имели возможности предсказывать моменты минимума огибающей в темпе процесса. Поэтому длительность паузы АПВ устанавливалась заранее на основе предварительного расчета наиболее вероятного сценария цикла повторного включения, что ограничивало эффективность таких устройств.

Развитие элементной базы и алгоритмов цифровой обработки сигналов позволило реализовать алгоритмы управляемой коммутации, способные предсказывать оптимальный момент коммутации в темпе процесса – алгоритмы интеллектуального АПВ. Их эффективность была подтверждена результатами многочисленных практических испытаний, математического и физического моделирования. Однако теоретическое описание закономерностей переходных процессов в цикле АПВ и механизма снижения перенапряжений, лежащего в основе интеллектуального АПВ, все еще отсутствует.

Аналитический расчет переходного процесса в цикле АПВ

Для наглядности модель исследуемой сети сознательно упрощается до однофазной аналогично [3], где, однако имеются существенные ограничения, препятствующие применению предложенного метода. Это связано с тем, что в [3] не учитывается остаточный заряд неповрежденной фазы компенсированной линии и расчетные выражения даны лишь для разомкнутого конца ЛЭП, в то время как при АПВ максимальные напряжения могут наблюдаться и в других точках линии.

Рассматривается следующая последовательность режимов, наиболее близко соответствующая режимам в неповрежденной фазе трехфазной линии в цикле АПВ: нагрузочный режим → отключение линии с первой стороны → отключение линии со второй стороны → повторное включение линии с первой стороны → повторное включение линии со второй стороны (включение линии в транзит).

Для расчета переходного процесса используется метод сведения к нулевым начальным условиям. В каждый момент времени цикла АПВ электрические величины рассчитываются как сумма величин предшествующего и дополнительного режимов.

Расчетные схемы сети в цикле АПВ

Нагрузочный режим

Начальные условия переходного процесса в цикле АПВ формируются в схеме нагрузочного режима (рис. 1).

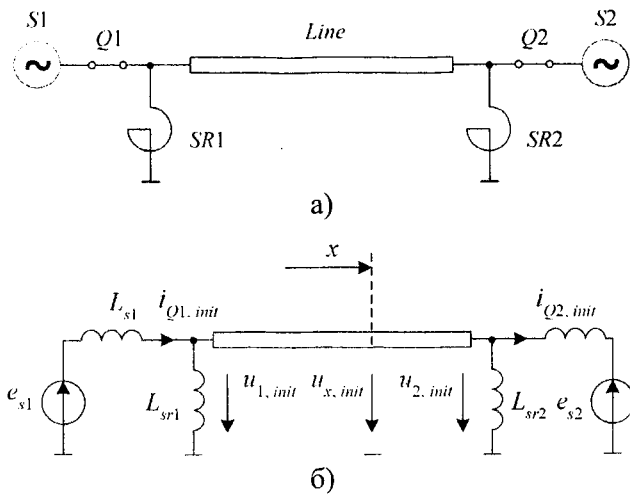


Рис. 1. Схема сети (а) и ее расчетная схема (б) в нагрузочном режиме

Отключение линии с первой и второй сторон (дополнительные режимы № 1 и № 2)

Электрическая сеть в режимах №1 и №2 представляет собой пассивную цепь, подключенную к источнику тока (рис. 2). Параметры источника определяются током через соответствующий выключатель в предшествующем режиме. Для схемы режима №1 предшествующим режимом является исходный режим, поэтому

$$i_{add1}(t) = i_{Q1,init}(t).$$

Параметры источника тока в схеме режима №2 определяются токами через выключатель Q2 в схемах режима №1 и исходного режима:

$$i_{add2}(t) = i_{Q2,init}(t) + i_{Q2,add1}(t)$$

Поскольку выключатели Q1 и Q2 включены последовательно с индуктивностью, принимается, что гашение дуги при их отключении происходит в момент естественного перехода тока через ноль.

Включение линии с первой стороны и включение линии в транзит (дополнительные режимы №3 и №4)

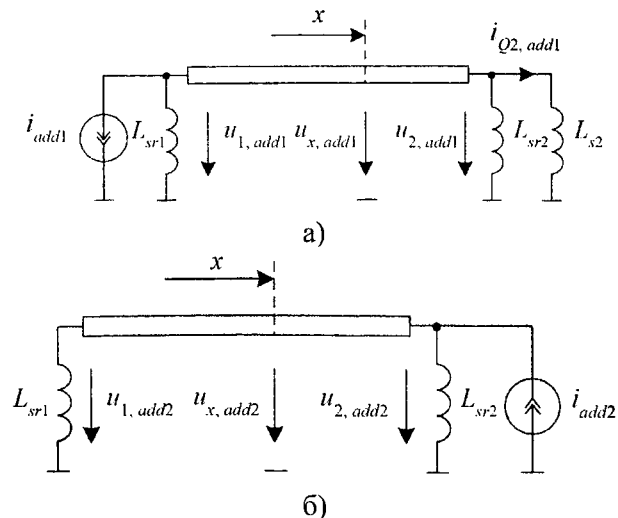


Рис. 2. Схема замещения сети в дополнительных режимах №1 (а) и №2 (б)

Схемы замещения сети в режимах №3 и №4 также представляют собой пассивные цепи, но в отличие от режимов №1 и №2 каждая из них подключена к источнику ЭДС (рис. 3). Напряжения источников определяются напряжениями на контактах выключателя в предшествующем режиме.

В режиме №3

$$e_{add3}(t) = e_{s1}(t) - u_{1,pr3}(t), \quad (1)$$

где $u_{1,pr3}(t) = u_{1,init}(t) + u_{1,add1}(t) + u_{1,add2}(t)$,

в режиме №4

$$e_{add4}(t) = e_{s2}(t) - u_{2,pr4}(t),$$

$u_{2,pr4}(t) = u_{2,init}(t) + u_{2,add1}(t) + u_{2,add2}(t) + u_{2,add3}(t)$.

При оценке уровня перенапряжений режим №4 может не рассматриваться, поскольку он не сопровождается интенсивным переходным процессом. Причина заключается в том, что, во-первых, включение линии в транзит обычно происходит с предварительной синхронизацией напряжений системы S2 и линии u_2 , и поэтому напряжение e_{add4} имеет невысокую амплитуду, а во-вторых, коэффициент отражения электромагнитной волны для обоих концов линии мал из-за малого сопротивления источников питания.

Универсальная расчетная схема

Все дополнительные режимы являются режимами включения источника на пассивную цепь с нулевыми начальными условиями. Учет этой особенности позволяет формализовать расчет и упростить его реализацию в вычислительной среде путем приведения схемы всех дополнительных режимов к универсальной форме (рис. 4) [4]. Универсальная расчетная схема применима и для расчета исходного режима, если рассматривать действия источников питания по отдельности.

Топология универсальной расчетной схемы во всех режимах остается неизменной, в то время как место подключения источника тока, положение

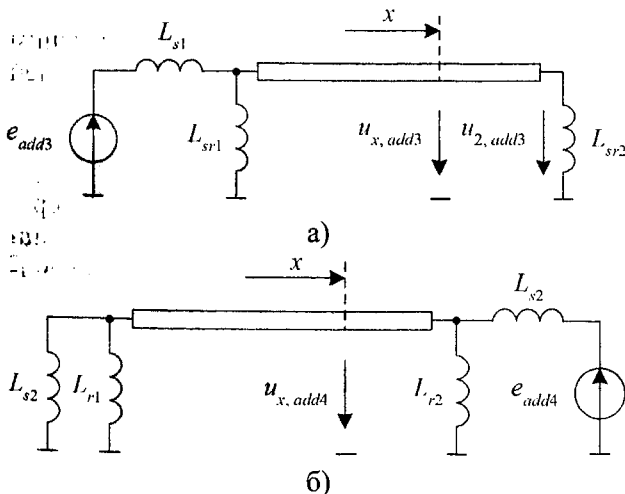


Рис. 3. Схема замещения сети в дополнительных режимах №3 (а) и №4 (б)

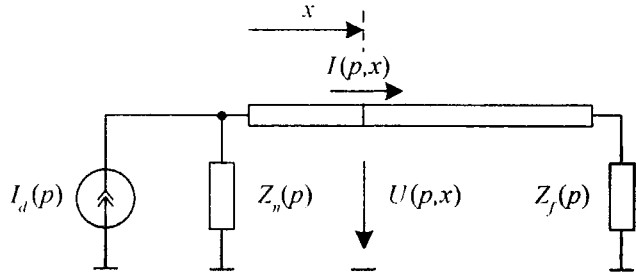


Рис. 4. Универсальная расчетная схема электрической сети: Z_n и Z_f – эквивалентные сопротивления левой и правой частей схемы

и точки наблюдения и полярность тока линии в универсальной расчетной схеме могут отличаться. Например, схема режима №1 в точности соответствует универсальной расчетной схеме, а схема режима №2 является зеркальным отражением универсальной схемы с соответствующими изменениями ее параметров.

Очевидно, что коммутационные перенапряжения в цикле АПВ вызываются свободными составляющими переходного процесса, поэтому именно они представляют интерес при анализе перенапряжений. Для расчета используется операторный метод – электрические величины представляются в виде совокупности вынужденной и свободных составляющих.

Расчетные выражения для изображений токов и напряжений в произвольной точке линии в универсальной схеме (далее, где не возникает неоднозначность трактовки, комплексная переменная p в выражениях опускается):

$$U(x) = I_d Z_n \frac{Z_f \operatorname{ch}\gamma(l-x) + Z_w \operatorname{sh}\gamma(l-x)}{D}; \quad (2)$$

$$I(x) = I_d Z_n \frac{\operatorname{ch}\gamma(l-x) + \frac{Z_f}{Z_w} \operatorname{sh}\gamma(l-x)}{D}; \quad (3)$$

$$D = (Z_n + Z_f) \operatorname{ch}\gamma l + \left(Z_w + \frac{Z_n Z_f}{Z_w} \right) \operatorname{sh}\gamma l.$$

Здесь $\gamma = \sqrt{(R_0 + pL_0)(G_0 + pC_0)}$ – постоянная распространения волны;

$Z_w = \sqrt{(R_0 + pL_0)/(G_0 + pC_0)}$ – волновое сопротивление; R_0, L_0, G_0 и C_0 – удельные активное сопротивление, индуктивность, активная проводимость и емкость линии; l – длина ЛЭП; x – координата точки наблюдения, отсчитываемая от места подключения источника тока.

Составляющие электрических величин в переходном режиме

В общем случае в универсальной схеме сети (рис. 4) искомая электрическая величина $v(t)$ может быть представлена изображением:

$$V(p) = \frac{F(p)}{A(p)},$$

где $F(p)$ – изображение электрической величины источника возмущения; $A(p)$ – функция, определяемая параметрами схемы. В нашем случае схема сети содержит длинную линию, поэтому $A(p)$ имеет бесконечное число нулей, а искомая величина $v(t)$ при воздействии источника возмущения в виде затухающей синусоиды:

$$f(t) = F_m e^{-\alpha_f t} \sin(\omega_f t + \psi_f),$$

будет содержать вынужденную и бесконечное число свободных слагаемых

$$v(t) = \text{Im} \left[V_e e^{p_f t} + \sum_{m=1}^{\infty} V_{d,q} e^{p_m t} \right]. \quad (4)$$

Комплексная амплитуда вынужденной составляющей и начальное значение комплексной амплитуды m -й свободной слагаемой [5]:

$$V_e = \frac{F_m e^{j\psi_f}}{A(p_f)}$$

и

$$V_{d,q} = \begin{cases} \frac{F_m e^{j\psi_f}}{A'(p_q)(p_q - p_f)}, & \text{если } \text{Im } p_q = 0, \\ \frac{F_m}{A'(p_q)} \left[\frac{e^{j\psi_f}}{p_q - p_f} - \frac{e^{-j\psi_f}}{p_q + p_f} \right], & \text{если } \text{Im } p_q \neq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $p_f = -\alpha_f + j\omega_f$ – комплексная частота источника возмущения; p_q – нуль функции $A(p)$ с порядковым номером q .

Электрические величины в переходном режиме сети с длинной линией теоретически содержат бесконечное число свободных слагаемых, но их амплитуда быстро уменьшается с ростом частоты. Поэтому выбор оптимальных условий управляемого включения ЛЭП зависит только от первых трех-четырех слагаемых свободного процесса.

Механизм снижения перенапряжений при интеллектуальном АПВ

Переходный процесс при повторном включении протекает в схеме дополнительного режима № 3 (рис. 3,а) и вызывается подключением к электрической сети источника ЭДС e_{add3} (1). К этому моменту все высокочастотные свободные составляющие напряжения со стороны ЛЭП уже затухают и в нем остается только низкочастотная затухающая составляющая [6]. Поэтому в режиме №3 напряжение источника ЭДС e_{add3} :

$$\underline{E}_{add3}(t) = \underline{E}_{s1}(t) - \underline{U}_1(t) = \underline{E}_{s1} e^{j\psi_{s1}} e^{p_{s1} t} - U_1 e^{j\psi_L} e^{p_L t}, \quad (6)$$

$$p_{s1} = j\omega_0, \quad p_L = -\alpha_L + j\omega_L,$$

где ψ_{s1} и ψ_L – начальные фазы ЭДС системы и напряжения линии; ω_0 – частота ЭДС системы; α_L и

ω_L – коэффициент затухания и частота напряжений ЛЭП. Обычно частота напряжения со стороны ЛЭП ω_L близка к номинальной частоте сети ω_0 , а коэффициент затухания α_L мал и не превышает 2 с^{-1} [7], поэтому $p_L \approx j\omega_L$.

Для ЛЭП протяженностью существенно меньшей длины электромагнитной волны частота всех свободных составляющих в переходном режиме кратно выше как частоты ЭДС системы ($\omega_q \gg \omega_0$), так и частоты напряжения ЛЭП ($\omega_q \gg \omega_L$). Поэтому допустимо считать, что

$$p_q - p_{s1} \approx p_q - p_L = p_q \left(1 - p_* \right),$$

$$p_q + p_{s1} \approx p_q + p_L = p_q \left(1 + p_* \right), \quad (7)$$

$$p_* = p_L / p_q \approx p_{s1} / p_q, \quad \left| p_* \right| \ll 1.$$

В то же время на протяженных ЛЭП степень компенсации зарядной мощности близка к единице [8]. На таких линиях $\omega_L \approx \omega_{s1}$, следовательно, $p_L \approx p_{s1}$, и к ним также применимо допущение (7).

С учетом выражений (5) – (7) начальное значение комплексной амплитуды q -й свободной составляющей может быть представлено в более удобной для анализа форме – в виде выражения (8) (см. таблицу), из анализа которого следует, что интенсивность перенапряжений при АПВ зависит от соотношений между амплитудами и фазами напряжений питающей системы и линии. Следовательно, возможны несколько способов интеллектуального АПВ.

Наиболее интенсивные перенапряжения возникают при повторном включении ЛЭП в момент максимума напряжения на контактах выключателя (выражение (9), таблица). Это случай характерен для традиционного АПВ.

Повторное включение ЛЭП в момент перехода напряжения на контактах выключателя через ноль [1,9] позволяет добиться снижения перенапряжений в $1/p$ раз по сравнению с наихудшим случаем (9), а в момент минимума огибающей напряжения [10,11] – в $(E_{s1} + U_1)/(E_{s1} - U_1)$ раз. Это следует из сравнения выражений (10) и (11) с выражением (9).

Наиболее эффективное уменьшение перенапряжений достигается при использовании алгоритма интеллектуального АПВ, обеспечивающего включение в момент перехода напряжения на контактах выключателя через ноль вблизи минимума огибающей. В этом случае обеспечивается снижение перенапряжений в $(E_{s1} + U_1) / \left[p (E_{s1} - U_1) \right]$ раз по сравнению с традиционным АПВ (выражение (12), таблица).

Условия АПВ	Комплексная амплитуда свободной составляющей \underline{V}_q	
	В общем случае	Максимальное значение
Включение в произвольный момент	$\frac{1}{p_q A'(p_q)} \left[\frac{E_{s1} e^{j\psi_{s1}} - U_1 e^{j\psi_L}}{1-p} - \frac{E_{s1} e^{-j\psi_{s1}} - U_1 e^{-j\psi_L}}{1+p} \right] \quad (8)$	При $\psi_{s1} = \psi_L + \pi, \psi_L = \pm\pi/2$ $(E_{s1} + U_1) B(p_q, p), \quad (9)$ где $B(p_q, p) = \frac{2}{p_q A'(p_q) (1-p)(1+p)}$
Включение в момент перехода напряжения на контактах выключателя через ноль: $E_{s1} \sin\psi_{s1} = U_1 \sin\psi_L$	$\frac{E_{s1} \cos\psi_{s1} - U_1 \cos\psi_L}{p_q A'(p_q)} \left[\frac{1}{1-p} - \frac{1}{1+p} \right]$	При $\psi_{s1} = \pi n, \psi_L = \pi(n+1), n \in Z$ $p(E_{s1} + U_1) B(p_q, p) \quad (10)$
Включение в момент минимума огибающей напряжения на контактах выключателя: $\psi_{s1} = \psi_L = \Psi$	$\frac{E_{s1} - U_1}{p_q A'(p_q)} \left[\frac{e^{j\psi}}{1-p} - \frac{e^{-j\psi}}{1+p} \right]$	При $\psi = \pm\pi/2$ $(E_{s1} - U_1) B(p_q, p) \quad (11)$
Включение в момент перехода напряжения на контактах выключателя через ноль вблизи минимума огибающей: $E_{s1} \sin\psi_{s1} = U_1 \sin\psi_L$ $\psi_{s1} \approx \psi_L = \Psi$	$\frac{E_{s1} - U_1}{p_q A'(p_q)} \left[\frac{1}{1-p} - \frac{1}{1+p} \right] \cos\psi$	При $\psi = \pm\pi$ $p(E_{s1} - U_1) B(p_q, p) \quad (12)$

Вычислительный эксперимент

Цель вычислительного эксперимента – исследовать влияние параметров схемы и условий повторного включения на уровень перенапряжений. Оценка уровня перенапряжений выполняется на основе профилей максимальных напряжений по всей линии. Программа эксперимента включает в себя исследование процессов при повторном включении в момент:

- максимума напряжения на контактах выключателя $Q1$;
- перехода напряжения на контактах выключателя $Q1$ через ноль;
- минимума огибающей напряжения на контактах выключателя $Q1$;
- перехода напряжения на контактах выключателя $Q1$ через ноль вблизи минимума огибающей этого напряжения.

Влияние разрядников и ОПН не учитывается.

Параметры схемы

Исследуется ЛЭП длиной $l = 500$ км с удельными параметрами $R_0 = 0,0296$ Ом/км, $L_0 = 0,98$ мГн/км, $C_0 = 11,6$ нФ/км, оснащенная двумя реакторами с индуктивностью

$$L_{sr1} = L_{sr2} = \frac{2}{k_c \omega^2 l C_0},$$

где k_c – коэффициент компенсации зарядной мощности линии. Энергосистемы слева и справа представляются источниками ЭДС $E_1 = 1 < \delta$ о.е. и $E_2 = 1 < 0^\circ$ о.е. с внутренней индуктивностью $L_{s1} = L_{s2} = 0,064$ Гн. Значения коэффициента компенсации $k_c = 0,5 \div 1,5$ и угла передачи $\delta =$

$= -60^\circ \div 60^\circ$. Минимальная длительность паузы АПВ принимается равной 0,35 с [12].

Повторное включение линии в момент максимума напряжения на контактах выключателя

Максимальное напряжение наблюдается вблизи разомкнутого конца линии и достигает 3,2 о.е. (рис. 5). Это существенно превышает уровень допустимых коммутационных перенапряжений для изоляции оборудования электрической сети СВН (2,2 о.е. для сети 330 кВ, 1,65 о.е. для сети 1150 кВ).

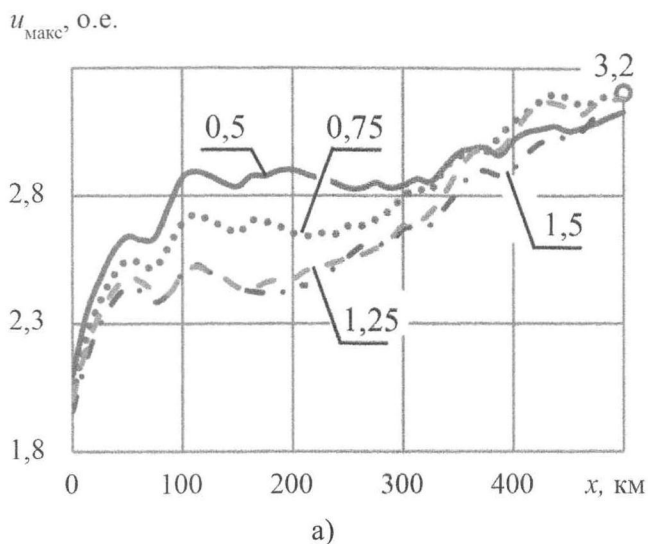
Уровень перенапряжений практически не зависит от степени компенсации зарядной мощности ЛЭП. Это объясняется тем, что свободные составляющие переходного процесса, приводящие к перенапряжениям, имеют высокую частоту и практически не протекают по шунтирующим реакторам.

Изменение угла передачи слабо сказывается на уровне перенапряжений, хотя при увеличении абсолютного значения угла передачи амплитуда остаточного напряжения со стороны линии в паузе АПВ снижается.

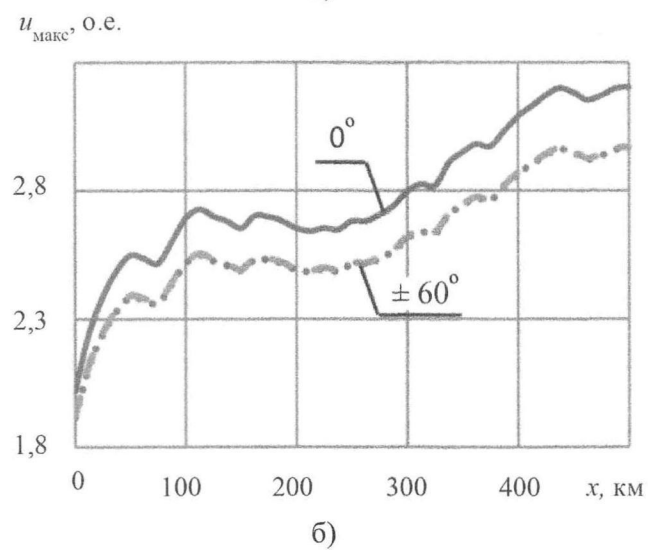
Повторное включение линии в момент перехода напряжения на контактах выключателя через ноль

Максимальное напряжение снижается более чем на 41% по сравнению с предыдущим случаем и составляет 1,9 о.е. (рис. 6). Поскольку и в этом случае уровень перенапряжений в основном определяется свободными составляющими, то влияние остальных факторов на него слабо.

Повторное включение линии в момент минимума огибающей напряжения или в момент перехода напряжения на контактах выключателя



а)



б)

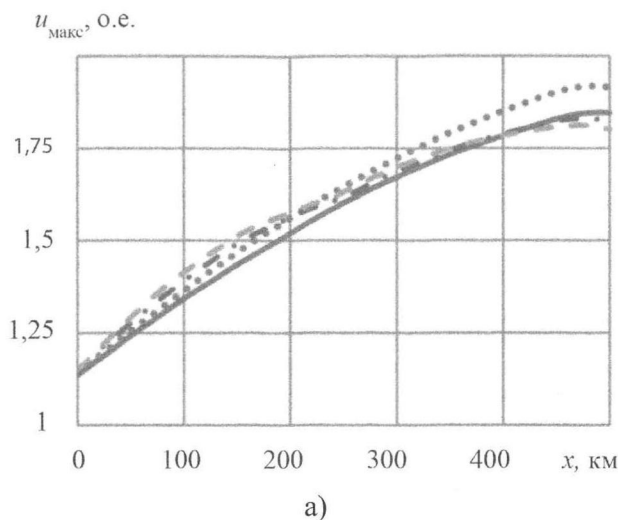
Рис. 5. Профиль максимального напряжения на ЛЭП при повторном включении в момент максимума напряжения на контактах выключателя Q1: при $\delta = 0$ и $k_c = 0,5; 0,75; 1,25$ и $1,5$ (а); при $k_c = 0,75$ и $\delta = 0$ и $\pm 60^\circ$ (б) Обозначения аналогичны рис. 5

через ноль *вблизи минимума огибающей*

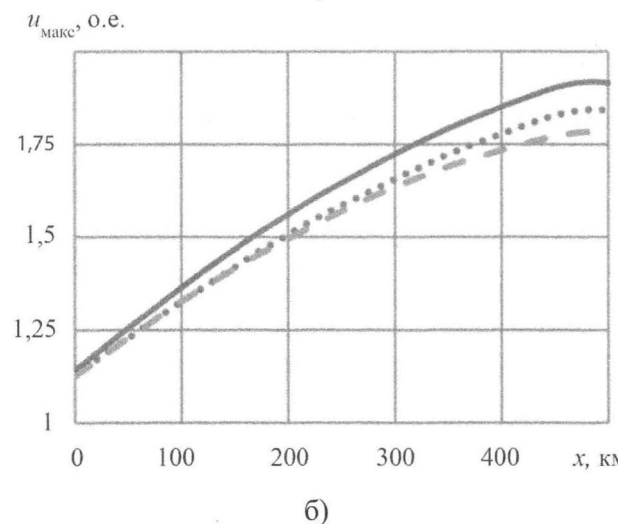
На линии с малыми потерями оба метода одинаково эффективны: максимальные напряжения не превышают 1,36 о.е. (рис. 7 и 8), что объясняется свойственной таким линиям малой величиной огибающей напряжения на контактах выключателя в момент включения.

Преимущество повторного включения в момент перехода напряжения на контактах выключателя через ноль *вблизи минимума огибающей* становится явным при увеличении потерь в линии, например, из-за плохих погодных условий. В этом случае напряжение в точке минимума огибающей значительно.

Для обоих методов характерно снижение перенапряжений при увеличении степени компенсации благодаря снижению амплитуды вынужденной составляющей напряжения на линии (рис. 7,а и 8,а), но это обстоятельство не является



а)



б)

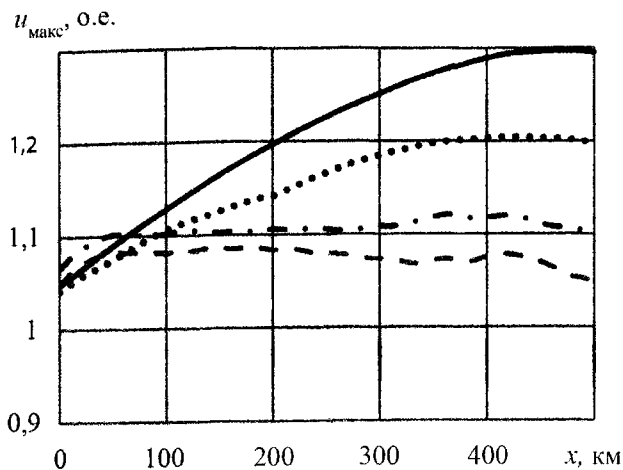
Рис. 6. Профиль максимального напряжения на ЛЭП при повторном включении в момент перехода напряжения на контактах выключателя Q1 через ноль: $\delta = 0^\circ$ (а); $k_c = 0,75$ (б).

определяющим для уровня перенапряжений. Изменение угла передачи приводит к росту уровня перенапряжений из-за увеличения значения огибающей в точке минимума (рис. 7,б и 8,б).

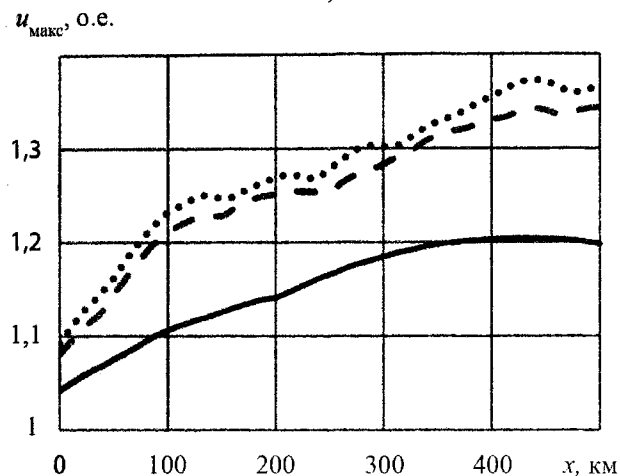
Выводы

Решающее влияние на уровень перенапряжений при АПВ оказывает момент включения. Влияние степени компенсации зарядной мощности ЛЭП и угла передачи относительно невелико.

Теоретический анализ и вычислительный эксперимент подтверждают преимущество алгоритма интеллектуального АПВ ЛЭП в момент перехода кривой напряжения на контактах выключателя через ноль *вблизи минимума огибающей* над другими алгоритмами.



а)

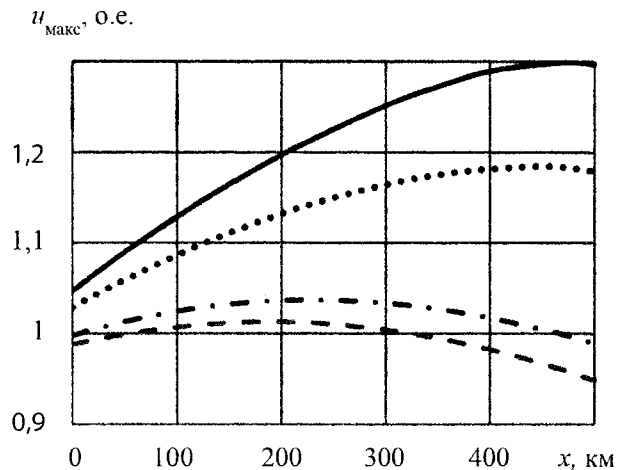


б)

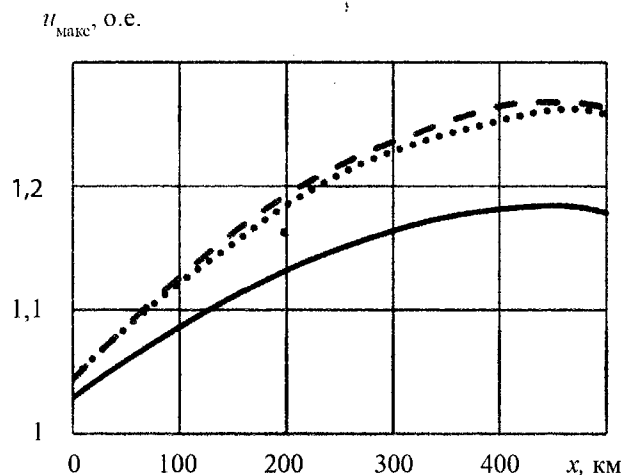
Рис. 7. Профиль максимального напряжения на ЛЭП при повторном включении в момент минимума огибающей напряжения на контактах выключателя $Q1$: $\delta = 0^\circ$ (а); $k_c = 0,75$ (б). Обозначения аналогичны рис. 5

Список литературы

1. Maury E. Synchronous Closing of 525 and 765 kV Circuit Breakers: A Means of Reducing Switching Surges on Unloaded Lines // CIGRE Report. 1966. №143.
2. Clerici A., Ruckstuhl G., Vian A. Influence of Shunt Reactors on Switching Surges // IEEE Trans. On Power App. And Syst. 1970. Vol. PAS-89. № 8.
3. Sweeting D.K. Overvoltages Produced When Energizing Transmission Lines // Electra. 1972. № 22.
4. Иванов Н.Г., Наумов В.А., Антонов В.И. Анализ переходных процессов в компенсированной ЛЭП СВН в цикле интеллектуального АПВ / Сб. докл. науч.-технич. конф. молодых специалистов. Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 2019.
5. Лосев С.В., Чернин А.Б. Расчет электромагнитных переходных процессов для релейной защиты на линиях большой протяженности. М.: Энергия, 1972.
6. Иванов Н.Г. и др. Анализ структуры напряжения компенсированной ЛЭП в паузе цикла автоматического повторного включения // Информационная техника в электротехнике и электроэнергетике. Материалы 11-й



а)



б)

Рис. 8. Профиль максимального напряжения на ЛЭП при повторном включении в момент перехода напряжения на контактах выключателя $Q1$ через ноль вблизи минимума огибающей этого напряжения: $\delta = 0^\circ$ (а); $k_c = 0,75$ (б). Обозначения аналогичны рис. 5

Всерос. научно-технич. конф. Чебоксары, 2018.

7. Акopian A.A. and other. Switching Overvoltages and the System of Protection Against them in 750 kV Networks of the USSR / CIGRE Conference/ 1972. Paper 33-07.
8. СО 153-34.20.118-2003. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. Сер. 17. Вып. 19. М., 2010.
9. Konkel H.E., Legate A.C., Ramberg H.C. Limiting Switching Surge Overvoltage with Conventional Power Circuit Breakers // IEEE Trans. On PAS. 1977. Vol. PAS-96. № 2.
10. Беляков Н.Н., Рашкес В.С. Способ ограничения перенапряжений при повторных включениях линий электропередач // Электричество. 1975. № 2.
11. Mestas P., Tavares M.C., Gloe A.M. Implementation and Performance Evaluation of a Reclosing Method for Shunt Reactor-Compensated Transmission Lines // IEEE Trans. on Power Deliv. 2011. Vol. 26. № 2.
12. Барзам А.Б. Системная автоматика. М.: Энергоатомиздат, 1989.