

Универсальный подход к минимизации потерь активной мощности в линиях сверхвысокого напряжения

КРАСИЛЬНИКОВА Т.Г.

Сформулирована и решена задача минимизации потерь активной мощности в линиях сверхвысокого напряжения при ее строгой постановке. С использованием программного комплекса «Mathcad» проведен анализ оптимальных напряжений и реактивной мощности по концам линий напряжением 500 и 750 кВ в зависимости от передаваемой активной мощности и характера погоды вдоль трассы.

Ключевые слова: линия сверхвысокого напряжения, оптимальное напряжение, активная мощность, потери, минимизация потерь

Потери активной мощности в линиях сверхвысокого напряжения (СВН) складываются из потерь на нагрев проводов и их коронирование. Потери мощности на нагрев, главным образом, зависят от значения передаваемой мощности по линии, а потери мощности на корону определяются видом погоды и распределением напряжения вдоль линии. Основным воздействующим фактором на значение потерь мощности в линии является регулирование напряжения в конечных точках линии, которое может быть осуществлено путем использования управляемых устройств реактивной мощности. Оснащение сети СВН управляемыми устройствами реактивной мощности, которое намечается в ближайшей перспективе, позволит поддерживать по концам линий оптимальный уровень напряжения, при котором имеют место минимальные потери активной мощности.

Вопросы оптимизации режима напряжений в линиях СВН рассматриваются в ряде работ [1–5], среди которых можно отметить [4, 5], где предлагаются формулы для определения оптимальных напряжений по концам линии. Однако эти зависимости не являются строгими, поскольку получены при ряде допущений.

Современная вычислительная техника и программные комплексы типа «Mathcad» или «Matlab» позволяют легко реализовать универсальный подход для минимизации потерь активной мощности в линиях СВН.

Потери активной мощности в линиях СВН. При анализе режимов в линиях СВН учет распределённости параметров является обязательным и осуществляется согласно уравнениям длинной линии [6], в которые входят два важнейших парамет-

The problem of minimizing active power losses in extrahigh-voltage power lines is formulated and solved in a rigorous statement. The optimal voltage levels and reactive power flows at the ends of 500- and 750-kV power lines as functions of transmitted active power and weather conditions along the power line route are analyzed using the Mathcad software package.

Key words: extrahigh-voltage power line, optimal voltage, active power, minimization of losses

ра: $g = a + jb$ — постоянная распространения линии, где a — коэффициент затухания; b — коэффициент фазы и $\dot{Z}_w = Z_w e^{-j\varphi}$ — волновое сопротивление линии.

Поскольку учет потерь на корону постоянной активной проводимостью некорректен из-за сильной нелинейной зависимости от напряжения [7], то в расчетных схемах потери на корону целесообразно сосредотачивать в конечных пунктах линии (рис. 1). При этом потери на корону в общем случае

$$\begin{aligned} DP_{K1} &= \int_0^{l/2} \dot{D}P_K(x) dx; & DP_{K2} &= \int_{l/2}^l \dot{D}P_K(x) dx; \\ DP_K &= DP_{K1} + DP_{K2} = \int_0^l \dot{D}P_K(x) dx, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{D}P_K(x)$ — удельные потери на корону на единицу длины на расстоянии x от отправного конца линии.

В случае вынесения потерь на корону по концам линии сама линия в расчетной схеме считается некоронирующей, т.е. определяются таким образом потери на нагрев. Представив некоронирующую линию в виде П-образной схемы замещения, получим окончательную расчетную схему для определения потерь активной мощности в линии (рис. 2).

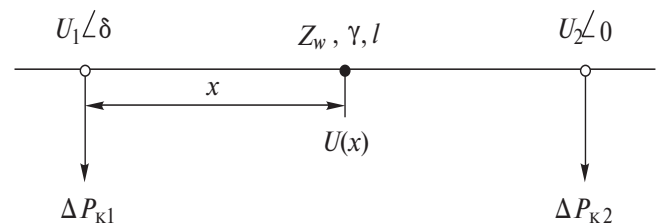


Рис. 1. Схема линии

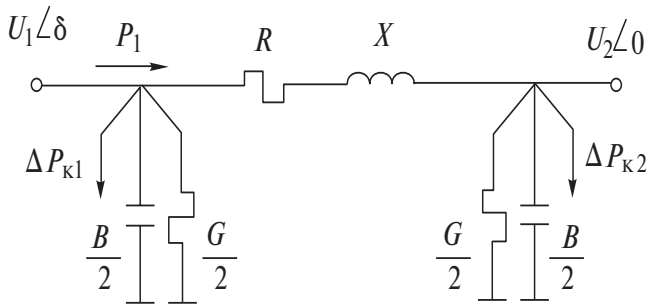


Рис. 2. Расчетная схема для определения потерь мощности в линии

Параметры схемы замещения определяются следующими соотношениями:

$$R = \frac{rl}{2} \left(\cos bl + \frac{\sin bl}{bl} \right); \quad X = Z_w \sin bl;$$

$$\frac{G}{2} = \frac{rl}{4Z_w^2} \frac{1 - \frac{\sin bl}{bl}}{\cos^2 \frac{bl}{2}}; \quad \frac{B}{2} = \frac{\operatorname{tg} \frac{bl}{2}}{Z_w}, \quad (2)$$

где r — удельное активное сопротивление линии.

При определении потерь на нагрев необходимо учитывать изменение активного сопротивления линии в зависимости от температуры провода t , что может быть сделано на основе следующего соотношения [8]:

$$r(t) = r_{20} [1 + 0,004(t - 20)],$$

где r_{20} — удельное сопротивление линии при температуре провода $+20^\circ\text{C}$ (справочный параметр — [8]).

Потери на нагрев. Согласно расчетной схеме потери на нагрев

$$DP_H = 3RI_{\text{пр}}^2 + \frac{G}{2}(U_1^2 + U_2^2),$$

где $I_{\text{пр}}$ — фазный ток в продольной ветви схемы замещения; U_1, U_2 — модули линейных напряжений по концам линии.

Учитывая, что

$$i_{\text{пр}} = \frac{U_1 e^{jd} - U_2}{\sqrt{3}Z},$$

Найдем

$$DP_H = \frac{R}{Z^2} \left(1 + \frac{GZ^2}{2R} (U_1^2 + U_2^2) - 2U_1 U_2 \cos d \right), \quad (3)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$.

Воспользуемся далее угловой характеристикой для продольного элемента схемы замещения

$$P_{1\text{пр}} = \frac{U_1^2}{Z} \sin f + \frac{U_1 U_2}{Z} \sin(d - f),$$

где $f = \arctg(R/X)$.

Тогда с учетом соотношения

$$P_1 = P_{1\text{пр}} + \frac{G}{2} U_1^2 + DP_{1\text{к}}$$

найдем угол d как функцию напряжений по концам линии и передаваемой активной мощности в начале линии:

$$d = f + \arcsin \frac{Z(P_1 - 0,5GU_1^2 - DP_{1\text{к}})}{U_1 U_2} \sin f \quad (4)$$

Используя понятие перепада напряжений по концам линии $k = U_1/U_2$, перепишем соотношения (3) и (4), определяющие потери мощности на нагрев, как функцию трех режимных параметров, а именно, напряжения и активной мощности в начале линии и перепада напряжений:

$$DP_H(U_1, k, P_1) = \frac{RU_1^2}{Z^2} \left(1 + \frac{GZ^2}{2R} (1 + k^2) - \frac{1}{k^2} \cos d \right) \sin^2 f$$

$$d = f + \arcsin \frac{P_1 - 0,5GU_1^2 - DP_{1\text{к}}}{U_1^2} \sin f \quad (5)$$

Потери на корону. Потери на коронирование проводов определяются общими соотношениями (1), в которых удельные потери на корону в произвольном месте линии можно определить на основе [7] следующим образом:

$$DP_K(x) = K_{\text{пог}} \frac{g_K}{x^5} U^2(x) \frac{U(x)}{U_{\text{max}}} \quad (6)$$

где $K_{\text{пог}}$ — коэффициент, учитывающий вид погоды; g_K — расчетная проводимость на корону, соответствующая усредненным потерям на корону по всем видам погоды; x — коэффициент запаса по короне; $U(x)$ — напряжение в произвольной точке линии x ; U_{max} — максимально допустимое рабочее напряжение на линии.

Под коэффициентом запаса по короне x понимается отношение начальной напряженности короны (действующее значение) $E_K = 14,3 \left(1 + \frac{0,615}{r_n^{0,38}} \right)$ к

максимальной напряженности на линии при максимально допустимом рабочем напряжении E_{max} .

В общем случае можно показать, что коэффициент запаса по короне зависит от параметров ли-

нии и определяется согласно следующему соотношению:

$$x = \frac{E_k Z_w K_v}{60 \frac{U_{\max}}{\sqrt{3}}} \frac{nr_n}{1 + \frac{n-1}{r_p} r_n} \frac{C_{\text{раб}}}{C_{\max}}, \quad (7)$$

где $K_v \gg 0,985$ – отношение скорости распространения электромагнитных волн вдоль линии к скорости света; n, r_n – число проводов в расщепленной фазе и радиус отдельного провода; r_p – радиус расщепленной фазы; $C_{\text{раб}}$ – рабочая (усредненная по всем фазам) емкость линии; C_{\max} – максимальная емкость, относящаяся к средней фазе для линии с горизонтальным расположением фаз.

По данным [7, 8] расчетная проводимость g_k для разных видов погоды¹ равна для линий 500 кВ (0,750–0,090)10⁻⁶ См и для линий 750 кВ – (0,040–0,055)10⁻⁶ См.

Для определения эпюры напряжения вдоль линии удобно воспользоваться следующим выражением:

$$\dot{U}(x) = \frac{U_1 e^{jd} Z_{2x} + U_2 Z_{1x}}{Z_{12}},$$

где $Z_{1x} = \dot{Z}_w \text{sh}gx$; $Z_{2x} = \dot{Z}_w \text{sh}g(l-x)$; $Z_{12} = \dot{Z}_w \text{sh}gl$ – соответствующие взаимные сопротивления.

Учитывая, что активные потери слабо влияют на распределение напряжения вдоль линии, получим следующее выражение для эпюры распределения напряжений от таких режимных параметров, как напряжение и активная мощность в начале линии, а также перепад напряжений на линии:

$$U(x, U_1, k, P_1) = \frac{U_1}{\sin bl} \text{mod} \frac{e^{jd_0}}{e} \sin b(l-x) + \frac{\sin bx}{k} \dot{U} \quad (9)$$

$$d_0 = f + \arcsin \frac{P_1 - 0,5GU_1^2}{U_1^2} \sin f \quad (10)$$

Минимизация потерь активной мощности. Из приведенного анализа вытекает следующий порядок определения потерь активной мощности в линии как функции упомянутых трех режимных параметров.

1. Угловой сдвиг между напряжениями по концам линии (без учета потерь на корону):

$$d_0(U_1, k, P_1) = f + \arcsin \frac{P_1 - 0,5GU_1^2}{U_1^2} \sin f \quad (8)$$

2. Распределение напряжения вдоль линии:

$$U(x, U_1, k, P_1) = \frac{U_1}{\sin bl} \text{mod} \frac{e^{jd_0}}{e} \sin b(l-x) + \frac{\sin bx}{k} \dot{U} \quad (9)$$

3. Потери на корону:

$$DP_{k1}(U_1, k, P_1) = K_{\text{пог}} \frac{g_k}{x^5} \dot{U}^{1/2} U^2(x, U_1, k, P_1) \int \frac{U(x, U_1, k, P_1)}{U_{\max}} \dot{U}^5 dx; \quad (10)$$

$$DP_k(U_1, k, P_1) = K_{\text{пог}} \frac{g_k}{x^5} \dot{U} U^2(x, U_1, k, P_1) \int \frac{U(x, U_1, k, P_1)}{U_{\max}} \dot{U}^5 dx.$$

4. Угловой сдвиг между напряжениями по концам линии (с учетом потерь на корону):

$$d(U_1, k, P_1) = f + \arcsin k' \frac{P_1 - 0,5GU_1^2 - DP_{k1}(U_1, k, P_1)}{U_1 U_2} \sin f \quad (11)$$

5. Потери на нагрев:

$$DP_H(U_1, k, P_1) = \frac{RU_1^2}{Z^2} \left(\frac{GZ^2}{2R} + \frac{1}{k^2} \frac{2}{k} \cos d(U_1, k, P_1) \right) \dot{U} \quad (12)$$

6. Полные потери активной мощности в линии:

$$DP(U_1, k, P_1) = DP_H(U_1, k, P_1) + DP_k(U_1, k, P_1). \quad (13)$$

Вопрос минимизации потерь активной мощности в линии относится к задачам математического программирования [9] и в общем случае формулируется следующим образом: определить оптимальные режимные параметры, а именно, напряжение в начале линии и перепад напряжений по концам линии, находящиеся в области определения рассматриваемой задачи и доставляющие минимум целевой функции:

$$U_1, k' \in V \text{ @ } \min[DP = DP(U_1, k, P_1)], \quad (14)$$

где V – область определения рассматриваемой задачи; DP – активные потери, являющиеся целевой функцией, определяемой соотношениями (8)–(13).

Область определения рассматриваемой задачи очерчивается системой ограничений на искомые режимные параметры:

¹Вид погоды: хорошая (без осадков), сухой снег, дождь (включая мокрый снег и морось), изморозь (включая гололед и иней).

$$U_{\min} \leq U_1 \leq U_{\max}; U_{\min} \leq U_2 = \frac{U_1}{k} \leq U_{\max}, \quad (15)$$

где U_{\min} , U_{\max} — минимально и максимально допустимые напряжения в конечных пунктах линии.

Кроме того, следует иметь в виду, что при выполнении ограничений (15) значения напряжения в промежуточных точках линии могут выходить за допустимые пределы. При этом по условиям работы подвесной изоляции линии и ограничения уровня радиопомех требуется ограничение напряжения в промежуточных точках линии лишь сверху. Учитывая, что максимальные повышения напряжения имеют место в средней части линии, рассматриваемое ограничение согласно (9)

$$U_1 \leq \frac{\partial}{\partial U_1} U_1 k, P_1 \leq U_{\max}, \quad (16)$$

Из приведенных соотношений (8)—(16) понятно, что получение искомым оптимальных режимных параметров $U_{1\text{опт}}$, $k_{\text{опт}}$ в аналитической форме возможно лишь при упрощенной постановке задачи, как, например, это сделано в [4, 5]. Однако при современных вычислительной технике и программных комплексах в этом необходимости нет. Так например, в терминах программного комплекса «Mathcad» задача минимизации потерь мощности решается с помощью операции нахождения минимума функции: $\text{Minimize } DP(U_1, k, P_1)$.

При этом во внимание принимаются и ограничивающие факторы (15) и (16). В качестве главного режимного параметра выступает активная мощность в начале линии, для каждого значения которой находятся оптимальное напряжение в начале линии и оптимальный перепад напряжений.

На рис. 3 приведены результаты минимизации потерь активной мощности в линиях напряжением 500 и 750 кВ со следующими параметрами:

Параметр	Значение параметра для линии с номинальным напряжением	
	500 кВ	750 кВ
Конструкция фазы	3хАС-330/43	5хАС-240/39
Сопротивление Z_w , Ом	280	260
Мощность P_w , МВт	890	2160
Коэффициент запаса по короне α	1,132	1,067
Проводимость g_k , $\text{См} \cdot 10^{-6}$	0,075	0,050
Напряжение, кВ		
максимальное	525	787
минимальное	475	712

Рассмотрены два предельных варианта погоды: хорошая погода при температуре +20 °С и изморозь при температуре -5 °С. В случае хорошей погоды при передаваемых мощностях, превышающих примерно половину натуральной мощности линии, для обеспечения минимума потерь мощности должно поддерживаться максимальное рабочее напряжение в начале линии, а перепад напряжений по мере приближения передаваемой мощности к натуральной мощности снижается от $k \gg 1,03$ до 1,0. При изморози минимум потерь мощности достигается при поддержании на концах линии минимально допустимого рабочего напряжения во всем диапазоне передаваемых мощностей вплоть до натуральной мощности линии. И лишь при передаваемых мощностях, превышающих натуральную мощность линии, требуется некоторое повышение напряжения в начале линии.

Представляет интерес оценка чувствительности потерь активной мощности к отклонениям напряжения по концам линии от оптимальных значений. В таблице приведено сопоставление потерь мощности для линии длиной 300 км для случаев поддержания оптимальных режимных параметров (по-

Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, кВ	Вид погоды	Параметр					
		Мощность P_1 , МВт	Напряжение U_1 , кВ	Перепад напряжений k	Потери мощности, МВт		
					на нагрев DP_n	на корону DP_k	суммарные DP
500	Хорошая	800	525*	1,01*	20,34	1,19	21,53 (100%)
			500	1,0	22,34	0,86	23,20 (108%)
	Изморозь	800	475*	1,0*	21,82	18,25	40,07 (100%)
			500	1,0	19,49	26,43	49,92 (115%)
750	Хорошая	1500	787*	1,016*	26,59	2,38	28,97 (100%)
			750	1,0	28,97	1,78	30,75 (106%)
	Изморозь	1500	712*	1,0*	28,19	37,63	65,82 (100%)
			750	1,0	25,19	54,52	79,71 (121%)

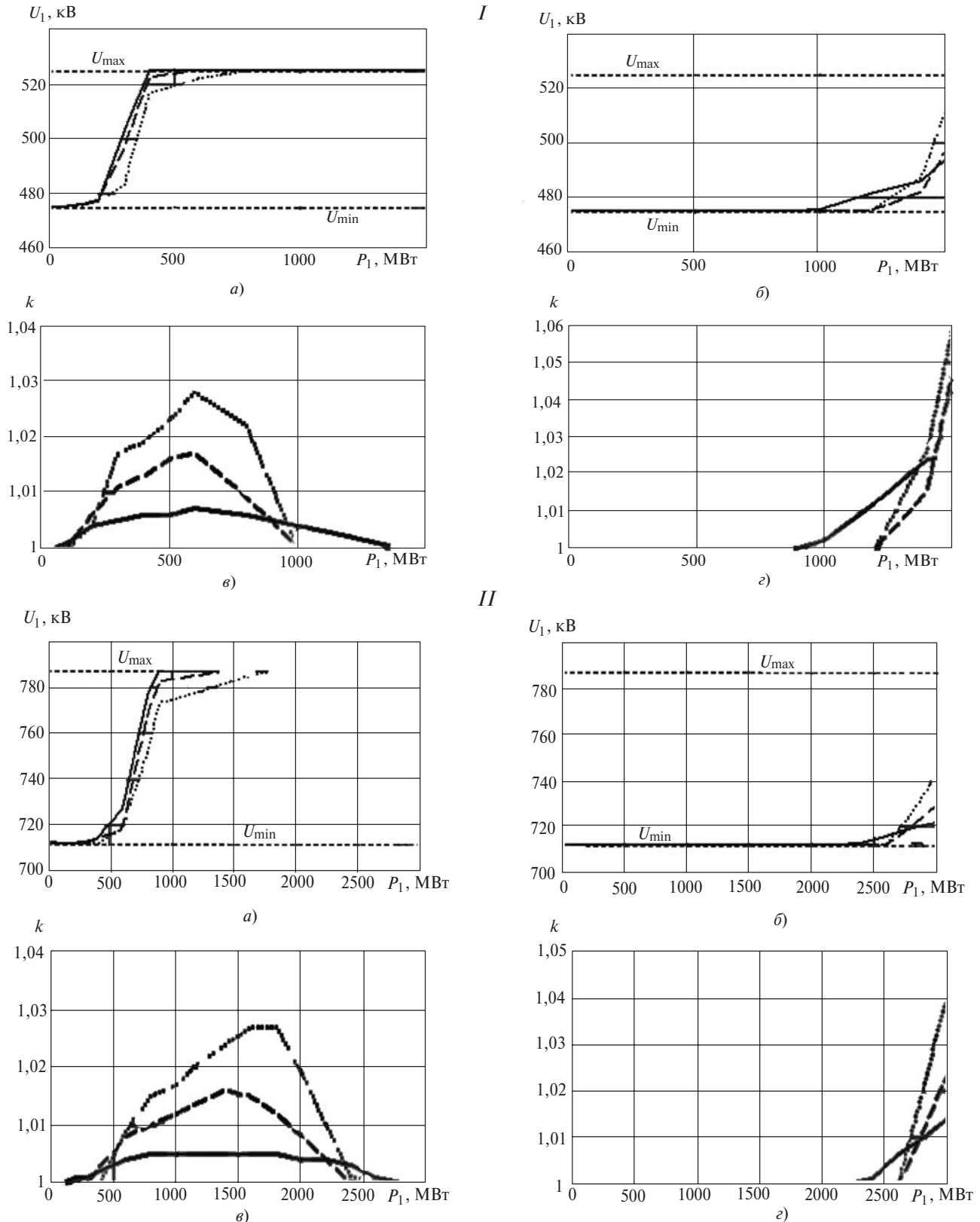


Рис. 3. Минимизация потерь мощности: I – для ВЛ-500; II – для ВЛ-750: а – оптимальное напряжение в начале линии при хорошей погоде; б – то же при изморози; в – оптимальный перепад напряжений при хорошей погоде; г – то же при изморози: — — 150 км; ---- — 300 км, — 450 км

меченных звездочкой) и для вариантов, когда по концам линии устанавливаются номинальные напряжения. Более детальный анализ, учитывающий широкий диапазон длины линий и передаваемых

мощностей, показал, что потери мощности увеличиваются на 5–10% при хорошей погоде и на 10–40% при изморози, если вместо оптимальных режимных параметров по концам линии поддержи-

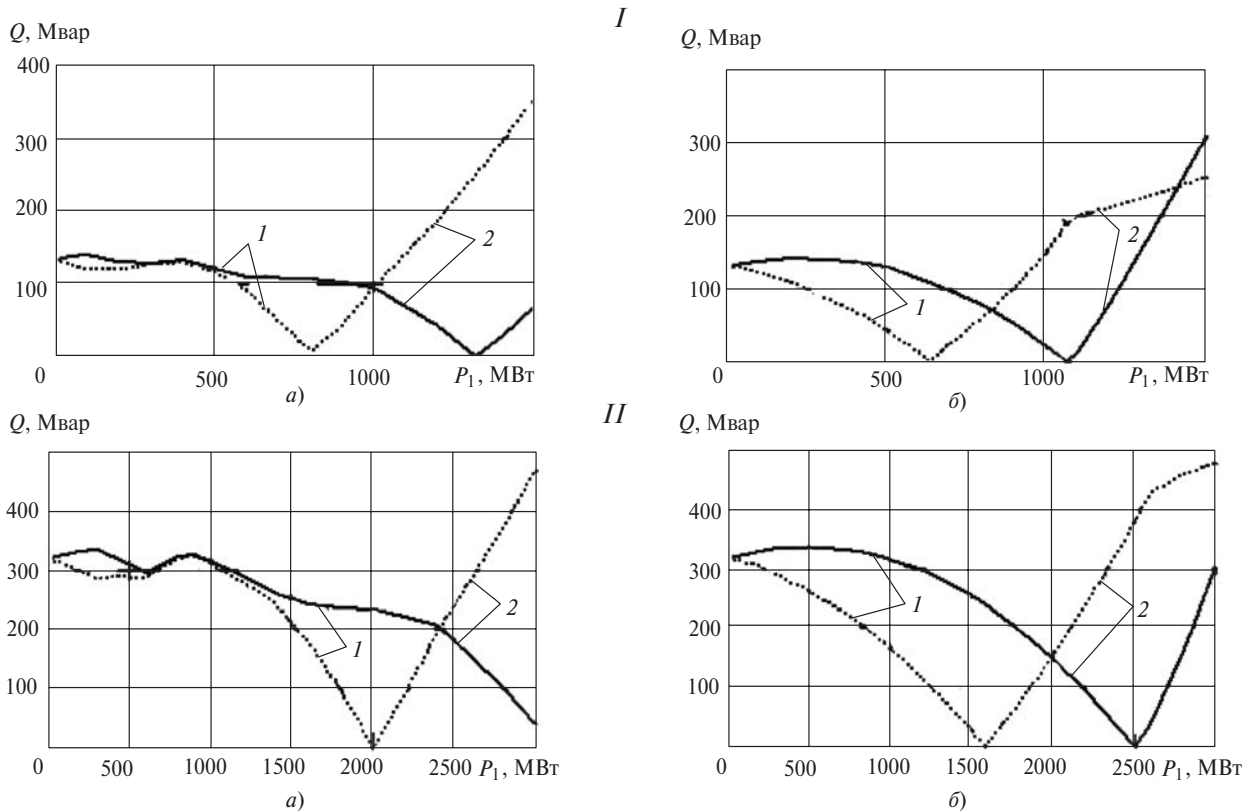


Рис. 4. Оптимальная реактивная мощность по концам ВЛ при длине 300 км: I – 500 кВ; II – 750 кВ; а – при хорошей погоде; б – при изморози: — — начало линии; - - - - - конец линии; 1 – генерация; 2 – потребление

вать номинальное напряжение независимо от вида погоды и значения передаваемой мощности.

Следует отметить, что при решении задачи минимизации потерь активной мощности не накладывалось ограничений на реактивную мощность по концам линии и предполагалось, что она может быть сбалансирована за счет возможностей примыкающих систем и управляемых устройств реактивной мощности, установленных в концевых пунктах линии. В общем случае реактивная мощность по концам линии определяется следующими соотношениями:

$$Q_1(U_1, k, P_1) = U_1^2 \left[\frac{1}{2} - \frac{B}{Z} + \frac{1}{Z} \cos f - \frac{\cos[d(U_1, k, P_1) - f]}{k} \right];$$

$$Q_2(U_1, k, P_1) = \frac{U_1^2}{k^2} \left[\frac{1}{2} - \frac{B}{Z} + \frac{1}{Z} [\cos f - k \cos[d(U_1, k, P_1) + f]] \right];$$

(17)

где $d(U_1, k, P_1)$ находится из (11).

На рис. 4 приведены зависимости реактивной мощности от передаваемой активной мощности в случае, если в линиях напряжением 500 и 750 кВ обеспечивается минимальный уровень активных потерь. Из этих зависимостей вытекают требования к управляемым устройствам реактивной мощности для обеспечения минимальных потерь мощности в процессе изменения передаваемой активной мощ-

ности с учетом характера погоды вдоль трассы линии.

Рассмотренная задача минимизации потерь активной мощности может быть также сформулирована с учетом ограничений на прием и генерацию реактивной мощности примыкающими системами и устройствами реактивной мощности, установленными по концам линии.

Рекомендуемый универсальный подход к минимизации потерь активной мощности в линиях сверхвысокого напряжения, в основе которой лежит строгий учет потерь на нагрев и коронирование проводов, ориентирован на использование современной вычислительной техники и программных комплексов типа «Mathcad» или «Matlab» в учебном процессе, при проектировании линий СВН, а также для оптимизации потерь в действующих сетях СВН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поспелов Г.В., Кривушкин Л.Ф. Об условиях оценки экономичности регулирования напряжения электропередач 500–750–1150 кВ. – Изв. вузов. Энергетика, 1975, №5.
2. Попков В.И., Тамазов А.И. Снижение потерь энергии на корону в линиях электропередачи при регулировании напряжения. – Электричество, 1975, №11.
3. Анисимова Н.Д. Об оптимизации режима электропередач сверхвысокого напряжения. – Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1975, №5.

4. **Баламетов А.Б.** Закономерности регулирования напряжения и реактивной мощности ВЛ СВН. – Электричество, 1998, №9.
5. **Баламетов А.Б.** Определение оптимального перепада напряжения электропередачи сверхвысокого напряжения. – Электричество, 2000, №12.
6. **Атабеков Г.И.** Основы теории цепей. Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1969.
7. **Проектирование** линий электропередачи сверхвысокого напряжения/Под ред. Г.Н. Александрова и Л.Л. Петерсона. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
8. **Справочник** по проектированию электроэнергетических систем/Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро, 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. **Комаров В.Г.** Математическое программирование. 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1980.

[10.11.10]

Автор: Красильникова Татьяна Германовна закончила в 1987 г. электроэнергетический факультет Новосибирского электротехнического института. В 2006 г. защитила кандидатскую диссертацию «Исследование транспозиции дальних и сверхдальних линий электропередачи». Доцент Новосибирского государственного технического университета.