

УДК 621.311

ЭКОНОМИЯ ЗАТРАТ И ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ ВЫБОРЕ КОНСТРУКЦИИ И СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Засл. деят. науки и техники Республики Беларусь,
докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.

Белорусский национальный технический университет

Выбор конструкции и сечения проводов электрических сетей должен быть обоснован технико-экономическими расчетами на основе приведенных затрат [1, 2].

Ранее было показано [3, 4], что действующие методики выбора экономических сечений проводов полностью не учитывают затрат на сооружение линий передачи и вносят искажения в экономическую плотность тока. Правильное значение экономических сечений проводов определяют усовершенствованные методы экономических интервалов и критериальных параметров электропередачи [3, 4]. Оба метода дают искомое решение, соответствующее минимуму стоимости передачи и распределения электроэнергии. Аналогичное решение дает метод совместного определения сечения проводов и номинального напряжения линий передачи [5]. В данной статье дадим оценку увеличения затрат и потерь электроэнергии при отходе от минимума стоимости передачи и распределения электроэнергии. Это покажет целесообразность поиска параметров электрических сетей, соответствующих указанному минимуму.

Стоимость передачи электроэнергии представим выражением с учетом капиталовложений в линию и конечные подстанции

$$C = \frac{3}{\Theta} = \frac{\alpha_n K_1 l + \alpha_n Y_n Pl + \Delta P_n \tau \beta l + \delta_0 t_0 l \beta'}{PT}, \quad (1)$$

где $\alpha_n K_1$ – ежегодные отчисления от стоимости 1 км линии; $\alpha_n Y_n$ – то же от капиталовложений Y_n на 1 кВт подстанций и пунктов компенсации на единицу длины; ΔP_n – потери мощности, зависящие от нагрузки на 1 км ЛЭП; δ_0 – то же холостого хода на 1 км ЛЭП; t_0 – продолжительность работы электропередачи в часах в году; β и β' – стоимость 1 кВт·ч потерь энергии нагрузочных и холостого хода.

В отличие от [3, 4] в выражение стоимости (1) входят составляющие стоимости конечных подстанций и стоимости потерь энергии холостого хода.

Величина нагрузочных потерь мощности может быть представлена выражением

$$\Delta P_n = \frac{P^2 r_0 \chi}{U^2 \cos^2 \varphi},$$

где коэффициент χ учитывает нагрузочные потери мощности на подстанциях, которые нетрудно определить в каждом конкретном случае.

Вместо выражения (1) запишем

$$C = \frac{\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta'}{PT} l + \frac{\alpha_n Y_n l}{T} + \frac{Pr_0 \tau \beta \chi l}{U^2 \cos^2 \varphi T}. \quad (2)$$

Отсюда видно, что стоимость передачи можно рассматривать как функцию двух переменных P и l .

Значение минимальной стоимости определяется соотношениями:

$$\frac{\partial C}{\partial P} = 0; \quad \frac{\partial C}{\partial l} = 0.$$

Из выражения (2) видно, что по переменной l C не имеет ни минимума, ни максимума. Производная стоимости передачи по мощности будет:

$$\frac{\partial C}{\partial P} = -\frac{\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta'}{P^2 T} l + \frac{r_0 \tau \beta \chi}{U^2 \cos^2 \varphi T} l = 0$$

или

$$P_3^2 = \frac{(\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta') U^2 \cos^2 \varphi}{r_0 \tau \beta \chi};$$

$$P_3 = U \cos \varphi \sqrt{\frac{\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta'}{r_0 \tau \beta \chi}}. \quad (3)$$

Вторая производная C по P

$$\frac{\partial^2 C}{\partial P^2} = \frac{2(\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta') l}{P^2 T}$$

всегда больше нуля, поэтому при $\frac{\partial C}{\partial P} = 0$ стоимость передачи электроэнергии будет минимальной. Формула (3) дает значение мощности, при котором стоимость передачи электроэнергии минимальна (рис. 1). Такая мощность называется экономической. Для каждой конкретной структуры расщепленных проводов (СРП) существует определенная экономическая

мощность, которая не зависит от дальности передачи l , при изменении дальности передачи экономическая мощность P_3 остается неизменной.

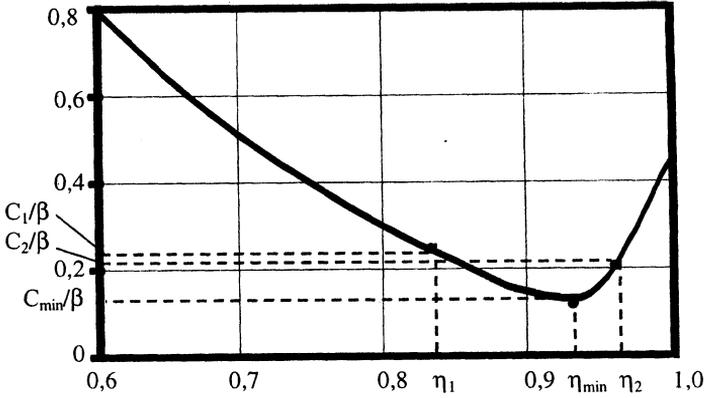


Рис. 1. Зависимость стоимости передачи энергии от КПД ЛЭП

Экономическая мощность P_3 зависит только от экономических показателей СРП (капиталовложений, доли отчисления, нормативного коэффициента эффективности капиталовложений, расходов на эксплуатацию, стоимости потерь электроэнергии, технических параметров СРП, напряжения, распределенных параметров, времени максимальных потерь).

Минимальная стоимость C_{\min} при мощности $P = P_{\min}$ будет

$$C_{\min} = \frac{2\sqrt{(\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta') \beta r_0 \tau \chi}}{U \cos \varphi T} l + \frac{\alpha_n Y_n l}{T}. \quad (4)$$

Стоимость передачи C (2) и ее минимум C_{\min} (4) являются функциями первой степени длины l .

Стоимость передачи на единицу длины и ее минимум будут:

$$\frac{C}{l} = \frac{\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta'}{PT} + \frac{\alpha_n Y_n}{T} + \frac{Pr_0 \tau \beta \chi}{U^2 \cos^2 \varphi T}; \quad (5)$$

$$\frac{C_{\min}}{l} = \frac{2\sqrt{(\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta') \beta r_0 \tau \chi}}{U \cos \varphi T} + \frac{\alpha_n Y_n}{T}. \quad (6)$$

Для каждой СРП можно найти зависимости C/l от мощности и ее экономическую мощность. Это обстоятельство использовано в [5] для совместного выбора напряжения и сечения проводов.

Дальность передачи l не влияет на экономическую мощность P_3 , а влияет на коэффициент полезного действия передачи

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P_2} = \frac{P}{P + (\Delta P_0 + \delta_0) l}.$$

С увеличением расстояния растут потери мощности и соответственно снижается КПД передачи

$$\eta = \frac{\frac{P}{\Delta P_0 + \delta_0}}{\frac{P}{\Delta P_0 + \delta_0} + l},$$

где P – передаваемая мощность; δ_0 – потери мощности холостого хода на единицу длины; ΔP_0 – нагрузочные потери мощности на единицу длины.

Соотношение

$$\frac{P}{\delta_0 + \Delta P_0} = l_3, \quad (7)$$

представляет собой по размерности длину, которая названа [6] эквивалентной длиной нагрузки. Это название вытекает из физического смысла соотношения (7): мощность нагрузки делим на потери мощности на единицу длины, получаем соответствующую длину.

КПД представится

$$\eta = \frac{l_3}{l_3 + l}. \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) видно, что эквивалентная длина l_3 – длина ЛЭП, при которой потери мощности $(\delta_0 + \Delta P_0) l_3$ равны передаваемой мощности P и соответственно

$$\eta = \frac{l_3}{l_3 + l} = 0,5.$$

Из соотношения (7) следует, что l_3 изменяется в зависимости от передаваемой P . Однако для оптимальной передачи экономической мощности P_3 свойственно значение l_k , которое было названо [3] критерияльной длиной:

$$l_k = \frac{P_3}{\delta_0 + \Delta P_{03}},$$

где P_3 – формула (3);

$$\Delta P_{03} = \frac{P_3^2 r_0 \chi}{U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta'}{\tau \beta}; \quad (9)$$

$$l_k = \frac{U \cos \varphi \sqrt{\frac{(\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta') \tau \beta}{r_0 \chi}}}{\alpha_n K_1 + \delta_0 t_0 \beta' + \delta_0 \tau \beta}. \quad (10)$$

Для ЛЭП, потерями холостого хода которых можно пренебречь $\delta_0 = 0$, получим

$$l_k = U \cos \varphi \sqrt{\frac{\tau \beta}{\alpha_n K_1 r_0 \chi}}, \quad (11)$$

т. е. значение критериальной длины, полученное ранее [6]. Зная l_k , можно найти экономический КПД по формуле

$$\eta_3 = \frac{l_k}{l_k + l}.$$

Если принять экономический КПД η_3 – фиксированный КПД, то соответствующая длина будет

$$l = \frac{1 - \eta_3}{\eta_3} l_k.$$

Так, для электропередачи желательно, чтобы $\text{КПД} \geq 0,9$. Таким образом, для каждой СРП можно определить длину $l_{0,9}$, для которой передаваемая мощность равна P_3 и $\text{КПД} = 0,9$:

$$l_{0,9} = \frac{1 - 0,9}{0,9} l_k = \frac{l_k}{9}.$$

Длина $l_{0,9}$ дает информацию о том, что при $P = P_3$: если $l \leq l_{0,9}$, то $\text{КПД} \geq 0,9$; если $l > l_{0,9}$, то $\text{КПД} < 0,9$. Полученные соотношения позволяют определить граничную длину, до которой выгодно передавать электроэнергию от удаленного источника стоимостью 1 кВт·ч C_1 при заданной стоимости электроэнергии C_2 в приемной системе. Граничная длина определяется равенством

$$l_r = \frac{C_1 - C_2}{C_{\min}},$$

где

$$C_{\min} = \left(\frac{2\sqrt{(\alpha_n K_1 + \beta \delta_0 t_0) r_0 \tau \beta \chi}}{U \cos \varphi T} + \frac{\alpha_n y_n}{T} \right) l.$$

Перейдем к оценке экономии затрат и потерь энергии при выборе параметров электрических сетей, соответствующих минимуму стоимости передачи и распределения электроэнергии.

Значение стоимости передачи электрической энергии определилось ранее полученной формулой [3, 6]:

$$C = \beta \frac{\tau}{T} \left(\frac{l^2}{l_k^2} \frac{\eta}{1-\eta} + \frac{1-\eta}{\eta} \right), \quad (12)$$

где l_k – критериальная длина соответствует формуле (11).

Минимальная стоимость получится при КПД η , равном экономическому КПД η_3 :

$$C_{\min} = 2\beta \frac{\tau}{T} \frac{l}{l_k}. \quad (13)$$

Стоимость C можно выразить через минимальную стоимость

$$C = 0,5C_{\min} \left(\frac{l}{l_k} \frac{\eta}{1-\eta} + \frac{l_k}{l} \frac{1-\eta}{\eta} \right).$$

На рис. 1 построена зависимость $C/\beta = f(\eta)$ в относительных единицах, рассчитанная по формуле (12) по экономическим показателям [2].

На рис. 1 обозначены значения стоимости передачи C_{\min}/β при $\eta = \eta_3$, C_1/β при $\eta_1 < \eta_3$ и C_2/β при $\eta_2 > \eta_3$.

Экономический КПД получился $\eta_3 = 0,94$. Для сравнения приняты значения: $\eta_1 = 0,9 \cdot \eta_3 = 0,9 \cdot 0,94 = 0,846$; $\eta_2 = 1,04 \cdot \eta_3 = 1,04 \cdot 0,94 = 0,978$.

Экономия затрат, получаемая при выборе параметров электрической сети, соответствующих экономическому КПД, может быть оценена отношением

$$\frac{C}{C_{\min}} = 0,5 \left(\frac{l}{l_k} \frac{\eta}{1-\eta} + \frac{l_k}{l} \frac{1-\eta}{\eta} \right) = 0,5 \frac{l^2 \eta^2 + l_k^2 (1-\eta)^2}{l_k l (1-\eta) \eta}. \quad (14)$$

Для принятых значений получим:

$$\frac{C_1}{C_{\min}} = 0,5 \left(\frac{1200}{19100} \frac{0,9 \cdot 0,94}{1-0,9 \cdot 0,94} + \frac{19100}{1200} \frac{1-0,9 \cdot 0,94}{0,9 \cdot 0,94} \right) = 1,727;$$

$$\frac{C_2}{C_{\min}} = 0,5 \left(0,063 \frac{0,978}{1-0,978} + 15,92 \frac{1-0,978}{0,978} \right) = 1,69.$$

Отсюда видно, что сравнительно небольшой отход от экономического КПД приводит к увеличению затрат примерно на 70 %. Определим соответствующее изменение потерь электроэнергии.

Для потерь мощности можно записать соотношения:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1-\eta}{\eta} \quad \text{и} \quad \Delta P = \frac{1-\eta}{\eta} P.$$

Соответственно мощности, в том числе и экономическая, могут быть представлены:

$$P = \frac{U^2 \cos^2 \varphi (1 - \eta)}{r_0 l \eta} \quad \text{и} \quad P_3 = \frac{U^2 \cos^2 \varphi (1 - \eta_3)}{r_0 l \eta_3},$$

где r_0 – удельное сопротивление на 1 км линии.

Разницы потерь мощности в рассматриваемых вариантах будут:

$$\delta P_1 = \Delta P_1 - \Delta P_{\min} = P_1 \frac{1 - \eta_1}{\eta_1} - P_3 \frac{1 - \eta_3}{\eta_3}; \quad \delta P_2 = P_2 \frac{1 - \eta_2}{\eta_2} - P_3 \frac{1 - \eta_3}{\eta_3}.$$

Разницы в потерях энергии:

$$\Delta \mathcal{E}_1 = \frac{U^2 \tau \cos^2 \varphi}{r_0 l} \left[\frac{(1 - \eta_1)^2}{\eta_1^2} - \frac{(1 - \eta_3)^2}{\eta_3^2} \right]; \quad (15)$$

$$\Delta \mathcal{E}_2 = \frac{U^2 \tau \cos^2 \varphi}{r_0 l} \left[\frac{(1 - \eta_2)^2}{\eta_2^2} - \frac{(1 - \eta_3)^2}{\eta_3^2} \right]. \quad (16)$$

Из выражения (15) видно, что при работе с экономическим КПД будет экономия электроэнергии, так как при $\eta_1 < \eta_3$: $(1 - \eta_1)^2 > (1 - \eta_3)^2$; $\eta_1^2 < \eta_3^2$ и $\frac{(1 - \eta_1)^2}{\eta_1^2} > \frac{(1 - \eta_3)^2}{\eta_3^2}$.

Во втором случае экономии энергии не будет, так как при $\eta_2 > \eta_3$: $(1 - \eta_2)^2 < (1 - \eta_3)^2$; $\eta_2^2 > \eta_3^2$ и $\frac{(1 - \eta_2)^2}{\eta_2^2} < \frac{(1 - \eta_3)^2}{\eta_3^2}$.

Однако в целом режим работы с КПД η_2 не экономичен, так как приведенные затраты при нем больше, чем при экономическом КПД, больше будут также и капитальные затраты.

Определим отношение потерь энергии двух рассматриваемых режимов η_1 и η_2 к потерям энергии при η_3 для принятых выше величин:

$$\frac{\Delta \mathcal{E}_1}{\Delta \mathcal{E}_{\min}} = \frac{(1 - \eta_1)^2}{\eta_1^2} \frac{\eta_3^2}{(1 - \eta_3)^2} = \frac{0,154^2}{0,846^2} \frac{0,94^2}{0,06^2} = 8,1;$$

$$\frac{\Delta \mathcal{E}_2}{\Delta \mathcal{E}_{\min}} = \frac{(1 - \eta_2)^2}{\eta_2^2} \frac{\eta_3^2}{(1 - \eta_3)^2} = \frac{0,022^2}{0,978^2} \frac{0,94^2}{0,06^2} = 0,124.$$

Эти цифры подтверждают сказанное выше.

ВЫВОДЫ

1. При выборе параметров электрических сетей, обеспечивающих экономический КПД, получается минимальная стоимость передачи и распре-

деления электрической энергии, что дает существенную экономию приведенных затрат, потерь мощности и энергии по сравнению с другими решениями.

2. Экономическая передаваемая мощность может быть определена по формуле (3), а соответствующая минимальная стоимость передачи электроэнергии – по выражению (4).

3. Показана целесообразность применения для получения минимальной стоимости передачи электроэнергии метода [5] совместного выбора сечения и конструкции проводов и номинального напряжения линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоиздат, 1982.
2. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С. С. Рокотяна, И. М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Поспелов Г. Е. Выбор сечений проводов электрических сетей по экономическому фактору // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 2. – С. 3–9.
4. Поспелов Г. Е. Оптимизация и снижение потерь энергии в электрических сетях // Энергия и менеджмент. – 2002. – № 1 (5).
5. Поспелов Г. Е., Нгуен Бак Фук. Подход к предварительному выбору класса напряжения и сечения проводов при проектировании ЛЭП и исследовании развития электропередач // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1997. – № 11–12. – С. 3–11.
6. Поспелов Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач. – Мн.: Выш. шк., 1967.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 12.12.2002

УДК 621.3.066.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Докт. техн. наук, проф. **ГЕРАСИМОВИЧ А. Н.**, канд. техн. наук **ГЕРАСИМОВИЧ Д. А.**,
канд. техн. наук **МИШКИНА М. А.**, инженеры **ЕЖЕНКОВ Г. Г.**, **КЛИМОВИЧ Ю. А.**

*Белорусский национальный технический университет,
Пинские электрические сети,
РУП «Брестэнерго»*

Контактные соединения являются неотъемлемой частью токоведущих систем различных электроустановок и влияют на надежность работы последних в силу своей многочисленности. Как и токоведущие части, контакты подвергаются значительному термическому и динамическому воздействиям от токов переходных режимов, особенно токов коротких замыканий.