

УДК 621.34658

ВЫБОР СЕЧЕНИЙ ПРОВОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПО ЭКОНОМИЧЕСКОМУ ФАКТОРУ

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

Белорусская государственная политехническая академия

Выбор сечения проводов проектируемой электрической сети производится с учетом: а) технико-экономических показателей; б) пропускной способности сечения провода по нагреву; в) механической прочности проводов воздушных линий; г) условий образования короны (отсутствие заметных потерь мощности на корону в условиях хорошей погоды и относительно небольшие годовые потери энергии).

В некоторых случаях выбранное сечение провода должно быть проверено на устойчивость при протекании тока короткого замыкания.

В данной статье рассмотрим выбор сечений проводов по экономическим условиям. Критерием выбора сечения проводов воздушных и кабельных линий, согласно [1], является минимум приведенных затрат. Однако реализация этого принципа носит дискуссионный характер, в частности применение нормированной экономической плотности тока.

Необходимо отметить, что метод выбора сечения проводов по нормированной экономической плотности тока обладает рядом недостатков, которые отмечались в [2...5 и др.]. Значения нормированной экономической плотности тока были установлены, исходя из прямолинейной зависимости стоимости сооружения линии от сечения проводов, и соответствуют формуле

$$j_3 = \sqrt{\frac{10\alpha\%b}{3\rho\tau\beta}}, \quad (1)$$

где $\alpha\%$ – суммарный коэффициент ежегодных отчислений от капиталовложений; b – коэффициент пропорциональности при переменной части капитальных затрат; ρ – удельное сопротивление материала проводника; τ – время потерь; β – стоимость 1 кВт·ч потерь.

Из (1) видно, что рассчитанные по ней экономические плотности тока не учитывают постоянной составляющей капитальных затрат. Неполный

учет стоимости линий, как отмечено в [5], может приводить к решениям, не имеющим смысла. Строительство некоторых воздушных линий 110 кВ с меньшими сечениями проводов обходится дороже, чем строительство линий с большими сечениями [1], и в широком диапазоне сечений проводов ВЛ-110 кВ на унифицированных опорах имеют примерно одинаковые капитальные затраты. Согласно (1), это возможно при $b \leq 0$, что соответствует значениям j_3 и F – сечения провода, не имеющим смысла.

Отмеченный недостаток свойствен методике [6], а также методу экономических интервалов в том виде, в котором он дается в учебных пособиях по курсу «Электрические системы и сети» [2 и др.]. Так, согласно [2], экономический ток по методу экономических интервалов определяется по формуле

$$I_3 = \sqrt{\frac{\alpha}{\tau\beta}} \sqrt{\frac{K_2 - K_1}{3(R_1 - R_2)}}, \quad (2)$$

где K_1 и K_2 – стоимости линий для сравниваемых сечений F_1 и F_2 , тыс. руб/км; R_1 и R_2 – сопротивления линий тех же сечений, Ом/км.

Если заданная нагрузка $I_3 < I_3$, то экономичнее сечение F_1 , а если $I_3 > I_3$, то выгоднее сечение F_2 .

Из (2) видно, что K_2 и K_1 полностью учитывают капитальные затраты при любой их зависимости от сечения, в отличие от (1), но из-за разности $(K_2 - K_1)$ постоянная составляющая стоимости линий пропадает.

Поэтому отмеченный выше недостаток метода экономической нормативной плотности тока присущ и методу экономических интервалов – для ЛЭП на унифицированных опорах I_3 может получиться близким к нулю или отрицательным. В [5] был предложен усовершенствованный метод экономических интервалов, который устраняет указанный недостаток. Отсутствует он также в методе [4], предложенном автором данной статьи на основе критериальных параметров [7]. В качестве экономического критерия была принята стоимость передачи электроэнергии. Экономическая мощность, соответствующая минимуму стоимости передачи электроэнергии, получилась равной

$$P_3 = U \cos \varphi \sqrt{\frac{\alpha K_1}{\tau\beta r_0}}, \quad (3)$$

где r_0 – активное сопротивление на 1 км линии.

Для двух смежных стандартных сечений проводов F_1 и F_2 экономические мощности будут:

$$P_{31} = U \cos \varphi \sqrt{\frac{\alpha K_1 F_1}{\tau\beta\rho}} \quad (4)$$

и

$$P_{32} = U \cos \varphi \sqrt{\frac{\alpha K_2 F_2}{\tau\beta\rho}}, \quad (5)$$

где K_1 и K_2 – стоимости 1 км линии сечением F_1 и F_2 .

Если заданная нагрузка равна мощности P_{31} , то наиболее экономичным сечением будет F_1 , а если она равна P_{32} , то – F_2 . Если заданная нагрузка отличается от P_{31} , то до определенной граничной мощности P_r остается выгодным сечение F_1 , а если эта нагрузка ближе к мощности P_{32} , то – сечение F_2 . Граничная мощность P_r определяется как среднегеометрическое двух мощностей

$$P_r = \sqrt{P_{31}P_{32}}. \quad (6)$$

Докажем это положение. Если граничная нагрузка P_r будет экономической с промежуточным сечением F_r , то стоимости передачи электроэнергии при экономических мощностях P_{31} и P_{32} представятся выражениями:

$$C_1 = \frac{\alpha K_r}{P_{31}T} + \frac{P_{31}^2 \rho \tau \beta}{U^2 \cos^2 \varphi P_{31} F_r T};$$

$$C_2 = \frac{\alpha K_r}{P_{32}T} + \frac{P_{32}^2 \rho \tau \beta}{U^2 \cos^2 \varphi P_{32} F_r T},$$

которые должны дать одинаковые значения стоимости передачи электроэнергии при подходе к граничной нагрузке «слева» от сечения F_1 и «справа» от сечения F_2 . Приравняв C_1 и C_2 , получим

$$\frac{\alpha K_r}{P_{31}T} + \frac{P_{31}^2 \rho \tau \beta}{U^2 \cos^2 \varphi P_{31} F_r T} = \frac{\alpha K_r}{P_{32}T} + \frac{P_{32}^2 \rho \tau \beta}{U^2 \cos^2 \varphi P_{32} F_r T}.$$

Отсюда найдем

$$U^2 \cos^2 \varphi \frac{\alpha F_r K_r}{\rho \tau \beta} = P_{31} P_{32},$$

или искомое выражение граничной нагрузки

$$P_r = \sqrt{P_{31}P_{32}}.$$

Если заданная нагрузка $P_3 < P_r$, то для нее экономическим сечением будет F_1 . Если $P_3 > P_r$, то экономичнее сечение F_2 .

Экономическая плотность тока, соответствующая минимальной стоимости передачи электрической энергии, может быть получена на основе формулы (5) из выражения

$$P_3 = U \cos \varphi \sqrt{\frac{\alpha K_1}{\tau \beta r_0}} = \sqrt{3} U j_3 F \cos \varphi \cdot 10^{-3}.$$

Отсюда

$$j_3 = \frac{10^3}{F} \sqrt{\frac{\alpha K_1}{3\tau\beta r_0}}. \quad (7)$$

По этой формуле в табл. 1 рассчитаны экономические плотности тока для различных стандартных сечений и номинальных напряжений воздушных линий электропередачи при исходных экономических показателях [1].

Таблица 1

Экономические плотности тока для ВЛЭП номинальных напряжений и стандартных сечений проводов

U, кВ	Провод сталеалюминиевый сечением, мм ²	Экономическая плотность тока, А/мм ²
220	240/32	1
220	300/39	0,96
220	400/51	0,88
330	2 × 240/32	0,93
330	2 × 300/32	0,83
330	2 × 400/51	0,82
500	3 × 300/66	0,75
500	3 × 300/43	0,73
500	3 × 400/51	0,69
500	3 × 500/64	0,66
750	5 × 240/56	0,83
750	5 × 300/66	0,81
750	5 × 400/51	0,72
1150	8 × 300/39	0,83

Примечание. Табл. 1 рассчитана при $\alpha = 0,14$; $\beta = 0,03$ руб/(кВт·ч); $\tau = 4000$ ч.

Экономические плотности тока, рассчитанные по (7), в табл. 1 обеспечивают минимальную стоимость передачи электроэнергии и им соответствует оптимальное соотношение капиталовложений и стоимости потерь электроэнергии.

Эта методика позволяет и в условиях эксплуатации выбрать оптимальные нагрузки для существующих стандартных проводов электрических сетей.

Для линии электропередачи постоянного тока (ППТ) экономическая мощность определяется выражением [7]

$$P_3 = U \sqrt{\frac{\alpha K_1}{2\tau\beta r_0}}.$$

Соответственно экономическая плотность тока равна

$$j_3 = \frac{10^3}{F} \sqrt{\frac{\alpha K_1}{2\tau\beta r_0}}. \quad (8)$$

Сопоставим экономические плотности тока для передачи постоянного j_3^- и переменного j_3^+ токов. Сравнение (7) и (8) дает соотношение

$$\frac{j_3^-}{j_3^+} = \sqrt{\frac{K_1^-}{K_1^+}} \sqrt{\frac{2}{3}},$$

или

$$j_3^- = j_3^+ = \sqrt{\frac{2K_1^-}{3K_1^+}}. \quad (9)$$

По оценке [8] различие стоимости линий переменного и постоянного токов одинаковой пропускной способности составляет 15 %, т. е.

$$\frac{K_1^-}{K_1^+} = 1,15.$$

Подставляя это значение в (9), получим

$$j_3^- = j_3^+ = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,15}{3}} = 0,88 j_3^+,$$

или

$$j_3^+ \cong 1,14 j_3^-.$$

Отсюда видно, что для принятого в [8] соотношения стоимостей линий переменного и постоянного токов экономическая плотность тока для переменного составляет примерно 0,9 экономической плотности тока ППТ.

Одинаковыми плотности токов будут при значении $\frac{K_1^-}{K_1^+} = 1,5$.

При $\frac{K_1^-}{K_1^+} > 1,5$ $j_3^- > j_3^+$, а при $\frac{K_1^-}{K_1^+} < 1,5$ $j_3^- < j_3^+$.

Для электропередачи переменного тока напряжением 330 кВ и выше заметными могут быть потери мощности и энергии на коронирование проводов и от протекания емкостных токов ЛЭП.

Наиболее точно потери на нагревание проводов могут быть подсчитаны, если известны графики работы электропередачи и распределение тока, проходящего вдоль линии. Потери энергии на нагревание за время t_0 можно подсчитать по выражению

$$\Delta \mathcal{E}_n = 3 \int_0^{t_0} \int_0^L I^2 r_0 dl dt,$$

где I – ток, текущий в какой-либо точке линии, расположенной на расстоянии l от ее конца.

Потери на коронирование проводов целесообразнее определять по экспериментальным данным [1]. Иногда применяются упрощенные методы

их учета; один из них – учет определенными процентами от потерь на коронирование (по «Энергосетьпроект» их можно принять равными 15...20 % от потерь на нагревание). В соответствии с другим вариантом обращаются к зависимостям среднегодовых потерь мощности на корону от сечения проводов, которые представляют выражением

$$\Delta P_k = \frac{A}{F}.$$

Коэффициент A зависит от метеорологических условий, типа проводов и напряжения линии; его значения могут быть определены на основе опытных данных.

Потери мощности на нагревание от прохождения рабочего и емкостного токов линии рассчитываем по

$$\Delta P_n = 3I_a^2 R + 3 \int_0^L \left(\frac{I_c}{L} l \pm I_p \right)^2 r_0 dl,$$

где I_a и I_p – активная и реактивная составляющие рабочего тока линии, неизменного вдоль всей линии, I_p берется со знаком плюс при емкостном характере и со знаком минус – при индуктивном; I_c – емкостный ток, который рассматривается как равномерно распределенная вдоль линии нагрузка; $\frac{I_c}{L} l$ – емкостный ток в точке, находящейся на расстоянии l от конца линии.

После интегрирования и преобразований получим

$$\Delta P_n = 3 \left(I^2 \pm I_p I_c + \frac{I_c^2}{3} \right) r_0 L.$$

Соответственно потери энергии на нагревание в киловатт-часах могут быть определены из выражения

$$\Delta \mathcal{E}_n = \frac{3I_m^2 \rho L \cdot 10^{-3}}{F} \tau + \frac{I_c^2 \rho L \pm 3I_p I_c \rho L}{F} \tau_c \cdot 10^{-3},$$

где I_m – максимальное значение рабочего тока линии; τ_c – время потерь в часах для тока I_c , учитывающее возможности компенсации емкостного тока линии в режиме холостого хода и малых нагрузок.

Экономическая мощность с учетом потерь холостого хода получилась в виде

$$P_s = U \cos \varphi \sqrt{\frac{\alpha K_1 + \delta_0 t_0 \beta'}{\tau \beta r_0}},$$

где δ_0 – потери мощности холостого хода на 1 км ЛЭП, МВт; t_0 – время пребывания ЛЭП под напряжением, ч; β' – стоимость 1 кВт·ч потерь холостого хода, руб/(кВт · ч).

Соответственно экономическая плотность тока определяется

$$j_3 = \frac{10^3}{F} \sqrt{\frac{\alpha K_1 + \delta_0 t_0 \beta'}{\tau \beta r_0}}$$

Из этой формулы видно, что учет потерь холостого хода увеличивает экономическую плотность тока незначительно.

Экономическая плотность тока существенно зависит от стоимости 1 кВт·ч потерь энергии β и доли ежегодных отчислений от капитальных затрат α ; сравнительно мало влияет на экономическую плотность тока время потерь τ .

ВЫВОДЫ

1. Действующие методики выбора экономических сечений проводов не учитывают полностью капитальных затрат на сооружение линий передачи. Такие подходы вносят искажения в экономическую плотность тока.

2. Правильные значения экономических сечений проводов определяют усовершенствованный метод экономических интервалов, предложенный в [5], и метод критериальных параметров электропередачи [7]. Эти методы дают значения экономического сечения и экономической плотности тока, соответствующие минимуму стоимости передачи электроэнергии.

3. Предложенные в данной статье формулы экономической мощности и экономической плотности тока позволяют определить значение этих величин с учетом сложившихся соотношений капитальных затрат и стоимости электроэнергии.

4. Для существующих ЛЭП могут быть определены нагрузки, соответствующие минимуму стоимости передачи электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Блок В. М. Электрические сети и системы. – М.: Высш. шк., 1986.
3. Будзко И. А., Левин М. С. Энергетически целесообразная плотность тока в проводах электрических линий // Электричество. – 1985. – № 2.
4. Поспелов Г. Е. Дискуссия по статье Будзко И. А., Левина М. С. (п. 2) // Электричество. – 1985. – № 2.
5. Зельцбург Л. М. Экономическая плотность тока. – Нижний Новгород: Электропроект, 1990.
6. Падалко Л. П., Хассан Еид. О выборе оптимального сечения проводов линий электропередачи // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 6.
7. Поспелов Г. Е. Методика анализа и расчетов основных технико-экономических показателей электрических сетей. – Мн.: БГПА, 1996.
8. Александров Г. М. Передача электрической энергии переменным током. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 31.07.2001